



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

EMANUEL JOAQUIM DANIEL JÚNIOR

**IMPACTOS DA VARIAÇÃO DA RUGOSIDADE NOS PERFIS DE VELOCIDADE
EM CALHAS FLUVIAIS DE PEQUENA DECLIVIDADE UTILIZANDO CFD**

Recife
2024

EMANUEL JOAQUIM DANIEL JÚNIOR

**IMPACTOS DA VARIAÇÃO DA RUGOSIDADE NOS PERFIS DE VELOCIDADE
EM CALHAS FLUVIAIS DE PEQUENA DECLIVIDADE UTILIZANDO CFD**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito para obtenção do título de mestre em Engenharia Civil.

Área de concentração: Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos.

Orientador: Prof. Dr. Jaime Joaquim da Silva Pereira Cabral.

Recife

2024

Catálogo na fonte
Bibliotecária Margareth Malta, CRB-4 / 1198

D184i	Daniel Júnior, Emanuel Joaquim. Impactos da variação da rugosidade nos perfis de velocidade em calhas fluviais de pequena declividade utilizando CFD / Emanuel Joaquim Daniel Júnior. – 2024. 140 f.: il., figs., qds., tabs., abrev. e siglas. Orientador: Prof. Dr. Jaime Joaquim da Silva Pereira Cabral. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2024. Inclui Referências. 1. Engenharia civil. 2. Perfis isotáquicos. 3. Drenagem urbana. 4. Revestimento de calhas fluviais. I. Cabral, Jaime Joaquim da Silva Pereira (Orientador). II. Título. 624 CDD (22. ed.)	UFPE BCTG/2024-105
-------	---	----------------------------------

EMANUEL JOAQUIM DANIEL JÚNIOR

**IMPACTOS DA VARIAÇÃO DA RUGOSIDADE NOS PERFIS DE VELOCIDADE
EM CALHAS FLUVIAIS DE PEQUENA DECLIVIDADE UTILIZANDO CFD**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, como requisito parcial para a obtenção do título de mestre em Engenharia Civil. Área de concentração: Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos.

Aprovada em: 22/02/2024.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. José Roberto Gonçalves de Azevedo (Examinador Interno)
Universidade Federal de Pernambuco

Profª. Dra. Edna Maria de Faria Viana (Examinadora Externa)
Universidade Federal de Minas Gerais

Profª. Dra. Roberta de Melo Guedes Alcoforado (Examinadora Externa)
Universidade de Pernambuco

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primordialmente, a Deus e sua Mãe, a Virgem Santíssima, pela sabedoria, determinação, resiliência e pelas inúmeras graças concedidas durante toda trajetória. O manto adornado de Nossa Senhora acalentou-me nos momentos mais difíceis e aconchegou-me nos mais alegres.

Gostaria de agradecer também aos meus pais, Eliana Toroni e Emanuel Missias, pela base, amor e doação completa. Obrigado, mãe, por cada joelho no chão, cada noite mal dormida e cada oração para o meu bem-estar e de todos os que me cercam.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Jaime Joaquim da Silva Pereira Cabral, por todo amparo, conselho e conhecimento doado ao longo de todos esses anos. Suas contribuições auxiliaram-me na formação da pessoa e profissional que me tornei.

Agradeço aos amigos, Kaynan Paulo e Jullius Barros, pela paciência e companheirismo. Kaynan, obrigado por todo suporte emocional e intelectual que pudeste absorver e compartilhar. Jullius, obrigado por confiar na proposta dos nossos mestrados e de ser a dupla que eu precisava e que continuarei sempre precisando.

A todos os amigos que, direta ou indiretamente, foram determinantes para a conclusão deste mestrado e formarem a fundação sustentadora nos momentos mais turbulentos.

Por fim, agradeço também a TPF Engenharia LTDA, por todo aparato técnico fornecido desde o início da minha carreira e por toda flexibilidade disponibilizada para o bom andamento do meu mestrado e desta pesquisa.

A todos vocês, toda minha gratidão.

“Deus Pai glorioso e eterno, nos vos adoramos e bendizemos porque destes à Santa Igreja e ao mundo o vosso filho Dom Henrique Soares da Costa, a quem ornastes com resplandecentes virtudes humanas, cristãs e sacerdotais, e o revestistes de abrasado amor pela Igreja e pela salvação das almas, para ‘apascentar em Cristo’” (CNBB, 2020).

RESUMO

Até o final do século XX, o conceito da drenagem urbana limitava-se ao simples manejo das águas precipitadas, buscando apenas reduzir, de forma local, os impactos gerados pelas cheias e inundações. Já no século XXI, esse manejo passou a englobar as mais diversas áreas, adotando uma postura que evoluiu de apenas corretiva, mas que começou a abranger as premissas de sustentabilidade e de coexistência em sintonia com a natureza, entendendo-se, assim, que os projetos devem se reconciliar com os ecossistemas hídricos. Nesse sentido, os projetos de canais ainda podem evoluir e incorporar melhor tais conceitos, principalmente quanto ao entendimento sobre o impacto do coeficiente de rugosidade numa visão tridimensional do escoamento. Paralelamente, verificou-se que técnicas computacionais de cálculo numérico que envolvem a utilização *Computational Fluids Dynamics* (CFD) são muito comuns na literatura para análises de fenômenos de estruturas hidráulicas e de superfície livre. Dentro dessa perspectiva, este trabalho objetiva aprofundar o conhecimento no que tange à formação dos perfis de velocidade, para diferentes rugosidades, em uma calha fluvial de pequena declividade, utilizando-se de base o canal experimental existente no Laboratório de Hidráulica, Hidráulica Computacional e Hidrologia da UFPE. Realizou-se, então, um ensaio experimental para a obtenção das condições de contorno do domínio computacional modelado, bem como um projeto de simulação em CFD de acordo com as boas práticas do que se há de mais atual na literatura. Quanto à verificação, testes de malha e de *time step* foram realizados, além de se observar um excelente comportamento dos escalares no que se era esperado a partir dos modelos equacionais atribuídos. Os resultados encontrados foram satisfatórios, observando-se, de forma qualitativa, que os perfis isotáquicos se comportaram dentro do esperado, principalmente ao correlacionar os diferentes materiais com o gráfico que representa a relação entre o coeficiente de Manning e a rugosidade equivalente da areia de Nikuradse. Verificou-se, então, que os revestimentos em acrílico e em concreto possuem comportamento semelhantes, os quais exponencialmente se diferenciam ao mudar para um revestimento laterítico, mas que volta a apresentar certa homogeneidade em comparação com os revestimentos em gabião ou em solo natural. Quantitativamente, observa-se que a variação da velocidade só é significativa até o ponto 0,0833 m no eixo Z e 0,0544 m no eixo Y, observando-se, para o eixo Z, uma variação no centro do escoamento de apenas 0,0045 m/s de velocidade, e, para o eixo Y, de apenas 0,0033 m/s. Sendo assim, conclui-se que as técnicas de CFD se justificaram como uma boa ferramenta para auxiliar nos estudos de fenômenos hidráulicos,

obtendo resultados dentro de uma física coerente com os modelos equacionais definidos, bem como se apresentou harmônico com demais estudos realizados na mesma área.

Palavras-chave: perfis isotáquicos; drenagem urbana; revestimento de calhas fluviais.

ABSTRACT

Until the end of the 20th century, the concept of urban drainage was limited to the simple management of precipitation, seeking only to reduce locally the impacts generated by floods. In the 21st century, this management started to encompass several areas, adopting a position that evolved from being merely corrective but began to encompass the premises of sustainability and coexistence in tune with nature, understanding that the Projects must reconcile with water ecosystems. In this sense, channel designs can still evolve and better incorporate such concepts, especially in terms of understanding the impact of the roughness coefficient in a three-dimensional view of the flow. At the same time, it was found that computational numerical calculation techniques that involve the use of Computational Fluids Dynamics (CFD) are very common in the literature for analyzing phenomena of hydraulic structures and free surfaces. Within this perspective, this work aims to deepen knowledge regarding the formation of velocity profiles, for different roughness, in an open channel with a small slope, using as a basis the prototype channel existing in the Hydraulics, Computational Hydraulics and Hydrology Laboratory at UFPE. An experimental test was carried out to obtain the boundary conditions of the modeled computational domain, as well as a CFD simulation project under the most current best practices in the literature. To do the verification, mesh and time step tests were carried out, in addition to observing excellent behavior of the scalars as expected from the assigned equational models. The results found were satisfactory, observing qualitatively, that the isotactic profiles behaved as expected, mainly when correlating the different materials with the graph that represents the relationship between Manning's coefficient and Nikuradse's sand equivalent roughness. It was verified that acrylic and concrete coatings have similar behavior, which differ exponentially when changing to a laterite coating, but which once again presents a certain homogeneity compared to gabion or natural soil coatings. Quantitatively, it was observed that the variation in velocity is only significant up to the point 0.0833 m on the Z axis and 0.0544 m on the Y axis, observing, for the Z axis, a variation in the center of the flow of 0.0045 m/s of velocity, and, for the Y axis, of 0.0033 m/s. Therefore, it is concluded that CFD techniques were justified as a good tool to assist in the studies of hydraulic phenomena, obtaining results within a physics coherent with the defined equational models, as well as being harmonious with other studies carried out in the same area.

Keywords: isotactic profiles; urban drainage; lining of river channels.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Curvas Isotáquicas em Seção Transversal de Diferentes Canais	31
Figura 2 – Diagrama de Variação da Velocidade em Perfil Longitudinal	31
Figura 3 – Curvas do C_{rough} relacionando-se com os Coeficientes de Manning e Nikuradse ..	34
Figura 4 – Exemplo de Malha Estruturada (a), Não Estruturada (b) e Híbrida (c)	39
Figura 5 – Cálculo do <i>Aspect Ratio</i> para Quadriláteros	43
Figura 6 – <i>Aspect Ratio</i> para Quadriláteros	43
Figura 7 – Cálculo por meio de Áreas Proporcionais do <i>Aspect Ratio</i>	44
Figura 8 – Triângulos e Quadriláteros Ideais x Assimétricos	44
Figura 9 – Modelo para Definição do Método <i>Equilateral Volume Deviation</i>	45
Figura 10 – Modelo para Definição do Método <i>Normalized Angle Deviation</i>	46
Figura 11 – Espectro de Métricas de Qualidade de Malha para <i>Skewness</i>	46
Figura 12 – Vetores utilizados para calcular o <i>Orthogonal Quality</i> de uma Célula, à esquerda, e de uma Face, à direita	47
Figura 13 – Espectro de Métricas de Qualidade de Malha para <i>Orthogonal Quality</i>	48
Figura 14 – Número de Froude em função da declividade do canal	61
Figura 15 – Correlação entre o K_2 adimensional (modelado e experimental) para os modelos matemáticos 1 e 2	63
Figura 16 – Instalação do canal experimental (vista lateral)	63
Figura 17 – Validação da proposta de lei por Bonakdari <i>et al.</i> (2008) a partir de dados experimentais em canal circular	64
Figura 18 – Correlação entre o Coeficiente de Manning e o Número de Froude por Abdullah <i>et al.</i> (2023)	65
Figura 19 – Diagramas e <i>streamlines</i> de velocidade dos micro canais com rugosidades relativas r de 0%, 1%, 3% e 5% - (a) $r = 0$; (b) $r = 1\%$; (c) $r = 3\%$; (d) $r = 5\%$..	69
Figura 20 – Comparação dos resultados experimentais de Tominaga <i>et al.</i> (1989) com os resultados numéricos de Bonakdari <i>et al.</i> (2014)	69
Figura 21 - Desenvolvimento da Velocidade ao longo do Canal de Ghani <i>et al.</i> (2014)	70
Figura 22 – Comparação entre os campos de velocidade interpolado das medidas e os valores calculados pelo HEC-RAS, etapa de validação ($TR = 5$ anos)	71
Figura 23 – Diagrama de velocidade da água	72

Figura 24 – Localização do Laboratório de Hidráulica, Hidráulica Computacional e Hidrologia.....	73
Figura 25 – Esquemático em 3D do Canal Experimental da UFPE.....	74
Figura 26 – Canal de acrílico presente no Laboratório de Hidráulica do Departamento de Engenharia Civil e Ambiental UFPE, campus Recife.....	75
Figura 27 – Reservatório subterrâneo do Laboratório de Hidráulica da UFPE, alimentador do canal	76
Figura 28 – Bomba utilizada no experimento para recalcar água até o canal	77
Figura 29 – Vertedouro Triangular.....	78
Figura 30 – Vertedor Triangular de Chapa Metálica para Medição de Vazão.....	79
Figura 31 – Croqui Esquemático do Método Utilizado para Medição de Vazão do Canal	80
Figura 32 – Geometria em 3D criada no DesignModeler™	81
Figura 33 – Malha 1	84
Figura 34 – Malha 2	84
Figura 35 – Malha 3	85
Figura 36 – Malha 4	85
Figura 37 – Malha 5	86
Figura 38 – Malha 6	86
Figura 39 – Croqui Esquemático das Condições de Contorno, em $t = 0$	89
Figura 40 – Condições de Contorno no ANSYS Fluent™.....	89
Figura 41 – Pontos para Monitoramento do Teste de <i>Time Step</i>	91
Figura 42 – Condições de Parede - em Branco, <i>Wall</i> de fundo, em Cinza, <i>Walls</i> laterais.....	92
Figura 43 – Gráfico do Comportamento da Relação $n \times k_s$	93
Figura 44 – Monitoramento de Convergência Numérica	95
Figura 45 – Monitoramento de Divergência Numérica, com Resíduos $> 1e-01$	95
Figura 46 – Definição do Tempo Real de Simulação.....	98
Figura 47 – Variação de Velocidade no Ponto 1	99
Figura 48 – Variação de Velocidade no Ponto 2	99
Figura 49 – Variação de Velocidade no Ponto 3	100
Figura 50 – Variação de Velocidade no Ponto 4	100
Figura 51 – Variação de Velocidade no Ponto 5	101
Figura 52 – Variação de Velocidade no Ponto 6	101
Figura 53 – Variação de Velocidade no Ponto 7	102

Figura 54 – Teste de Malha para os Perfis de Velocidade no Plano ZX.....	103
Figura 55 – Erro Padrão a partir da Malha de 254.015 Elementos, no Plano ZX.....	104
Figura 56 – Teste de Malha para o Diagrama Vertical de Velocidades	105
Figura 57 – Erro Padrão a partir da Malha de 254.015 Elementos, no Diagrama Vertical de Velocidades	106
Figura 58 – Visão Geral da Malha com 254.015 elementos	106
Figura 59 – Detalhamento da Malha com 254.015 elementos no Plano XY	107
Figura 60 – Detalhamento da Malha com 254.015 elementos no Plano ZX.....	107
Figura 61 – Linha para Verificação do Desenvolvimento do Pleno Escoamento	109
Figura 62 – Gráfico para Verificação do Desenvolvimento do Pleno Escoamento	109
Figura 63 – Linha para Verificação da Fração Volumétrica da Água.....	111
Figura 64 – Gráfico para Verificação da Fração Volumétrica da Água.....	111
Figura 65 – Linha para Verificação do Perfil de Velocidade no Plano ZX.....	113
Figura 66 – Gráfico para Verificação do Perfil de Velocidade no Plano ZX.....	113
Figura 67 – Fração Volumétrica Global da Água.....	114
Figura 68 – Detalhamento da Fração Volumétrica Global da Água	114
Figura 69 – Relação entre a Pressão Relativa e a Perda de Carga por Bernoulli	116
Figura 70 – Pressão Relativa Global do Modelo	117
Figura 71 – Detalhamento da Pressão Relativa Global do Modelo.....	117
Figura 72 – Comportamento do Fluxo de Massa Global da Água	118
Figura 73 – Detalhamento do Comportamento do Fluxo de Massa Global da Água.....	118
Figura 74 – Comportamento da Velocidade Global do Escoamento	119
Figura 75 – Detalhamento do Comportamento da Velocidade Global do Escoamento	119
Figura 76 – Detalhamento do Comportamento da Velocidade Local do Escoamento para Revestimento em Acrílico	120
Figura 77 – Escalares de Fração Volumétrica x Velocidade x Pressão Relativa no Plano YZ	121
Figura 78 – Escalares de Fração Volumétrica x Velocidade x Pressão Relativa no Plano XY	121
Figura 79 – Escalares de Fração Volumétrica x Pressão Relativa x Velocidade no Plano ZX	121
Figura 80 – Perfis Isotáquicos para Diferentes Condições de Parede	122
Figura 81 – Diagrama Vertical de Velocidade para Diferentes Condições de Parede	123

Figura 82 – Perfil de Velocidade no Plano ZX para Diferentes Condições de Parede	123
Figura 83 – Gráfico do Perfil de Velocidade para Diferentes Rugosidades no Plano ZX	124
Figura 84 – Variações de Velocidade para Diferentes Pontos e Rugosidades no Eixo Z	125
Figura 85 – Gráfico do Diagrama de Velocidade para Diferentes Rugosidades no Plano XY	126
Figura 86 – Variações de Velocidade para Diferentes Pontos e Rugosidades no Eixo Y	127
Figura 87 – Erro Padrão a partir do Perfil de Velocidade do Revestimento Natural em Comparação ao Acrílico no Plano ZX	128
Figura 88 – Erro Padrão a partir do Diagrama Vertical de Velocidade do Revestimento Natural em Comparação ao Acrílico	129
Figura 89 – Comparação dos Escalares de Fração Volumétrica - Velocidade - Pressão Relativa no Plano YZ para Acrílico (superior) e Revestimento Natural (inferior)	129
Figura 90 – Detalhamento do Comportamento da Velocidade Local do Escoamento para Revestimento Natural	130

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Propriedades da Água para Forças Viscosas	32
Tabela 2 – Indicadores Propostos por Cardoso (2008).....	61
Tabela 3 – <i>Hardware</i> utilizado para as Simulações	74
Tabela 4 – Características da Motobomba do Sistema Experimental	76
Tabela 5 – Características das Malhas.....	82
Tabela 6 – Parâmetros de Qualidade da Malha	83
Tabela 7 – Propriedades dos Materiais utilizados no Fluent TM	87
Tabela 8 – Proposta de Teste de <i>Time Step</i> para Diferentes Números de Courant	90
Tabela 9 – Coordenadas Cartesianas dos Pontos Definidos para o Teste de <i>Time Step</i>	90
Tabela 10 – Rugosidade de Manning e Nikuradse para Diferentes Materiais Modelados.....	92
Tabela 11 – Métodos Numéricos para Solução dos Modelos Equacionais	93
Tabela 12 – Critérios de Parada para Convergência Numérica, conforme padrão do ANSYS Fluent TM	94
Tabela 13 – Erro Padrão Encontrado para Definição do Tempo Real de Simulação.....	97
Tabela 14 – Erro Padrão para cada Número de Courant em cada Ponto, para $t = 24s$	102
Tabela 15 – Teste de Malha para as Velocidade no Plano ZX, para $t = 24s$	103
Tabela 16 – Teste de Malha para as Velocidades no Plano XY	105
Tabela 17 – Coordenadas Cartesianas das Linhas de Verificação do Modelo	108
Tabela 18 – Valores de Velocidade para Diferentes Pontos no Eixo X.....	110
Tabela 19 – Valores de Fração Volumétrica para Diferentes Pontos no Eixo Y	110
Tabela 20 – Valores de Velocidade para Diferentes Pontos no Eixo Z	112
Tabela 21 – Verificação do Modelo com a Comparação entre a Pressão Relativa x Perda de Carga por Bernoulli	115
Tabela 22 – Valores de Velocidade para Diferentes Rugosidades no Eixo Z.....	124
Tabela 23 – Valores de Velocidade para Diferentes Rugosidades no Eixo Y	126
Tabela 24 – Variação Percentual entre Rugosidade de Parede de Acrílico e em Revestimento Natural, no Eixo Z	127
Tabela 25 – Variação Percentual entre Rugosidade de Parede de Acrílico e em Revestimento Natural, no Eixo Y	128

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
1.1	OBJETIVO GERAL.....	21
1.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	21
2	DRENAGEM URBANA E CANAIS DE MACRODRENAGEM	22
2.1	HISTÓRICO DA DRENAGEM URBANA	22
2.1.1	Drenagem urbana pré-higienista	22
2.1.2	Drenagem urbana tradicional (higienista)	23
2.1.3	Drenagem urbana corretiva	24
2.1.4	Drenagem urbana sustentável.....	24
2.1.5	Drenagem urbana em sintonia com a natureza	25
2.2	TERMINOLOGIAS, DEFINIÇÕES E CONCEITOS	26
2.2.1	Macro e Microdrenagem	26
2.2.2	Introdução à Hidráulica de Canais.....	27
2.2.2.1	Canais em solo ou revestidos	28
2.2.2.2	Cálculo da Capacidade do Canal e os Diagramas de Velocidade Horizontal e Vertical de Seções Transversais	29
2.2.2.3	Os Coeficientes de Rugosidade de Manning e Nikuradse	33
3	MODELAGEM NUMÉRICA EM CFD	35
3.1	INTRODUÇÃO AO CFD	35
3.2	GEOMETRIA	37
3.3	MALHA	38
3.3.1	MultiZone Method Control	40
3.3.2	Sizing.....	41
3.3.3	Inflation	41
3.3.4	Qualidade da Malha	42

3.3.4.1	Aspect Ratio	42
3.3.4.2	Skewness	44
3.3.4.3	Orthogonal Quality	46
3.4	PRÉ-PROCESSAMENTO	48
3.4.1	Introdução ao ANSYS Fluent™	48
3.4.2	Introdução ao Escoamento Multifásico	49
3.4.3	Introdução a Modelagem de Acoplamento Euler-Euler	50
3.4.4	Mixture Model	51
3.4.5	Eulerian Model	52
3.4.6	Volume of Fluids (VoF)	53
3.4.6.1	Modelagem com Open Channel	55
3.4.7	Modelo k-ω padrão	55
3.4.8	Modelo Baseline (BSL) k-ω	56
3.4.9	Modelo Shear-Stress Transport (SST) k-ω	57
3.4.10	Modelo Transition SST	57
3.4.11	Wall	58
3.5	PROCESSAMENTO	59
3.6	PÓS-PROCESSAMENTO	59
3.7	ESTADO DA ARTE DE CANAIS HIDRÁULICOS	60
3.8	ESTADO DA ARTE DE CFD	65
4	MATERIAIS E MÉTODOS	73
4.1	ENSAIO EXPERIMENTAL	75
4.1.1	Sistema de Alimentação do Canal de Acrílico	75
4.1.2	Sistema de Mudança de Declividade do Canal de Acrílico	77
4.1.3	Dispositivo Medidor de Vazão	78
4.2	MODELAGEM NUMÉRICA	80

4.2.1	Criação de Geometria	80
4.2.2	Geração da Malha	82
4.2.3	Elaboração do Pré-processamento.....	87
4.2.3.1	Modelagem de Diferentes Rugosidades nas Paredes	91
4.2.4	Definição e Monitoramento do Processamento	93
4.2.5	Análise do Pós-processamento	95
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	97
5.1	VALIDAÇÃO DE INDEPENDÊNCIA DE <i>TIME STEP</i>	97
5.2	VALIDAÇÃO DE INDEPENDÊNCIA DE MALHA.....	103
5.3	VERIFICAÇÃO DO MODELO	108
5.4	ANÁLISE QUANTI-QUALITATIVA PARA DIFERENTES RUGOSIDADES ..	121
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	131
6.1	CONCLUSÕES.....	131
6.2	DIFICULDADES ENCONTRADAS	133
6.3	PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS.....	133
	REFERÊNCIAS	135

1 INTRODUÇÃO

Até princípios da década de 1970, o conceito fundamental da drenagem urbana era bem distante do entendimento atual (Tucci, 2003). Segundo Urbonas e Stahre (1993), a drenagem urbana se resumia à capacidade de escoar a água que foi precipitada da forma mais rápida possível, enviando-a de forma imediata a jusante (Christofidis *et al.*, 2019).

No Brasil, este fundamento durou até 1990, o qual foi responsável por gerar a elevação do pico de cheias nos cursos de água e impactar diretamente na diminuição do tempo de concentração. Essas características agravam a situação das cidades, das águas e dos cidadãos (Christofidis *et al.*, 2019). Além disso, tal princípio também acarretou custos insustentáveis para resolução de suas deficiências, já que o investimento para amortecer o pico dos hidrogramas e diminuir a vazão máxima para jusante através de uma detenção pode chegar a ser dez vezes menor (Tucci, 2003). Dentre as consequências imediatas de projetos baseados neste conceito, pode-se observar o aumento das inundações a jusante devido à canalização. Ao passo em que a precipitação ocorre e a água não é infiltrada, um aumento de volume de até seis vezes pode escoar pelos condutos (Tucci, 2000).

Adiante, a partir da mudança destes paradigmas na América do Norte, passaram-se a utilizar as chamadas *Best Management Practices* (BMPs), ou Melhores Práticas de Gestão de Águas Pluviais em tradução livre (Garrido Neto *et al.*, 2018). Estas foram calcadas, de acordo com Andoh e Declerk (1999), na adoção de dispositivos de drenagem que permitissem que a água voltasse ao meio ambiente através da recuperação de processos naturais, como a infiltração e percolação, de forma a mitigar, principalmente, os impactos diretos da chuva na superfície de captação, normalmente encontradas a montante das redes da drenagem urbana.

Em mudanças recentes, o paradigma da drenagem urbana evoluiu. Já no século XXI, o manejo das águas pluviais urbanas passou a dever estar intrinsecamente em sintonia com a natureza, não podendo coexistir sem estar alinhado com superação e reconciliação com os ecossistemas hídricos (Christofidis *et al.*, 2019).

Assim, o ser humano é incentivado a respeitar e a estar em harmonia com os solos, relevo, fauna, flora, com os ciclos das águas e a dinâmica hídrica, concretizando-se um profundo apreço à dinâmica dos ambientes, aos percursos preparados pelo meio natural, constituindo-se de modo que o ecossistema, em sua forma natural, realize a drenagem (Christofidis *et al.*, 2019).

Com isso, observando-se a situação em que os corpos hídricos urbanos se encontram, devem-se agilizar e expandir os propósitos de reabilitação, renaturalização, revitalização, restauração, despoluição, revisão, remediação, reconhecimento e reidentificação de cursos d'água que perderam suas características, tornando-se verdadeiros condutos de resíduos (Christofidis *et al.*, 2019).

Para o foco deste trabalho, um dos elementos integrantes da drenagem urbana se destaca: os canais de macrodrenagem. Esses canais têm a função de captar e escoar o excedente advindo dos dispositivos de microdrenagem, como são as galerias e outros elementos, que drenam e conduzem a água das chuvas das ruas, avenidas, lotes e quarteirões (Luna, 2013).

Esses canais podem possuir revestimento natural ou artificial. Dentre as inúmeras diferenças que estas configurações possuem entre si, a distribuição de velocidade em suas curvas isotáquicas é de especial interesse e sofre grande influência de seu coeficiente de rugosidade, muitas vezes representado pelo coeficiente de Manning, n , já que este dita a resistência do fundo e das paredes à inércia do escoamento (Mendes, 2013). As curvas isotáquicas representam graficamente o lugar geométrico da seção transversal onde o escoamento da água possui a mesma velocidade. São fundamentais para analisar o comportamento do escoamento em canais, permitindo visualizar a variação de velocidade por toda a seção transversal.

Assim como os conceitos de drenagem se modificaram com o tempo, os preceitos para dimensionamento e projeto destes canais também se alteraram. Na fase higienista, a canalização e retificação dos cursos de água foram abrangentes por todo o país. Posteriormente, o enfoque ambiental ganhou força, admitindo-se soluções alternativas e complementares à acelerada evacuação das águas pluviais, principalmente visando a preservação dos corpos hídricos (Silveira, 2002; Baptista *et al.*, 2005; Cardoso, 2008).

Já no final do século XX, muitos profissionais da engenharia chegavam à conclusão de que as características naturais dos rios, como vegetação marginal, meandros, leitos de inundação etc., contribuem positivamente para a estabilidade dos canais. Assim, notaram que é necessário que tais características devam, ao menos, estar contidas de forma mais enfática nos projetos de intervenção (Riley, 1998 apud Cardoso, 2008).

Cardoso (2008) abordou que são necessárias mudanças nas premissas de projetos de intervenção em cursos de água, principalmente quanto à sua impermeabilização, invertendo a tendência tradicional de isolamento e supressão das águas superficiais da paisagem urbana, as quais têm impacto direto na transferência dos problemas de enchente e poluição para jusante

da bacia. Essa inversão também poderá minorar os impactos hidrológicos e ambientais, com significativos ganhos para a qualidade do meio ambiente e da vida da população.

Em trabalhos mais recentes, como na publicação realizada por Carvalho *et al.* (2017), é possível observar diretamente que ações de revestimento e retificação de canais não modificam somente a rugosidade e o perfil de velocidade, mas têm impactos severos na geometria da calha do rio e na planície de inundação. Dessa forma, é possível identificar o desencadeamento de mudanças nos padrões da drenagem superficial, reduzindo o comprimento do canal, diminuindo a rugosidade do leito e aumentando o gradiente dos escalares de velocidade. Assim, há também o aumento da vazão e do pico do escoamento, principalmente a jusante de trechos retificados e impermeabilizados, os quais também sofrem com a atenuação severa do processo de infiltração das águas pluviais.

Dentro dessa perspectiva, novas ferramentas podem ser utilizadas para colaborar no avanço dos conceitos estabelecidos por Carvalho *et al.* (2017) e por Christofidis *et al.* (2019). A partir daí, o *Computational Fluids Dynamics* (CFD), assim como dissertado por Couto (2019), atua como uma das principais e mais atuais alternativas de ferramenta computacional do mercado. O CFD emerge graças a sua eficiência e plenas capacidades de trazer novos cenários para a dinâmica dos fluidos, além dos limitados experimentalmente.

O CFD surgiu na indústria aeroespacial, na década de 1970. Atualmente, integra-se nas mais diversas áreas de conhecimento em uma abordagem multidisciplinar, envolvendo as disciplinas de Mecânica dos Fluidos, Cálculo Numérico e Transferência de Calor (Versteeg; Malalasekera, 2007). Essa ferramenta tem como princípio a resolução, de forma numérica, das Equações de Navier-Stokes dentro de volumes de controles onde são aplicados o Método de Volumes Finitos (MVF).

Em acordo com os preceitos trabalhados por Couto (2019) e com a problemática supra estabelecida, o trabalho de Silva *et al.* (2023) estabelece a utilização de uma modelagem tridimensional em CFD de um modelo reduzido do reservatório PCH Salto Paraobepa. Neste estudo, que tinha por objetivo propor a utilização do CFD para reproduzir e avaliar os fenômenos hidrodinâmicos e de transporte dos sedimentos num reservatório a fio d'água no município de Jeceaba – MG, os autores conseguiram excelentes resultados que expressam escalares de velocidade, principalmente nas seções transversais e sua relação com os dados experimentais advindos de um *Acoustic Doppler velocimetry* (ADV), ou Velocímetro Acústico Doppler, em tradução livre.

Com isso, a hipótese verificada foi de que, com a aplicação de técnicas CFD, é possível obter escalares mais precisos nos estudos de entendimento dos impactos da variação de diferentes coeficientes de rugosidade de Manning nos perfis isotáquicos de velocidade nas seções transversais e longitudinais dos canais de macrodrenagem.

O corpo do texto deste trabalho é composto por 6 capítulos. O Capítulo 1, Introdução, apresenta a problemática, caracterizando-a e demonstrando sua relevância, indicando sua justificativa e objetivo.

O Capítulo 2, Drenagem Urbana e Canais de Macrodrenagem, aborda, de forma resumida, o contexto histórico da drenagem urbana no Brasil e seus conceitos através dos anos, demonstrando suas principais adversidades e vulnerabilidades, que persistem até os dias de hoje. Além disso, também são explanados os conceitos básicos da hidráulica de canais e a importância dos coeficientes de rugosidade de Manning, n , e Nikuradse, k_s , na formação dos perfis de velocidade do escoamento.

O Capítulo 3, Modelagem Numérica em CFD, apresenta os tópicos fundamentais da utilização da ferramenta numérica, principalmente na utilização do *software* ANSYS Fluent™, aplicando-o para a representação de fenômenos hidráulicos em canais, abordando as etapas necessárias para o desenvolvimento do projeto de simulação computacional.

O Capítulo 4, Materiais e Métodos, contém a caracterização dos materiais e metodologias utilizadas nesta pesquisa. Esta seção é dividida em dois principais eixos: o primeiro é o ensaio experimental realizado na Universidade Federal de Pernambuco (UFPE) para obtenção do banco de dados que forneceram as condições de contorno para o segundo eixo, o qual compreende a simulação numérica e os testes realizados para calibração, verificação e independência do modelo físico.

O Capítulo 5 apresenta os resultados das simulações e a discussão acerca da sua consonância com o canal experimental, além de confrontá-lo com diferentes configurações de paredes rugosas hipotéticas.

Por fim, o Capítulo 6 discorre sobre as conclusões e as contribuições deste trabalho para a academia e para o âmbito profissional. Além disso, propõe sugestões para trabalhos futuros e respectiva continuidade para a pesquisa aqui iniciada.

1.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral deste projeto foi de aprofundar o conhecimento no que tange à formação dos perfis isotáquicos e dos diagramas verticais dos escalares de velocidade de um canal experimental, para diferentes coeficientes de rugosidade de Manning, a fim de observar o efetivo impacto das condições de paredes e a sua influência em diferentes planos cartesianos.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Definir variáveis, ressaltando-se a transformação do coeficiente de Manning no coeficiente de Nikuradse, o único aceito pelo *software* aqui utilizado, além da definição e verificação do comprimento de escoamento plenamente desenvolvido;
- Analisar os escalares de velocidade nas seções transversais e longitudinais do canal experimental, além dos perfis isotáquicos gerados, confrontando a simulação computacional com a realidade;
- Propor variações hipotéticas nos materiais que compõem as paredes do canal experimental, comparando-as e compreendendo o seu impacto no escoamento.

2 DRENAGEM URBANA E CANAIS DE MACRODRENAGEM

Neste Capítulo é apresentado o histórico da evolução do conceito da drenagem urbana através dos anos. A partir disto, é realizado um paralelo entre o progresso do pensamento conceitual e de como os projetos, por vezes, não crescem em harmonia e de forma automática com os preceitos sustentáveis e baseados na natureza. Além disso, são também apresentadas as terminologias e definições importantes para o entendimento dos fenômenos hidráulicos que ocorrem em canais de drenagem.

2.1 HISTÓRICO DA DRENAGEM URBANA

O desenvolvimento urbano foi acelerado, principalmente, pela evolução populacional ocorrida na Europa entre os anos de 1800 e 1914, em que a população saltou de 180 milhões para 460 milhões de habitantes, juntamente com cerca de 100 milhões que imigraram para o continente americano (Silva *et al.*, 2019).

Com esta expansão, a concentração de população em espaços reduzidos produziu uma enorme competição por recursos naturais, como o solo e água. Tal efeito causou a destruição de uma parcela da biodiversidade, já que se trata de um meio que é vivo e dinâmico, tendo um efeito de causa e consequência interligado (Tucci, 2008).

Em contrapartida, um desenvolvimento sustentável e em sintonia com a natureza tem como objetivo melhorar a qualidade de vida da sociedade e da natureza ao seu redor, evoluindo de forma harmônica e resiliente (Tucci, 2008; Christofidis *et al.*, 2019).

Assim, o entendimento de como se deu a evolução do processo de manejo das águas com o passar do tempo é necessário. Daí, a progressão dos conceitos da drenagem urbana pode ser dividida em 5 fases, as quais são trabalhadas nas subseções a seguir.

2.1.1 Drenagem urbana pré-higienista

Para a primeira fase, Silva *et al.* (2019) relataram que se caracterizou pelos primeiros sistemas de drenagem da humanidade, os quais foram construídos dentre os anos de 3000 a 2000 a.C, pela civilização Cretense, da Ilha Creta, que se encontra entre o mar Egeu e o mar Mediterrâneo.

Daí em diante, até meados do século XX, a sociedade agrícola, que era formada de pequenos grupos ou núcleos que convergiram para as cidades modernas, possuía o hábito de conduzir o esgoto a fossas ou diretamente para a drenagem, sem coleta ou tratamento. Nesse cenário, havia uma estreita relação entre a drenagem urbana e o esgotamento das cidades, de forma que as águas pluviais eram constantemente misturadas com o esgoto, que ainda não possuía qualquer tipo de tratamento. Tal situação se agravava devido à baixa capacidade de infiltração do solo, já que, além das águas pluviais receberem contribuições diretas do esgotamento, ainda contavam com a probabilidade de um mau funcionamento dessas fossas sépticas, de forma que, com a baixa capacidade de infiltração do solo, o esgoto tendesse a escoar pelas ruas e/ou para os dispositivos de manejo pluvial (Tucci, 2012).

2.1.2 Drenagem urbana tradicional (higienista)

A famosa fase higienista da drenagem urbana tinha como maior propósito o pensamento simples de realizar o manejo das águas precipitadas, visando apenas reduzir, de forma localizada, os impactos gerados pelas cheias e inundações. O período pode ser caracterizado pelo antropocentrismo, não sendo suficiente para compreender e solucionar os desafios propiciados pelo manejo adequado das águas pluviais urbanas. Em suma, a água era tida como um obstáculo, o qual deveria ser removido da forma mais rápida possível, sem qualquer preocupação com o ciclo hidrológico ou com os impactos a jusante (Christofidis *et al.*, 2019).

Ainda nesta época, dado o seu conceito, houve uma diminuição significativa no tempo de concentração (t_c) e uma elevação considerável nos picos de cheia dos cursos d'água. Com isto, houve um sério agravamento dos problemas intersetoriais das cidades e da realidade urbana da sociedade (Tucci, 2008).

Especificamente, este período se destacou pela acentuada urbanização na realidade brasileira, em que os corpos hídricos foram retificados e canalizados, seguindo o conceito de aumento da velocidade da água precipitada e da diminuição do tempo de concentração, cedendo, ainda, os seus espaços para a construção de inúmeras vias de tráfego (Christofidis *et al.*, 2019).

2.1.3 Drenagem urbana corretiva

Para controle dos impactos gerado pelos preceitos higienistas, o início da década de 1970 foi marcado pela aprovação, nos Estados Unidos da América, da *Clean Water act*, ou Lei de água limpa em tradução livre. Essa lei definiu que todos os efluentes deveriam passar por tratamento, com a melhor tecnologia existente disponível, de forma a conseguir uma maior recuperação e conservação dos corpos hídricos (Tucci, 2008).

A partir daí, foram realizados investimentos consideráveis e amplos no tratamento do esgoto, de origem doméstica e industrial, resultando na recuperação de parte da qualidade da água dos sistemas hídricos do país (Tucci, 2008).

Já a partir deste período, verificou-se que era insustentável a construção de obras hídricas que aumentassem a velocidade do escoamento em razão da urbanização, como a retificação e canalização de corpos hídricos naturais. Assim, revisaram-se os procedimentos e foram previstos a utilização de sistemas de amortecimento ao invés da canalização. Objetivando-se reparar diretamente os erros cometidos pelos preceitos anteriores, esta fase é denominada como corretiva (Tucci, 2008).

Entretanto, ainda nesta época, verificou-se que parte da poluição, em razão das inundações urbanas e rurais, era persistente, passando-se a ser chamada de poluição de fontes difusas.

2.1.4 Drenagem urbana sustentável

Com novos problemas em vista, uma nova transformação, na década de 90, objetivou ampliar ainda mais o conhecimento acerca do manejo das águas pluviais, principalmente quanto aos seus aspectos dinâmicos, difusos e intersetoriais (Christofidis *et al.*, 2019).

Com a nova visão, objetivou-se adicionar o controle das águas pluviais na fonte com os conceitos de amortecimento de cheias, somando-se aos fenômenos de retenção e infiltração. Assim, essa fase direcionou-se a ser tornar uma alternativa para recompor o ciclo hídrico para suas condições naturais, conseguindo amenizar os problemas gerados pelos conceitos higienistas. Ainda, propiciou que ações de desenvolvimento sustentáveis pudessem ser aplicadas em larga escala. Com isso, é notável que, já nessa época, a sociedade começou a se voltar para obter uma gestão integrada entre o meio ambiente e as águas urbanas (Christofidis *et al.*, 2019).

Antes de abordar a 5ª e atual fase da drenagem urbana, o Quadro 1 apresenta um resumo das características e consequências das fases anteriores.

Quadro 1 – Fases do desenvolvimento das águas urbanas

Fase	Características	Consequências
Pré-higienista: até início do século XX	Esgoto em fossas ou na drenagem, sem coleta ou tratamento e água da fonte mais próxima, poço ou rio.	Doenças e epidemias, grande mortalidade e inundações.
Higienista: antes de 1970	Transporte de esgoto distante das pessoas e canalização do escoamento.	Redução das doenças, mas rios contaminados, impactos nas fontes de água e inundações.
Corretiva: entre 1970 e 1990	Tratamento de esgoto doméstico e industrial, amortecimento do escoamento.	Recuperação dos rios, restando poluição difusa, obras hidráulicas e impacto ambiental.
Desenvolvimento sustentável: depois de 1990	Tratamento terciário e do escoamento pluvial, novos desenvolvimentos que preservam o sistema natural.	Conservação ambiental, redução das inundações e melhoria da qualidade de vida.

Fonte: Tucci (2008).

2.1.5 Drenagem urbana em sintonia com a natureza

A 5ª e fase atual da drenagem urbana, percebida em 2018 e apresentada por Christofidis *et al.* (2019), é conhecida como Soluções baseadas na Natureza (SbN). Ela representa o ampliado conceito de conhecer e cuidar do manejo das águas urbanas juntamente com a natureza, antagonicamente à visão antropocentrista abordada na subseção 2.1.2, já que nesta fase a atuação do humano é centrada na harmonia e diálogo junto aos ecossistemas hídricos. Com isso, respeita-se a dinâmica dos ambientes urbanos e naturais, contribuindo para que, de forma natural, os ecossistemas realizem a drenagem das águas pluviais.

A impacto deste paradigma já era previsto por Tucci (2012), em que este já afirmava que o manejo e a gestão das águas pluviais deveriam alcançar metas que sinalizassem para uma melhoria da conservação ambiental e da qualidade de vida dos munícipes. Dessa forma, poderia ser assegurado um futuro resiliente e sustentável para os centros urbanos.

2.2 TERMINOLOGIAS, DEFINIÇÕES E CONCEITOS

Finalizando os conceitos para o desenvolvimento da drenagem urbana na contemporaneidade, Corrêa e Teixeira (2023) definem que a resiliência urbana é dada pela capacidade em que a cidade tem de absorver, resistir, adaptar-se e recuperar-se de ameaças e impactos. Assim, dentro deste paradigma, os centros urbanos devem ter a capacidade de produzir efeitos oportunos e eficientes, como a preservação e restauração de suas infraestruturas e funções básicas. Com isso, faz necessário que os projetistas pensem de uma nova forma ao pensar na proposição de configuração das cidades, de forma a propiciar que o ecossistema urbano contemple todos os processos naturais e antrópicos, englobando desde os fluxos de água, ar, nutrientes e poluentes, como também os processos socioculturais, de bens e fluxos de capital.

2.2.1 Macro e Microdrenagem

Voltando a trabalhar com os conceitos anteriores, é importante definir que a drenagem urbana, tratando-se do gerenciamento das águas pluviais que escoam no meio urbano, pode ser subdividida em dois grandes sistemas: (a) macrodrenagem; e (b) microdrenagem (Município de Toledo, 2017), constituindo uma rede hidrográfica própria (EMLURB, 2013).

A macrodrenagem, classificação alvo deste trabalho, tem o objetivo de receber as contribuições dos sistemas coletores que pertencem a diferentes sistemas de microdrenagem, abrangendo, assim, área superiores a 4km² ou 400ha (Município de Toledo, 2017). Ademais, ressalta-se que este sistema é imprescindível para o bom funcionamento do sistema de drenagem municipal, sendo responsável pela constituição de sua espinha dorsal. Adversidades neste sistema, principalmente devido à conceitos higienistas, podem causar inúmeros transtornos às populações urbanas de planícies e regiões mais baixas, impactando diretamente na microdrenagem (EMLURB, 2013).

Paralelamente, a microdrenagem dá-se pela composição dos sistemas de condutos pluviais, como também dos canais nos loteamentos ou na rede urbana primária (Município de Toledo, 2017). Resumindo-se, estes sistemas são tidos como de menor porte e seus problemas têm abrangência reduzida, restringindo-se ao seu imediato entorno (EMLURB, 2013).

2.2.2 Introdução à Hidráulica de Canais

Segundo Azevedo Netto *et al.* (2018), os condutos livres são estruturas sujeitas à pressão atmosférica, ao menos em um ponto de sua seção do escoamento. Também podem ser denominados como canais e geralmente apresentam uma superfície livre de água, a qual está em contato com a atmosfera.

Como exemplo destes condutos, os cursos naturais de água destacam-se. Além dos corpos hídricos, funcionam como condutos livres as galerias de água pluviais, os coletores de esgotos, as calhas, as canaletas etc. Sendo assim, considera-se canais todos os condutos que conduzem as águas em superfície livre, podendo ser com seção aberta ou fechada (Azevedo Netto *et al.*, 2018).

É necessário entender, então, que o cálculo e a compreensão dos fenômenos de escoamento em superfície livre são mais complexos que os problemas que envolvem escoamentos em condutos forçados. Tal fato pode ser entendido quando se observa que se o nível da água, numa seção transversal do escoamento, pode ser variável, então a área molhada também pode variar. Entretanto, isso pode ocorrer sem que se haja uma relação direta com a velocidade. São inúmeras as variáveis e o sistema de equações montado a partir disto adquire uma complexidade consideravelmente maior do que nos condutos em que a seção transversal é fixa (Azevedo Netto *et al.*, 2018).

A partir disto, o escoamento em superfícies livres pode ocorrer e ser classificado de diferentes óticas:

- Temporal: Se ao longo do tempo, os vetores dos escalares de velocidade não se alterarem em grandeza e direção, classifica-se como “permanente”; o oposto como “não permanente” (Azevedo Netto *et al.*, 2018);
- Espacial: Se ao longo das seções do canal e do tempo, o trecho for uniforme, com profundidade e velocidade constantes, classifica-se como “uniforme”; o oposto como “variado” (Azevedo Netto *et al.*, 2018).

Observando-se que os cálculos analíticos e as soluções empíricas por vezes não são suficientes para prever os fenômenos adequadamente, as possibilidades do uso de métodos numéricos com a utilização de técnicas computacionais vêm se destacando (Azevedo Netto *et al.*, 2018).

2.2.2.1 Canais em solo ou revestidos

Entende-se por canais revestidos aqueles em que há algum material específico realizando o papel de uma interface entre a água e o solo (de fundo, das margens, ou de ambos), a qual pode adquirir diferentes capacidades de impermeabilização. Com isso, diferentes tipos de revestimentos podem oferecer uma pior ou melhor solução a depender do caso, não existindo uma solução genérica para todas as situações (Simonds *et al.*, 2002).

Além de aspectos econômicos, é de suma importância a realização de estudos técnicos sobre o solo em questão e da interação solo-revestimento. É imprescindível entender a posição da superfície freática e sua possível interação com o solo e com o revestimento a ser utilizado. Além disso, também deverão ser consideradas as condições climáticas, construtivas, ambientais, dentre outros (Simonds *et al.*, 2002).

Vários materiais podem ser utilizados para a realização de revestimentos em canais. Dentre eles, citam-se: concreto, terra compactada, solo-cimento, membranas plásticas e mistura asfáltica (Luna, 2013).

Revestimentos em concreto são capazes de produzir uma barreira dura e com uma permeabilidade muito baixa ($0,0213\text{m}^3/\text{m}^2/24\text{h}$); podem dificultar o crescimento de plantas, além de se tornar uma barreira quase impenetrável para pequenos animais fazerem suas tocas. Porém, o concreto tem a vantagem de ser adaptável a qualquer geometria (Luna, 2013).

Sendo o principal foco deste trabalho, canais em solo, comumente chamados de canais de terra ou de solo natural, são aqueles em que a condução da água se dá na superfície da própria escavação do canal (Luna, 2013). De forma abrangente, perda de água por infiltração excessiva não é um problema comum em canais com superfície em solos com grãos médios ou finos; porém, erosão e sedimentação ainda podem ocorrer graças a outras condições (USDA, 1997). Com o início da operação de condução nesses canais, ocorre-se um pouco de erosão e sedimentação até chegar numa situação de equilíbrio, tornando-se bem estáveis a partir daí (Infante; Segerer, 2010).

Para manter a seção transversal do canal natural estável, assim como sua capacidade de condução, deve-se atentar-se as velocidades limites de escoamento, em relação à seção transversal e a declividade de fundo (Luna, 2013). A velocidade do escoamento tem um limite inferior, o qual é dado pelo valor mínimo para que não haja problemas como deposição ou sedimentação das partículas em suspensão; e um valor máximo, o qual é dado pela velocidade máxima para se evitar a erosão (Infante; Segerer, 2010).

Para que este revestimento natural se torne viável por um grande período e com o mínimo de manutenção, alguns pontos devem ser destacados (Infante; Segerer, 2010):

- Respeitar as velocidades limítrofes de escoamento, utilizando-se de critérios de erosão e sedimentação;
- Realizar escavação de forma muito precisa, respeitando-se a geometria, o alinhamento e a declividade de fundo prevista em projeto;
- Para canais de abastecimento de água e afins, preparar o solo para atingir uma estanqueidade satisfatória, com infiltração $< 0,15\text{m}^3/\text{m}^2/24\text{h}$;
- Tratar o solo visando impedir o crescimento de vegetação e realizar trabalhos de limpeza dessa vegetação quando/se necessário.

2.2.2.2 Cálculo da Capacidade do Canal e os Diagramas de Velocidade Horizontal e Vertical de Seções Transversais

No Brasil, os cálculos geralmente são feitos através da equação de Manning, a qual é baseada nas equações de Chézy e da Continuidade. Sendo assim, a capacidade do canal pode ser calculada a partir da Equação (1) (Luna, 2013).

$$v = \frac{1}{n} \times R_H^{2/3} \times I^{1/2} \quad (1)$$

Em que: v é a velocidade média, em m/s; n é o coeficiente de rugosidade de Manning, adimensional; R_H é o raio hidráulico, em m, e; I é a declividade do fundo do canal, em m/m.

Dentre outras variáveis importantes para a hidráulica dos canais, citam-se (Mendes, 2013):

- Seção transversal (S): Engloba toda a área transversal de escavação para construção do canal;
- Área molhada (A_M): Seção transversal perpendicular à direção do escoamento ocupada pela água e pode variar de acordo com a vazão de alimentação do canal;
- Perímetro molhado (P_M): Linha que limita a seção molhada junto às paredes e ao fundo do canal, não abrangendo a superfície livre;
- Largura superficial (B): Largura da superfície em contato com a atmosfera;
- Profundidade hidráulica (y_h): Razão entre a área molhada e largura superficial;

- Raio hidráulico (R_H): Relação entre área molhada e perímetro molhado.

O coeficiente de rugosidade de Manning, n , tratando-se de condutos livres, é responsável por representar as perdas de energia distribuídas e localizadas (singularidades ou acidentais) de um determinado intervalo, onde se pode majorá-los para representar as características particulares locais (Luna, 2013). Esse coeficiente tem impacto direto nos perfis de velocidade transversal e longitudinal, principalmente na formação dos curvas e perfis isotáquicos.

A velocidade adotada para o canal é dada a partir de um valor médio, já que na área molhada a velocidade varia de acordo com a posição e com a profundidade considerada. Assim, a velocidade é dada a partir de uma equação com os valores das profundidades 0,20y, 0,60y e 0,80y, conforme apresentada na Equação (2) (Azevedo Netto *et al.*, 2018):

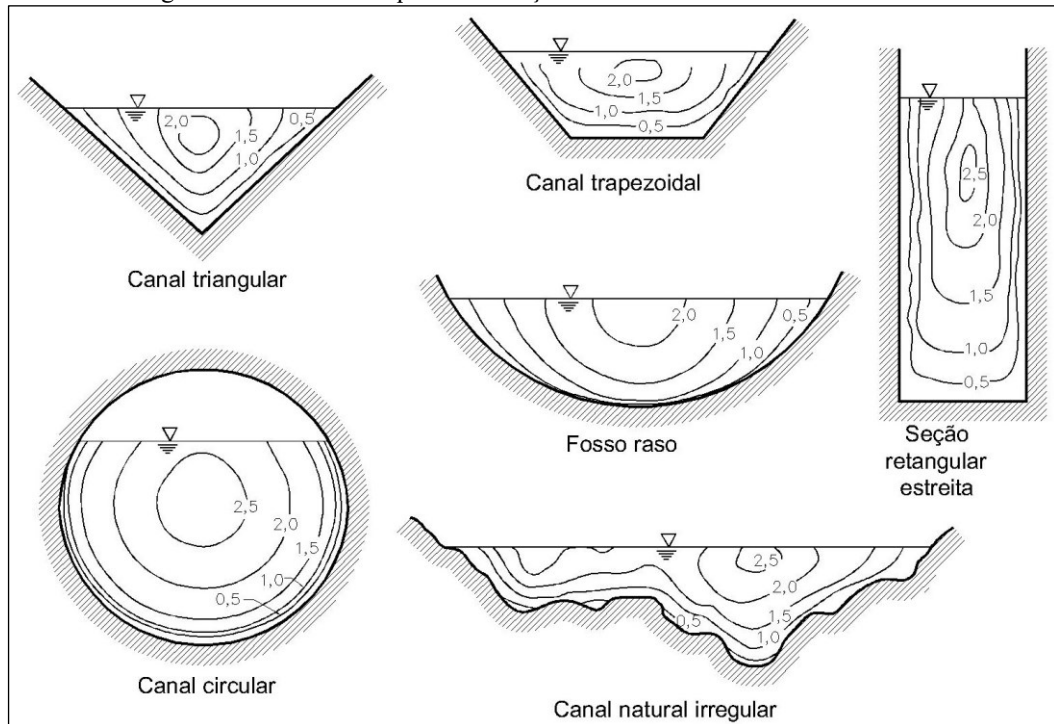
$$v_M \cong \frac{v_{0,2} + v_{0,8} + 2v_{0,6}}{4} \quad (2)$$

Em que: v_M é a velocidade média, em m/s, e; $v_{0,x}$ é a velocidade em diferentes pontos da seção, sendo x a representação da porcentagem da altura em relação solo, em m/s.

De forma geral, a determinação das várias velocidades em diferentes pontos de uma seção transversal é feita experimentalmente. As curvas isotáquicas, ou seja, o lugar geométrico de pontos de igual velocidade, são dependentes, principalmente, da resistência do fundo e das paredes; da resistência superficial da atmosfera e dos ventos; da resistência interna da viscosidade do fluido, e; da aceleração da gravidade (Mendes, 2013).

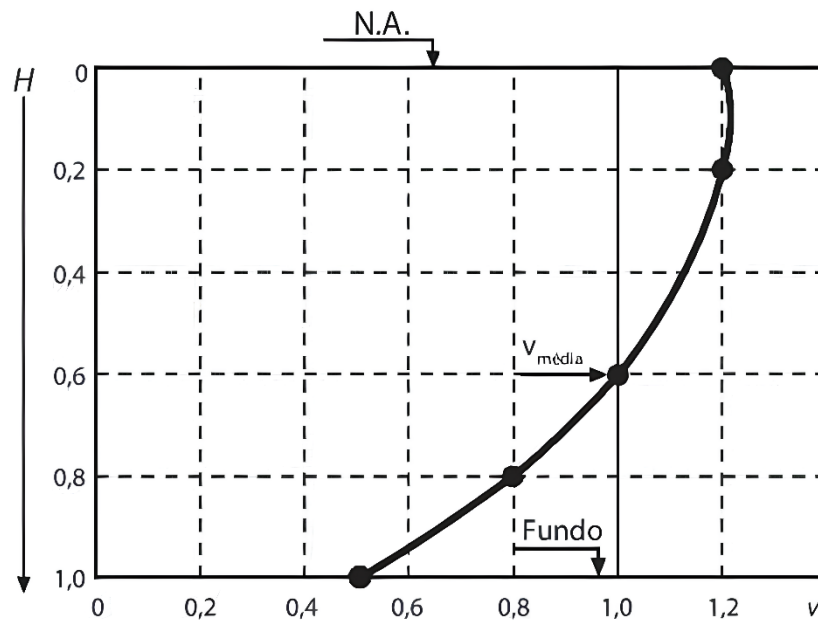
Um exemplo das curvas isotáquicas de seções transversais, em diferentes canais, pode ser observado na Figura 1. O diagrama de variação da velocidade com a profundidade de um canal, numa vertical da seção transversal, pode ser observado na Figura 2. A velocidade máxima, numa vertical da seção transversal, aparece entre os valores 0,05y e 0,25y.

Figura 1 – Curvas Isotáquicas em Seção Transversal de Diferentes Canais



Fonte: Adaptado de Mendes (2013).

Figura 2 – Diagrama de Variação da Velocidade em Perfil Longitudinal



Fonte: Azevedo Netto *et al.* (2018).

Além da velocidade, dois outros conceitos e relações de forças adimensionais são importantes para o estudo de escoamento de superfície livre de canais: Número de Froude e o Número de Reynolds.

O número de Froude é dado a partir da razão entre as forças inerciais e as forças gravitacionais, conforme pode ser observado na Equação (3) (Azevedo Netto *et al.*, 2018).

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{g \times y_h}} \quad (3)$$

Em que: V é a velocidade média na seção considerada, em m/s; g é a aceleração da gravidade, em m/s^2 ; y_h é a profundidade hidráulica, em m. Além disso, sabe-se:

- $Fr < 1$: Subcrítico, fluvial;
- $Fr = 1$: Crítico;
- $Fr > 1$: Supercrítico, torrencial.

O número de Reynolds é dado a partir da razão entre as forças inerciais e as forças viscosas, conforme pode ser observado na Equação (4) (Azevedo Netto *et al.*, 2018).

$$Rey = \frac{\rho VL}{\mu} = V \frac{R_H}{\nu} \quad (4)$$

Em que: V é a velocidade, em m/s; L é a largura da seção, em m; μ é a viscosidade dinâmica, em $N \cdot s/m^2$; ν é a viscosidade cinemática, em m^2/s ; ρ é a massa específica, em kg/m^3 . Além disso, sabe-se que, quanto à turbulência em canais de água:

- $Rey < 500$: Escoamento laminar;
- $Rey > 1000$: Escoamento turbulento;
- $500 < Rey < 1000$: Escoamento de transição.

Os valores de μ , ν e ρ adotados para água, em sua respectiva temperatura, podem ser observados na Tabela 1.

Tabela 1 – Propriedades da Água para Forças Viscosas

Temperatura $T [^{\circ}C]$	Massa Específica $\rho [kg/m^3]$	Viscosidade Dinâmica $\mu [N \cdot s/m^2]$	Viscosidade Cinemática $\nu [m^2/s]$	Tensão Superficial $\sigma [N/m]$
0	1000	1,75E-03	1,75E-06	0,0757
5	1000	1,50E-03	1,50E-06	0,0749
10	1000	1,30E-03	1,30E-06	0,0742

Temperatura T [°C]	Massa Específica ρ [kg/m³]	Viscosidade Dinâmica μ [N · s/m²]	Viscosidade Cinemática ν [m²/s]	Tensão Superficial σ [N/m]
15	999	1,14E-03	1,14E-06	0,0735
20	998	1,00E-03	1,00E-06	0,0727
25	997	8,90E-04	8,93E-07	0,0720
30	996	7,97E-04	8,01E-07	0,0712
35	994	7,18E-04	7,23E-07	0,0704
40	992	6,51E-04	6,57E-07	0,0696
45	990	5,94E-04	6,00E-07	0,0688
50	988	5,44E-04	5,51E-07	0,0679

Fonte: Adaptado de Novak (2020).

2.2.2.3 Os Coeficientes de Rugosidade de Manning e Nikuradse

Tratando-se dos estudos iniciais acerca do impacto da rugosidade em escoamentos, ainda no início do século XX, Nikuradse (1933) investigou sobre efeito dessa rugosidade em um grande intervalo do número de Reynolds para determinar as leis de resistência respectivas. Para representar a rugosidade equivalente, utilizou-se de grãos de areia, os quais foram espalhados, colados e secados num tubo de, aproximadamente, 10 (dez) centímetros de comprimento. Para os grãos de areia, utilizou-se de tamanhos uniformes e com uma granulometria controlada. A partir de seus experimentos, definiu-se, então, a grandeza da rugosidade equivalente da areia de Nikuradse, representada por k_s e dada em metro ou pés.

Um pouco mais de cinco décadas depois, em 1988, Yen (2004) conseguiu correlacionar os coeficientes de Nikuradse, de 1933, e o coeficiente de Manning, de 1889. Para realizar a correlação, Yen (2004) tornou-a válida para um canal bidimensional largo ou para um tubo axissimétrico de parede rígida impermeável, dentro de um limite de erro, ε , aceitável.

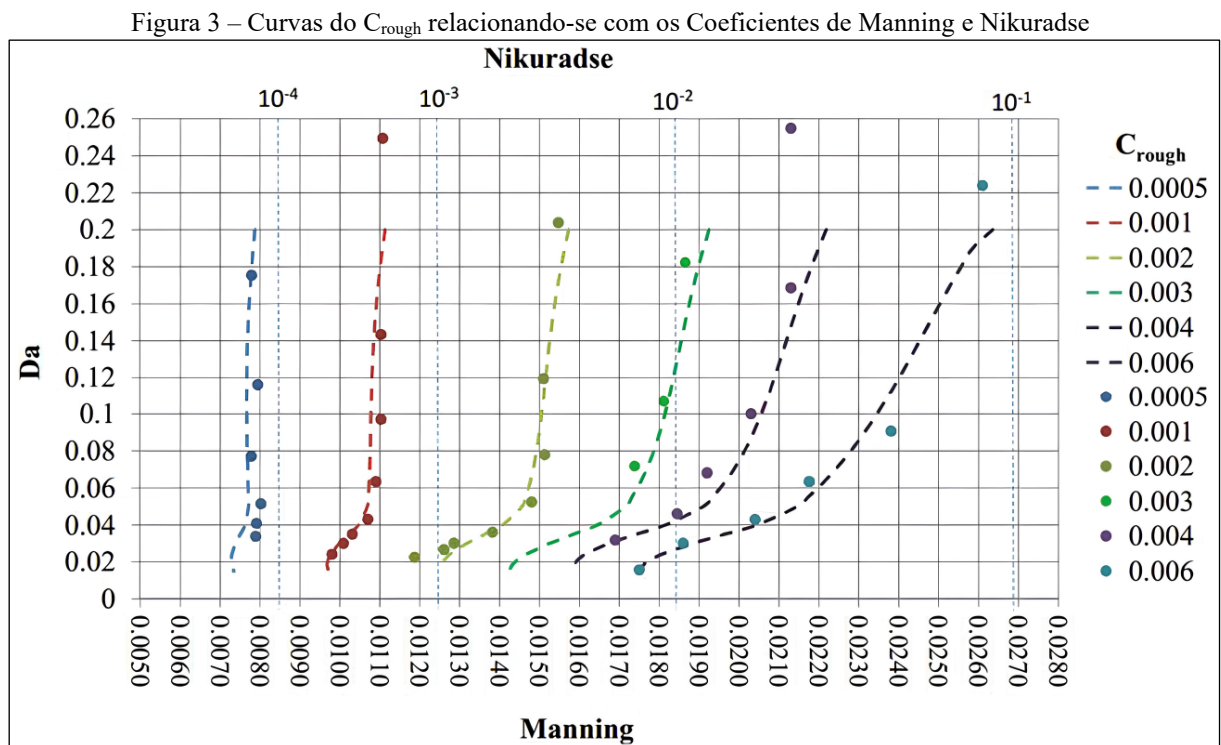
Neste caso, sem forma adicional e resistências de onda devido à geometria do canal e ao leito aluvial, a Equação (5) pode ser descrita nos termos dos dois coeficientes supracitados, pois correlaciona diretamente a fórmula modificada com a rugosidade da parede. O valor de k_s pode ser obtido a partir da Equação (5), considerando-se que o erro $\varepsilon = 0$ e onde a relação $n/k_s^{1/6}$ é mínima (Yen, 2004).

$$k_s = \left(\frac{n}{0,0389} \right)^6 \quad (5)$$

Em que: k_s é o coeficiente de Nikuradse, em m, e; n é o coeficiente de Manning, adimensional.

Posteriormente, essa formulação foi revisada e revalidada por Marriott e Jayaratne (2010), que a considerou como bem estabelecida para regiões onde o escoamento é turbulento e rugoso.

López *et al.* (2018) também estudaram a correlação e a apresentaram graficamente, adicionalmente aos parâmetros do número de discretização adimensional, Da , o qual é associado às dimensões geométricas semelhantes à rugosidade relativa (razão entre a distância interpartícula entre partículas fluidas e a altura da água), e do coeficiente de rugosidade proposto pelos autores, C_{rough} , conforme pode ser observado na Figura 3.



Fonte: Adaptado de López *et al.* (2018).

Apesar do coeficiente de Manning ser a grandeza de rugosidade comumente utilizada para dimensionamento de canais no Brasil, a correlação supra apresentada é de importância para este trabalho, já que o software utilizado, ANSYS Fluent™, não aceita o coeficiente de Manning como condição de contorno (CC) nas paredes, apenas a rugosidade equivalente da areia de Nikuradse.

3 MODELAGEM NUMÉRICA EM CFD

Neste capítulo são conceituadas as premissas gerais para entendimento e desenvolvimento de projetos que envolvam fluidodinâmica computacional (CFD), de modo especial a modelagem multifásica. Assim, são listadas as 5 etapas que envolvem o passo a passo para a modelagem em CFD, bem com as equações envolvidas. Por fim, um estudo da arte é versado para abordar as problemáticas existentes em canais hidráulicos e possíveis soluções através de ferramentas computacionais, principalmente com a utilização do ANSYS Fluent™, *software* utilizado neste trabalho.

3.1 INTRODUÇÃO AO CFD

Como brevemente explanado no Capítulo 1, as ferramentas computacionais com o uso de CFD começaram a ser criadas pela indústria aeroespacial, ainda na década de 1970. Tais estudos buscaram integrar a análise de sistemas com 3 disciplinas: Mecânica dos Fluidos, Transferência de Calor e Cálculo Numérico. Assim, a aplicação global da ferramenta deu-se através de concepção, desenvolvimento, pesquisa e, ao final, da fabricação de novas tecnologias e produtos para o consumidor final. Dessa forma, graças à sua imensa versatilidade, a utilização do CFD acarreta na capacidade de reduzir o custo e o tempo na execução de novos projetos e tecnologias, já que permite que as previsões modeladas sejam mais precisas acerca do possível comportamento de sistemas, os quais podem ser submetidos a condições extremas de funcionamento, excedendo a limites pré-estabelecidos de desempenho e segurança (Versteeg; Malalasekera, 2007).

Para integralizar e demonstrar a técnica de forma mais acessível à maior gama possível de usuários, empresas desenvolvem seus próprios *softwares* de aplicação CFD. Como tal, como abordado por Couto (2019), dentre as principais ferramentas do mercado, citam-se: OpenFOAM™, HELYX™, Star-CCM+™, FLOW-3D™, COMSOL Multiphysics™ e a ANSYS™. Esta última, a qual foi utilizada nesta dissertação, é a empresa mais representativa do mercado e mais utilizada dentro da indústria e academia, sendo responsável por conter inúmeros pacotes diferentes para soluções e modelagens em CFD, como CFX™, Fluent™, Steady-State Thermal™, IC Engine™, Transient Thermal™ e muitos outros (Couto, 2019). Nos últimos anos, novos pacotes de modelagem e novas metodologias são englobadas dentro da plataforma de trabalho, Workbench™, da ANSYS™.

Para que os cálculos de CFD sejam realizados, necessita-se discretizar o domínio computacional, espacialmente e temporalmente. Segundo Hirsch (2007), as principais métodos para tais discretização são: Diferenças Finitas, Elementos Finitos e Volumes Finitos. O primeiro método é o mais popular, o segundo é o mais utilizado para análises estruturais e o terceiro é a forma integral das leis de conservações de Navier-Stokes e trata-se de um método independente, já que possui grande flexibilidade em malhas arbitrárias (Silva, 2017).

O Método de Diferenças Finitas (MDF) baseia-se nas propriedades da expansão de Taylor e na aplicação direta da definição de derivada (Hirsch, 2007). Assim, entende-se que o MDF é o método mais simples que pode ser aplicado, particularmente para malhas uniformes, requerendo alta regularidade das malhas, podendo ser aplicado a qualquer tipo de malha, sejam ou não estruturadas.

O Método dos Elementos Finitos (MEF) advém da análise estrutural. O cerne do método envolve o trabalho de Courant publicado em 1943. A partir de 1960, o método desenvolveu-se rapidamente, reformulando-se com base em considerações energéticas variacionais, em uma forma fraca ou geral de pesos residuais (Silva, 2017). O conceito de elementos no domínio computacional pode ser adotado de uma técnica utilizada para cálculo das forças, através de uma subdivisão da estrutura em pequenas subestruturas com formas diversas, remontando a estrutura depois da análise de cada um dos elementos (Hirsch, 2007).

Por fim, o Método dos Volumes Finitos (MVF) introduziu-se de forma independente no CFD para a solução das equações de Euler que dependem do tempo, em duas dimensões. O MVF é definido como a técnica pela qual a formulação integral das leis de conservação de Navier-Stokes são discretizadas diretamente no espaço físico (Hirsch, 2007). O método se destaca por permitir a utilização de malhas arbitrárias, onde há um maior número de variações para definição dos volumes de controle.

Tratando-se das aplicações práticas do CFD, Couto (2019) resume as 5 etapas básicas para o desenvolvimento de um projeto de simulação, sendo elas:

- Criação da Geometria: Etapa destinada a criação do domínio computacional a ser estudado por meio de uma geometria simplificada do problema, em 2D ou 3D. Durante a simplificação da geometria, cuidados devem ser tomados para que o domínio seja bem representado, mas que não haja componentes desnecessários que acarretem maior custo computacional. Especificamente no CFD, apenas a área que o fluido ocupa é modelada; toda a parte estrutural não entra como componente do domínio computacional. A ANSYS™ disponibiliza dois

softwares de *Computer Aided Design* (CAD) para a elaboração desta etapa: o DesignModeler™ e o SpaceClaim™;

- **Malha:** Etapa em que o domínio computacional criado na etapa anterior é dividido em n volumes de controle para aplicação do Método de Volumes Finitos (MVF), buscando-se obter a solução das equações propostas para cada um dos volumes criados, através da interpolação ou extrapolação numérica;
- **Pré-processamento:** Etapa de suma importância em todo o projeto de simulação, já que é a etapa responsável por selecionar os modelos equacionais a serem numericamente resolvidos, definindo-se, também, as condições de contorno (CC) do fenômeno em estudo, para as quais serão observadas em diferentes escalas de espaço e tempo;
- **Processamento:** Etapa que por vezes não é abordada por todos os pesquisadores, mas é fundamental para a observação e monitoramento dos resíduos de erro do cálculo numérico selecionado, a fim de que a convergência do modelo seja melhorada e validada;
- **Pós-processamento:** Etapa final do projeto de simulação, em que os resultados obtidos são analisados e validados, seja por meio de acervos teóricos e/ou experimentais, caso disponíveis. Apesar de tida como etapa final, ressalta-se que os projetos de simulação em CFD envolvem um processo cíclico, de forma que a complexidade do modelo seja ampliada de forma gradativa, objetivando aproximar a modelagem numérica o mais próximo possível do fenômeno real.

Nas próximas seções deste Capítulo, cada uma das etapas elencadas acima é discutida, abordando a influência de cada uma no processo da elaboração de um projeto de simulação.

3.2 GEOMETRIA

A criação da geometria e, por consequência, a definição do domínio computacional é a etapa primordial de qualquer projeto de simulação computacional. Assim, modelar um domínio computacional que possua elementos muito pequenos, extremamente angulados e detalhes complexos representam um grande desafio para qualquer *software*. Dentre estes, citam-se como exemplos materiais reforçados com fibras ou partículas, favas de mel e estruturas reticuladas (ANSYS, 2021a).

A partir daí, inicia-se o processo de decisão para representação destes domínios, os quais podem ser modelados em 2D ou 3D, em corpos únicos ou múltiplos. Essa decisão pode e deve ser tomada a partir de um minucioso estudo por parte do engenheiro, o qual deve tomar como base o fenômeno a ser representado pelas equações numéricas, tendo em vista que o custo computacional para geometrias em 3D é significativamente maior do que para geometrias em 2D, mas nem sempre a complexidade e abrangência de um domínio em 3D acarreta resultados mais precisos. Essa expertise por parte dos projetistas estende-se também para a simplificação das geometrias. Como supracitado, regiões de ângulos críticos, por exemplo, podem gerar problemas escalonáveis de convergência e dos resultados encontrados (Couto, 2019).

Como ferramentas de CAD disponibilizadas, a ANSYS™ conta com dois *softwares* integrados em seu Workbench™: DesignModeler™ e SpaceClaim™.

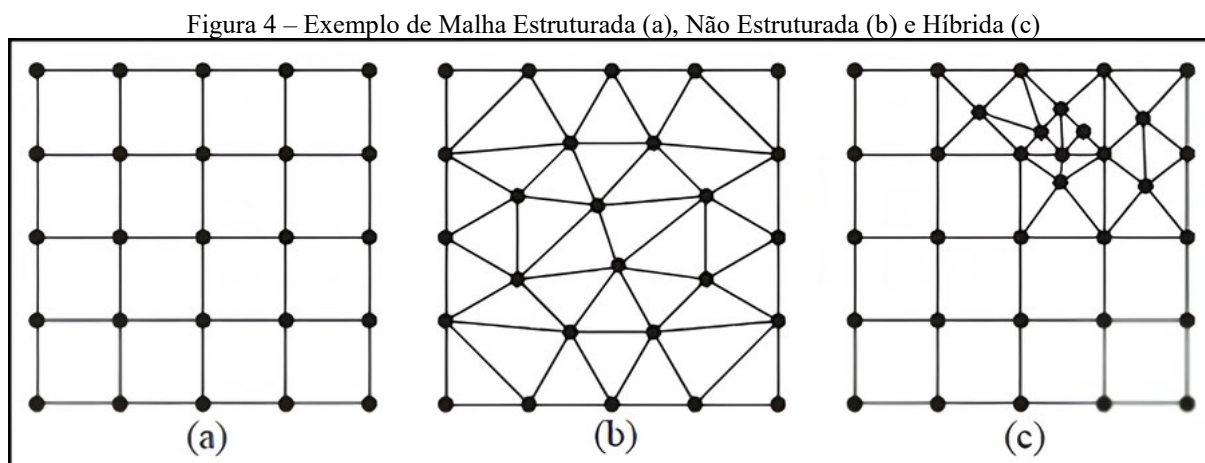
O DesignModeler™ é uma excelente ferramenta para elaboração de projetos auxiliados por computador, possuindo amplas capacidades de substituir a realização de testes experimentais onerosos e otimizar processos de reconfiguração geométrica. Em sua programação, estão previstos cálculos da propriedade de um material homogeneizado por meio das propriedades já existentes na sua base de dados. Para mais, este pacote de ferramentas ainda tem a capacidade de parametrizar as estruturas modeladas, de forma macro e micro, permitindo que o projetista determine a melhor combinação de diferentes materiais para cada aplicação individual (ANSYS, 2021a).

Criando-se a geometria e verificando-se sua coerência, faz-se necessário dividir o domínio computacional elaborado em diferentes volumes de controle, os quais servirão para a aplicação das equações de Navier-Stokes, etapa abordada na seção a seguir.

3.3 MALHA

Definindo-se o domínio computacional e as possíveis parametrizações que o usuário deseja estudar, dá-se seguimento a geração da malha computacional. Esta etapa objetiva discretizar o domínio computacional em diversos volumes de controle (Cavalcanti, 2013; Versteeg; Malalasekera, 2007). Cada volume de controle irá atuar como um subdomínio computacional, onde as equações de conservação de Navier-Stokes, a serem atribuídas na etapa do pré-processamento, serão resolvidas. A resolução destas equações poderá ocorrer através de diferentes técnicas de interpolação ou extrapolação, seja por elementos ou volumes finitos. Cavalcanti (2013) ainda acrescenta que existem diferentes tipos de malhas e a sua aplicação

dependerá do tipo e da técnica empregada em sua geração, as quais poderão ser: estruturadas uniformes e não uniformes; não estruturadas e híbridas. A Figura 4 exemplifica de forma clara os tipos diferentes de malha computacional.



Fonte: Cavalcanti (2013).

Malhas estruturadas são, principalmente, caracterizadas por possuírem o mesmo número de vizinhos em cada um dos seus elementos. Além disso, basicamente são compostas por elementos hexaédricos, sejam eles ortogonais ou não (Vieira, 2010). Com isso, malhas estruturadas exigem menor poder de processamento para serem geradas em relação as demais, de forma a atribuir uma maior intuitividade na empregabilidade dos algoritmos numéricos necessários para a solução das equações de conservação a serem aplicadas durante o processamento, contando ainda com maior celeridade no processo da interpolação, ou extrapolação, de valores (Cavalcanti, 2013).

Malhas não estruturadas, de forma sumária, são caracterizadas por possuírem formatos variados, como triângulos, prismas e tetraedros, e diferentes quantidades de vizinhos em seus elementos. Além disso, tendem a possuir um maior custo computacional que o tipo abordado anteriormente. Sua aplicabilidade destaca-se ao conseguir um melhor ajuste em geometrias mais complexas, em que os ângulos críticos e a existência de características adversas não sejam favoráveis à elementos estruturados (Vieira, 2010).

Por último, malhas híbridas são, resumidamente, caracterizadas pela mistura de ambas as malhas abordadas anteriormente (Vieira, 2010). Assim, aplicam-se malhas estruturadas em regiões onde o domínio computacional demonstre maior simplicidade. Nas regiões com presença de complexidades ou singularidades, aplicam-se as malhas não estruturadas (Couto, 2019).

Conforme apontado por Cavalcanti (2013), é notório que a qualidade do resultado em um projeto de simulação em CFD está diretamente relacionado com a estruturação e a quantidade dos volumes que compõem a malha computacional. De forma geral, infere-se que a precisão dos resultados obtidos tenderá a aumentar a partir de uma maior concentração de volumes computacionais gerados. Entretanto, Versteeg e Malalasekera (2007) destacam que uma quantidade excessiva de volumes de controle pode aumentar consideravelmente o custo computacional do projeto de simulação. A depender da convergência numérica e do hardware disponível, tal estratégia não seja interessante. Assim, é comum e desejável a prática de realização de um teste de independência de malha, em que o projetista busca uma relação de discretização do domínio computacional onde não haja interferência nos resultados, mas que seja acompanhado da menor quantidade possível de volumes gerados.

Para mais, estabelecido que a elaboração de uma malha estruturada seja o mais interessante para problemas que envolvam geometrias simples, como o objeto de estudo deste trabalho, algumas técnicas e métodos podem ser utilizadas para induzir o *software* a este comportamento de geração estruturada e de qualidade, as quais são abordadas a seguir.

3.3.1 MultiZone Method Control

O método de controle de malha multizona, em tradução livre, é capaz de fornecer uma decomposição automática da geometria em regiões mapeadas e em regiões livres. A partir da aplicação do MultiZone, todas as regiões do domínio computacional são mescladas, se possível, com uma malha estruturada hexaédrica pura (ANSYS, 2021c).

Para um uso avançado, ajustes nas configurações podem ser realizados, conforme necessidade. Em malhas mapeadas, determina-se a forma dos volumes utilizados para preencher regiões estruturadas de acordo com as seguintes opções (ANSYS, 2021c):

- Hexa: A malha é gerada tendo todos os volumes como elementos hexaédricos;
- Hexa/Prisma: A malha é gerada com elementos hexaédricos e prismáticos. A principal diferença, entre a opção Hexa/Prisma e as demais, é que, para regiões mapeadas, o método pode permitir triângulos para qualidade e transição entre as áreas estruturadas e não estruturadas da malha. Os triângulos são posteriormente extrudados em prismas;

- Prisma: A malha é gerada tendo todos os volumes como elementos prismáticos. Esta opção é útil para quando a malha de face original estiver sendo compartilhada com uma malha tetraédrica, já que as pirâmides não são necessárias para fazer a transição para a malha tetraédrica;
- Hexa Dominante: As regiões do domínio que não podem ser mescladas com uma malha mapeada são preenchidas com uma malha hexadecimal dominante.

3.3.2 Sizing

Como o nome sugere, o método *Sizing*, ou dimensionamento em tradução livre, permite a definição das dimensões dos elementos a serem gerados. Dessa forma, as seguintes opções estão disponíveis dentro do ANSYS Meshing™ (ANSYS, 2021c):

- Crescimento da malha, ou transição, entre os tamanhos dos elementos da discretização, entre grandes e pequenos, com base em uma taxa de crescimento a ser especificada pelo usuário;
- Dimensionamento baseado em curvatura, onde há um refinamento da malha baseando-se em curvas e ângulos entre os vetores normais dos elementos das malhas adjacentes, e;
- Definição do número de elementos de malha empregado na aresta de encontro entre duas faces da geometria que representa o domínio computacional (método denominado de dimensionamento baseado em proximidade).

3.3.3 Inflation

O *Inflation* é essencial para aumentar a resolução e a quantidade de elementos dentro da camada limite de um projeto com CFD.

A configuração do *inflation* determina a quantidade e a altura de cada uma das camadas. Para o método MultiZone, trabalhado acima, pode-se definir a opção de *inflation* como *Smooth Transition*, *Total Thickness* ou *First Layer Thickness* (ANSYS, 2021c).

Utilizado nesta dissertação, o *Total Thickness* é capaz de criar camadas de *inflation* constantes a partir dos valores de controles, como o Número de Camadas, a Taxa de Crescimento, para obter a espessura total, e uma Espessura Máxima. Inversamente ao *inflation*

por *Smooth Transition*, o *inflation* por *Total Thickness* estabelece que a espessura da primeira camada e das demais são constantes (ANSYS, 2021c).

Quando a *inflation* é aplicado a uma geometria em 3D (ou seja, à face de uma geometria 3D), o valor local de camadas máximas é definido, por padrão, como igual ao valor global (ANSYS, 2021c).

Após a malha computacional ser gerada, ela deve ser verificada em diferentes parâmetros de qualidade (Couto, 2019; ANSYS, 2021a). Apenas a partir daí, o projeto de simulação está pronto para receber os modelos equacionais que representem os fenômenos físicos e químicos que ocorrem no problema estudado. A seguir, são apresentados os parâmetros de qualidade utilizados na verificação do modelo utilizado no projeto deste trabalho.

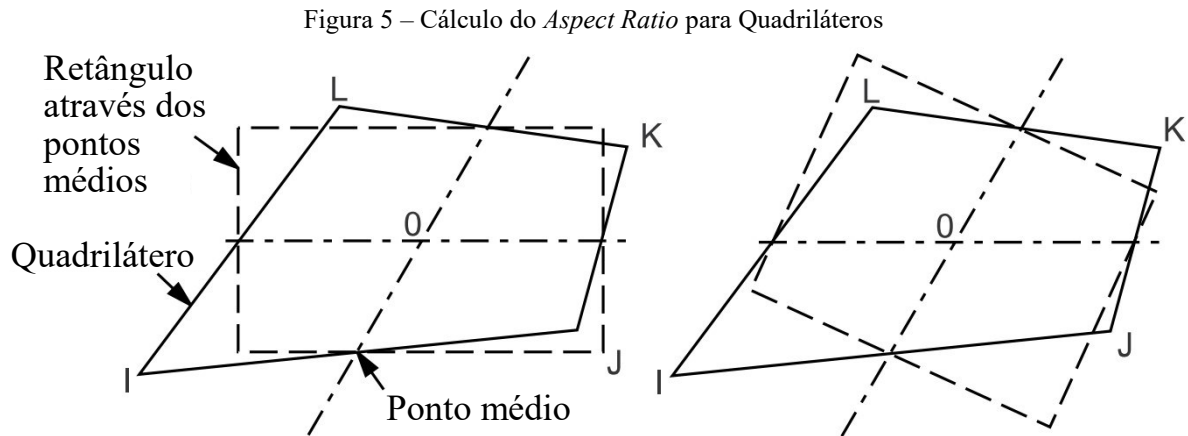
3.3.4 Qualidade da Malha

Conforme apontado por Couto (2019), após a discretização do seu domínio computacional a partir da malha, estas devem ser avaliadas quanto a sua qualidade. Para tanto, três parâmetros básicos são comumente utilizados: *Aspect Ratio*, *Skewness* e *Orthogonal Quality*. Em alguns casos, dependendo do problema físico a ser simulado, outros parâmetros podem ser utilizados para avaliação.

Segundo a própria ANSYS (2016), uma boa qualidade de malha significa que os seus critérios de qualidade estão dentro do espectro correto, por exemplo; que a malha é válida para física estudada; que a solução e os resultados encontrados independem da sua discretização, e; que os detalhes importantes da geometria estão sendo devidamente capturados pela modelagem proposta. Em contraponto, uma qualidade ruim pode causar dificuldades severas na convergência numérica; uma má descrição física, e; uma solução difusa.

3.3.4.1 Aspect Ratio

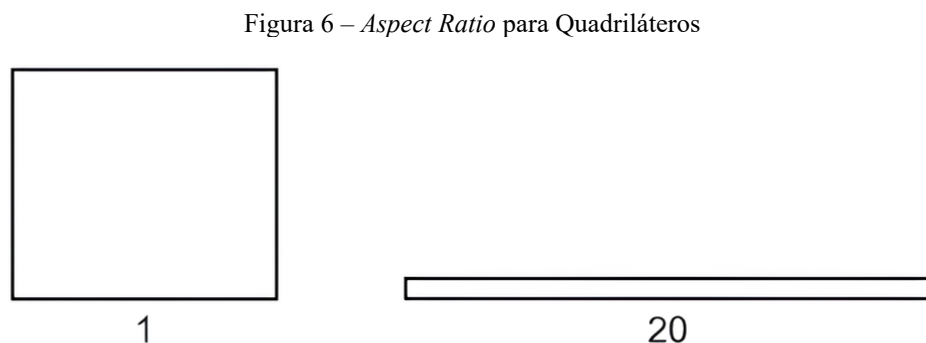
Tratando primordialmente do *Aspect Ratio*, proporção em tradução livre, a ANSYS (2021c) define que este é dado, para um quadrilátero, a partir do cálculo da relação demonstrada na Figura 5, utilizando-se dos nós de canto do elemento.



Fonte: Adaptado de ANSYS (2021c).

Caso o elemento analisado não for plano, os nós da malha são projetados em um plano que passa pela média das localizações dos vértices e é perpendicular à média dos vetores normais aos vértices (ANSYS, 2016).

Logicamente, infere-se que a melhor proporção possível de quadrilátero, para um quadrado, é um. A comparação de quadriláteros com *Aspect Ratio* de 1 e 20 é demonstrado na Figura 6.

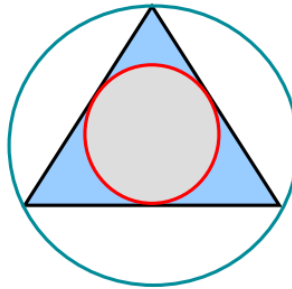


Fonte: ANSYS (2021c).

Resumindo-se, em elementos em 3D, o *Aspect Ratio* é dado pela proporção de área do elemento, ou seja, pela razão do raio do circunscrito, em azul, e do círculo inscrito, em vermelho, vistos na Figura 7. A ANSYS (2021c) recomenda as seguintes limitações para o valor adimensional de proporção:

- *Solvers* em geral < 10 ... 100;
- CFD < 1.000.

Figura 7 – Cálculo por meio de Áreas Proporcionais do *Aspect Ratio*

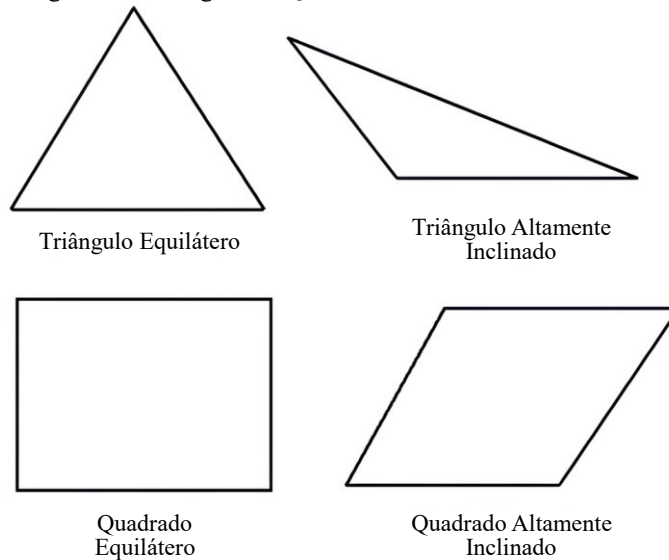


Fonte: ANSYS (2016).

3.3.4.2 Skewness

O próximo parâmetro a ser por aqui abordado, *Skewness*, assimetria em português livre, é uma das principais medidas mundialmente utilizada para aferir a qualidade de uma malha. O *Skewness* é responsável por determinar o quão próxima uma face ou célula está de um formato simétrico (equilátero ou equiangular). Essa relação pode ser observada na Figura 8.

Figura 8 – Triângulos e Quadriláteros Ideais x Assimétricos



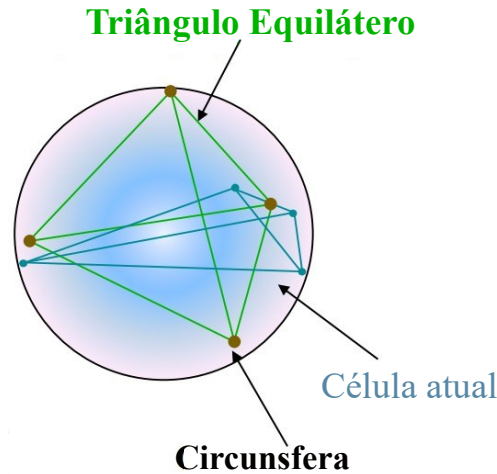
Fonte: Adaptado ANSYS (2021c).

Assim, há dois métodos para definição do *Skewness*: *Equilateral Volume Deviation* e *Normalized Angle Deviation* (ANSYS, 2016). No método *Equilateral Volume Deviation*, o *Skewness* é dado a partir da Equação (6):

$$Skewness = \frac{\text{tamanho da célula ótima} - \text{tamanho da célula atual}}{\text{tamanho da célula ótima}} \quad (6)$$

Para definição de célula ótima (equilátera ou equiangular) e célula atual, observe a Figura 9.

Figura 9 – Modelo para Definição do Método *Equilateral Volume Deviation*



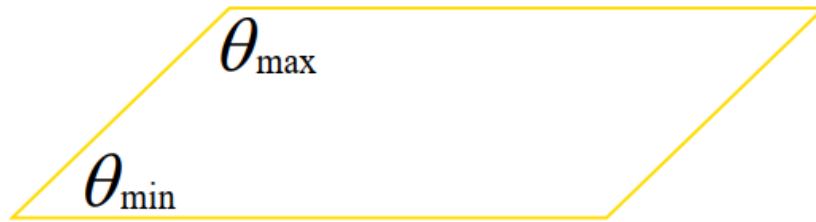
Fonte: Adaptado de ANSYS (2016).

Este método é somente aplicado para malhas com características triangulares ou tetraédricas. Na Figura 9, é possível observar que este parâmetro analisa a correlação entre célula ótima (equilátera ou equiangular) e a célula atual, ambas dentro de uma circunsfera. Quanto mais o elemento da malha for próximo da célula ótima, mais o *Skewness* tenderá a zero e, assim, melhor será a qualidade da malha. Neste caso, o inverso também é verdadeiro (COUTO, 2019).

Quanto ao método *Normalized Angle Deviation*, o *Skewness* é dado pela Equação (7):

$$Skewness = \max \times \left[\frac{\theta_{max} - \theta_e}{180 - \theta_e}, \frac{\theta_e - \theta_{min}}{\theta_e} \right] \quad (7)$$

Em que: θ_e é um ângulo equiangular das faces (60° para triângulos e tetraedros, e 90° para quadrados e hexaedros) (ANSYS, 2016); o local dos valores de θ_{max} e θ_{min} podem ser observados na Figura 10. Este método é utilizado para aplicação em malhas hexaédricas, piramidais e prismáticas, como as utilizadas neste trabalho.

Figura 10 – Modelo para Definição do Método *Normalized Angle Deviation*

Fonte: ANSYS (2016).

De acordo com a definição de *Skewness* (ANSYS, 2021c), o valor 0 indica uma célula equilátera ou equiangular (melhor cenário) e o valor 1 indica uma célula completamente assimétrica (pior cenário). As células assimétricas são caracterizadas por nós quase coplanares, em 3D, ou colineares, em 2D.

Dessa forma, entende-se que células e faces altamente assimétricas são inaceitáveis em uma malha, já que as equações que estão sendo resolvidas assumem que as células são relativamente equiláteras/equiangulares (ANSYS, 2021c).

A Figura 11 demonstra o espectro de qualidade e de valores aceitáveis para o *Skewness*.

Figura 11 – Espectro de Métricas de Qualidade de Malha para *Skewness*

Excelente	Muito bom	Bom	Aceitável	Ruim	Inaceitável
0-0,25	0,25-0,50	0,50-0,80	0,80-0,94	0,95-0,97	0,98-1,00

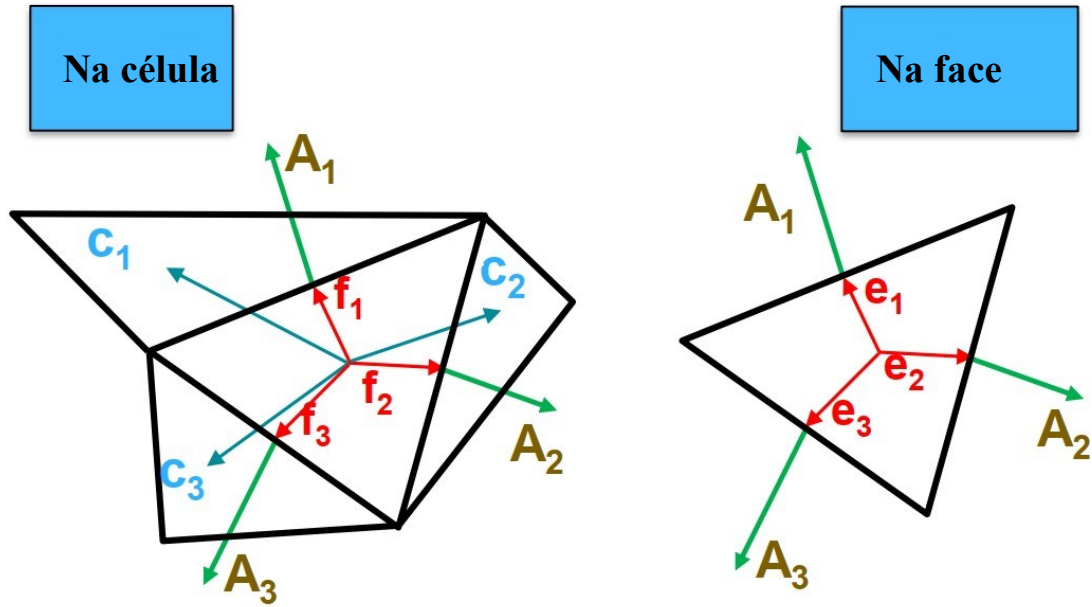
Fonte: Adaptado de ANSYS (2016).

Como pode ser observado, valores iguais ou acima de 0,95 não são recomendados em qualquer situação, sendo sempre sugerido a geração de uma nova malha.

3.3.4.3 Orthogonal Quality

Por fim, o último parâmetro que qualidade de malha a ser abordado por este trabalho é o *Orthogonal Quality*. Este parâmetro é calculado utilizando-se de um vetor normal à face, para cada face; do vetor do centroide da célula ao centroide de cada uma das células adjacentes; e, do vetor do centroide da célula para cada uma das faces (ANSYS, 2021c). A Figura 12 demonstra estes vetores supracitados.

Figura 12 – Vetores utilizados para calcular o *Orthogonal Quality* de uma Célula, à esquerda, e de uma Face, à direita



Fonte: Adaptado de ANSYS (2016).

Couto (2019) afirma que o *Orthogonal Quality* é um dos mais importantes para determinação da qualidade da malha. Alinhando-se com a Figura 12, a Equação (8) demonstra o cálculo aplicado pelo *software* para cada face de um elemento da malha.

$$Orthogonal\ Quality = \frac{A_i \cdot f_i}{|\vec{A_i}| |\vec{f_i}|} \frac{A_i \cdot c_i}{|\vec{A_i}| |\vec{c_i}|} \frac{A_i \cdot e_i}{|\vec{A_i}| |\vec{e_i}|} \quad (8)$$

Em que: A_i é o vetor normal a face do elemento; f_i é o vetor que aponta do centroide do elemento até o centroide da face; c_i é o vetor que sai do centroide do elemento e vai até o centroide do elemento adjacente, e; e_i é o vetor do centroide da face até o centroide da aresta. Para cada face, são calculados os cossenos do ângulo entre $\vec{A_i}$ e $\vec{c_i}$, e entre $\vec{A_i}$ e $\vec{f_i}$. A partir daí, o menor valor de cosseno calculado é a ortogonalidade da célula. Finalmente, o *Orthogonal Quality* depende do tipo de célula, em que, para células hexaédricas e poliédricas, o *Orthogonal Quality* é igual à ortogonalidade (ANSYS, 2021c).

Resumindo-se, de acordo com Almeida (2017), o *Orthogonal Quality* é o parâmetro de qualidade de malha calculado por meio de uma correlação algébrica entre vetores normais às faces e dos vetores que partem do centroide da célula para o centro da face. Quanto menor os

valores do *Orthogonal Quality* alcançados pela resolução da Equação (8), pior será a qualidade da malha gerada.

A Figura 11 demonstra o espectro de qualidade e de valores aceitáveis e de *Orthogonal Quality*. O intervalo é de 0 a 1, onde o valor 0 é o pior e o valor 1 é o melhor (ANSYS, 2021c).

Figura 13 – Espectro de Métricas de Qualidade de Malha para *Orthogonal Quality*



Inaceitável	Ruim	Aceitável	Bom	Muito bom	Excelente
0-0,001	0,001-0,14	0,15-0,20	0,20-0,69	0,70-0,95	0,95-1,00

Fonte: Adaptado de ANSYS (2016).

Observa-se, então, que os valores de *Orthogonal Quality* abaixo de 0,15 não são recomendados em qualquer situação, sendo sempre sugerido a geração de uma nova malha.

3.4 PRÉ-PROCESSAMENTO

Conforme abordado na introdução deste Capítulo, esta etapa é responsável por selecionar e adicionar, ao modelo geral do problema, os parâmetros de abordagem e as respectivas condições de contorno (CC). Para este trabalho, cujo objetivo é analisar o um escoamento em superfície livre, os modelos para processos multifásicos e turbulentos são os principais objetos de estudo.

Dessa forma, a próxima subseção introduz o principal pacote da ANSYS™ para modelagens multifásicas, o ANSYS Fluent™.

3.4.1 Introdução ao ANSYS Fluent™

O ANSYS Fluent™ é um software comercial, com licença estudantil e acadêmica, de simulação computacional, para utilização de técnicas de CFD de última geração, voltado para modelagens de escoamento de fluidos, transferência de calor e reações químicas em geometrias de alta complexidade. O software é escrito em linguagem C, utilizando-se de sua flexibilidade e poder computacional, tendo compatibilidade também com o C++. Assim, a alocação da memória ocorre de forma plenamente dinâmica, possibilitando uma estruturação eficiente de dados e um exímio controle das respectivas soluções numéricas (ANSYS, 2021a).

Quanto das suas capacidades na adaptação da malha computacional, o ANSYS Fluent™ suporta diferentes tipos de malhas, incluindo as 3D. Ainda, permite que o refinamento ou engrossamento desta malha seja realizado com base na solução encontrada no escoamento estudado (ANSYS, 2021a).

Para mais, enfatiza-se que a próprio ANSYS (2021a) recomenda a utilização do ANSYS DesignModeler™ e do ANSYS Meshing™ para elaboração da geometria e da malha, respectivamente, os quais foram utilizados na realização deste trabalho, conforme exposto nas seções 4.2.1 e 4.2.2, respectivamente.

A partir da definição do *software* de simulação numérica, faz necessária a escolha dos modelos equacionais que irão reger os fenômenos existentes no escoamento estudado, bem como as devidas condições de contorno do domínio computacional estabelecido. As próximas seções abordam os principais modelos utilizados na academia e que foram aplicados neste trabalho.

3.4.2 Introdução ao Escoamento Multifásico

De modo geral, os escoamentos encontrados na natureza e na tecnologia são multifásicos, ou seja, resultados da mistura de múltiplas fases. Quanto ao conceito físico, a matéria pode ser encontrada em diferentes fases, seja gasosa, líquida ou sólida. Entretanto, o conceito de um escoamento multifásico em um projeto de simulação engloba, também, outros aspectos. Dentre eles, necessita-se entender que uma fase pode ser compreendida como uma classe identificável de material, o qual possui uma resposta inercial específica. Além disso, leva-se em consideração a interação entre o escoamento e o campo potencial ao qual está imerso. Por exemplo: em partículas sólidas com diferentes tamanhos, cada agrupamento de tamanhos possuirá uma resposta dinâmica semelhante dentro do campo do escoamento, mas diferentes agrupamentos podem ser tratados como fases distintas por possuírem respostas diferentes (ANSYS, 2021a).

A partir daí, simplificando-se o entendimento, o escoamento multifásico pode ser agrupado em quatro macro categorias: fluido-fluido (englobando o acoplamento de fluidos gasoso-líquido ou líquido-líquido); gasoso-sólido; líquido-sólido; além de escoamentos trifásicos (ANSYS, 2021a).

Dessa forma, no princípio da resolução de problemas que envolvam escoamentos multifásicos, é necessário que o projetista escolha qual regime representa melhor o escoamento

a ser modelado. Dentre os regimes que representam a categoria de interação fluido-fluido, citam-se (ANSYS, 2021a):

- Escoamento borbulhante (*Bubbly*, no original): escoamento com presença de bolhas fluidas discretas em um fluido contínuo;
- Escoamento com gotículas (*Droplet*, no original): escoamento com presença de gotas fluidas discretas em um fluido contínuo;
- Escoamento em golfadas (*Slug*, no original): escoamento com presença de grandes bolhas em um fluido contínuo;
- Escoamento estratificado ou de superfície livre (*Stratified e free-surface*, no original): escoamento com presença de fluidos imiscíveis separados por uma interface claramente definida; este último, objeto de estudo desta dissertação.

Com a evolução do CFD, modelos equacionais mais complexos foram elaborados para a descrição de escoamentos multifásicos. Atualmente, duas abordagens para a representação dos escoamentos multifásicos são aplicadas no ANSYS Fluent™: Euler-Lagrange, utilizada para descrever acoplamentos que envolvam o rastreamento de particulados, ou seja, uma fase discreta, dentro de um escoamento em fluido contínuo; e Euler-Euler (ANSYS, 2021a), o qual é objeto do estudo deste trabalho e está detalhado na subseção abaixo.

3.4.3 Introdução a Modelagem de Acoplamento Euler-Euler

O acoplamento Euler-Euler é capaz de modelar diferentes fases como contínuas e interpenetrantes. Partindo-se do pressuposto que uma fase não pode ser ocupada por outras fases, ou seja, que dois corpos não podem ocupar o mesmo lugar, o conceito de fração volumétrica é abordado. Frações volumétricas são consideradas como funções contínuas de espaço-tempo e consideram que a soma das fases deve ser igual a 1 (um). Com isso, as equações de conservação para cada fase, apresentadas pelas Equações (9) e (10), são derivadas para a obtenção de um novo conjunto de equações, possuindo estruturação equiparável para todas as fases modeladas (ANSYS, 2021a).

No ANSYS Fluent™ há três modelos multifásicos que tem a capacidade de descrever o acoplamento Euler-Euler, sendo eles *Mixture Model*, *Eulerian Model* e *Volume of Fluids* (VoF), ou Modelo de Mistura, Modelo Euleriano e Volume dos Fluidos, respectivamente, em português livre (ANSYS, 2021a). A seguir, são abordadas as propriedades das três abordagens.

3.4.4 Mixture Model

O *Mixture Model* é responsável por modelar fenômenos que englobem duas ou mais fases, sendo elas fluidas ou particuladas. Sendo uma abordagem Euler-Euler, as fases são tratadas como contínuas e interpenetrantes. Assim, este modelo resolve a equação de transferência de movimento para a mistura e prevê as velocidades relativas, objetivando descrever cada uma das fases dispersas. Este modelo é aplicado para escoamentos carregados com partículas de baixo carregamento, escoamentos borbulhantes, sedimentação e separadores de ciclone. Ressalta-se, ainda, que essa modelagem também é utilizada para descrever escoamentos multifásicos homogêneos (ANSYS, 2021a).

Dentre outras propriedades, o *Mixture Model* permite modelar escoamentos em que as fases se movem em diferentes velocidades, assumindo um equilíbrio local em escalas curtas de comprimento espacial. Cita-se, também, a sua capacidade de modelar fluidos com viscosidade não newtoniana (ANSYS, 2021a).

O *Mixture Model* trata-se do modelo mais simples de acoplamento Euler-Euler dentro do ANSYS Fluent™, mas pode funcionar tão bem quanto um modelo multifásico mais robusto, apesar de resolver um número relativamente menor de variáveis que outrem (ANSYS, 2021a).

Elencam-se, abaixo, algumas limitações existentes a partir da aplicação do *Mixture Model* (ANSYS, 2021a):

- Não é permitido calcular os modelos equacionais com base na densidade, apenas com base na pressão;
- Somente é permitida que uma única fase seja um gás compressível ideal. Entretanto, não há limitação na utilização de líquidos compressíveis, embora tal aplicação só é permitida a partir de uma programação com a *User Defined Function* (UDF) em linguagem C++, ou Função Definida pelo Usuário, em tradução livre;
- Não é permitido a modelagem de alguns modelos de rotação de geometria, como o *Multiple Reference Frame* (MRF);
- Não é permitido modelagem de fusão, solidificação e escoamentos invíscidos;
- Não é permitido modelagem de combustão de materiais não pré-misturados, parcialmente pré-misturados e pré-misturados.

3.4.5 Eulerian Model

O modelo Euleriano é o modelo multifásico mais robusto presente no ANSYS Fluent™, possuindo a capacidade de resolver um conjunto de equações de transferência de movimento e massa para cada uma das fases. O acoplamento entre elas é resultado dos coeficientes de troca de pressão e de interface. Assim, a maneira como este acoplamento é tratado depende da natureza das fases envolvidas, sejam escoamentos granulares ou não granulares. Para escoamentos granulares, utiliza-se a *Kinetic Theory of Granular Flow*, ou Teoria Cinética do Fluxo Granular em tradução livre, desenvolvida e aprimorada por Gidaspow (ANSYS, 2021a; Arastoopour; Gidaspow; Abbasi, 2017). Este método foi amplamente abordado pelo trabalho realizado por Couto (2019).

Ressalta-se que esta modelagem permite a descrição de várias fases separadas, mas que interagem entre si. Assim, a abordagem puramente euleriana é utilizada para cada fase contínua, contrapondo-se a abordagem euler-lagrangeana, utilizada para modelagem de fases discretas (ANSYS, 2021a).

De forma paralela, nota-se que o modelo Euleriano permite um número praticamente ilimitado de fases secundárias, restringindo-se apenas pela quantidade de memória disponível no *hardware* e pelo comportamento da convergência a ser monitorada (ANSYS, 2021a).

Para mais, o modelo Euleriano ainda diz que somente uma pressão é compartilhada por todas as fases descritas e que as equações de massa e transferência de movimento são resolvidas separadamente para cada uma das fases (ANSYS, 2021a).

Dentre as limitações, elencam-se (ANSYS, 2021a):

- Somente é permitido o rastreamento de partículas que interagem com a fase primária do escoamento;
- Não é permitido modelagem de um escoamento periódico incidente, ou *Steamwise* no original, com uma taxa de escoamento de massa especificada;
- Não é permitido modelagem de derretimento, solidificação e escoamentos invíscidos;
- Não é permitido modelagem de modelos de combustão com materiais não pré-misturados, parcialmente pré-misturados e pré-misturados.

A próxima subseção aborda a modelagem VoF, utilizada na elaboração desta dissertação.

3.4.6 Volume of Fluids (VoF)

O modelo VoF é uma abordagem que envolve o rastreamento de superfície aplicada a uma malha euleriana fixa. Dessa forma, sabe-se que o VoF foi desenvolvido para ter a capacidade de modelar dois ou mais fluidos imiscíveis, em que a posição da interface entre os fluidos é de interesse de estudo. Um único conjunto de equações de transferência de movimento é compartilhado por ambos os fluidos e a fração volumétrica de cada um dos fluidos é rastreada pelo domínio em cada um dos volumes de controle. O modelo permite aplicação em escoamentos de superfície livre, estratificados, enchimento, espalhamentos, movimentos de grandes bolhas, fenômenos de escoamento após o rompimento de uma barragem (também conhecido como fenômeno de *dam break*) e estabilidade ou rastreamento de qualquer interface líquido-gasoso (ANSYS, 2021a).

Dentre as limitações, elencam-se (ANSYS, 2021a):

- Não é permitido calcular os modelos equacionais com base na densidade, apenas com base na pressão;
- Somente é permitida que uma única fase seja um gás compressível ideal. Entretanto, não há limitação na utilização de líquidos compressíveis, embora tal aplicação só é permitida a partir de uma programação com UDF em linguagem C++;
- Não são permitidas regiões vazias, onde não haja presença de fluido;
- Não é permitido modelagem de um escoamento periódico incidente, com uma taxa de escoamento de massa especificada;
- Não é permitido a aplicação da variação *Level Set* da modelagem VoF em malhas poliédricas;
- Não é permitido modelagem de modelos de combustão de materiais não pré-misturados, parcialmente pré-misturados e pré-misturados.

Em suma, estudando sua formulação, entende-se que o VoF se baseia na premissa de que os múltiplos fluidos modelados não são interpenetrantes. Para cada nova fase, um componente de fração volumétrica é introduzido ao volume de controle. Em cada um dos volumes de controles gerados, as frações volumétricas de todas as fases modeladas se somam a unidade. As variáveis e propriedades são compartilhadas pelas fases, representando valores

médios de volume, a partir do momento em que a fração volumétrica de cada fase seja conhecida dentro de cada volume de controle (ANSYS, 2021a).

Assim, se o q^{th} (a ordem) da fração volumétrica do fluido no volume é dado como α_q , as seguintes condições podem existir (ANSYS, 2021a):

- $\alpha_q = 0$: A célula está vazia (para o fluido q^{th});
- $\alpha_q = 1$: A célula está cheia (para o fluido q^{th});
- $0 < \alpha_q < 1$: A célula contém a interface entre o fluido q^{th} e os demais fluidos da multifase com base no valor local de α_q ; as propriedades e variáveis apropriadas serão atribuídas a cada volume de controle dentro do domínio.

O rastreamento das interfaces existentes entre as fases é realizado pelo cálculo da equação da continuidade para a fração volumétrica de uma ou mais fases. Para a fase q^{th} , a equação da continuidade é dada pela Equação (9).

$$\frac{1}{\rho_q} \left[\frac{\partial}{\partial t} (\alpha_q \rho_q) + \nabla \cdot (\alpha_q \rho_q \vec{v}_q) \right] = S_{\alpha_q} + \sum_{p=1}^n (\dot{m}_{pq} - \dot{m}_{qp}) \quad (9)$$

Em que: $\dot{m}_{qp}$ é a transferência de massa da fase q para a fase p (mol/s), $\dot{m}_{pq}$ is é a transferência de massa da fase p para a fase q (mol/s), ρ é a massa específica (kg/m³), t é o tempo, α é a fração volumétrica (adimensional), v é a velocidade (m/s) e S_{α_q} é o termo fonte (J). De forma geral, o termo fonte é zero, podendo ser especificado uma fonte de massa constante ou por meio de UDF para cada uma das fases (ANSYS, 2021a), não sendo alvo de estudo desta dissertação.

Paralelamente, uma única equação de transferência de movimento é resolvida para todo o domínio computacional modelado e o campo velocidade encontrado é compartilhado entre todas as fases, conforme será possível observar nos resultados do Capítulo 5. A equação de transferência de movimento, dada pela Equação (10), depende das frações volumétricas de todas as fases a partir das propriedades de ρ e μ (ANSYS, 2021a).

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot [\mu (\nabla \vec{v} + \nabla \vec{v}^T)] + \rho \vec{g} + \vec{F} \quad (10)$$

Em que: v é a velocidade (m/s); ρ é a massa específica (kg/m³); μ é a viscosidade dinâmica, em N · s/m²; $\vec{g}$ é a aceleração da gravidade (m/s²) e F é a força de campo (N).

Ressalta-se que a equação da conservação de energia não foi considerada durante a produção deste trabalho.

Ademais, a ANSYS (2021a) ressalta que o modelo VoF é apropriado para escoamentos que envolvam superfície livre, como o objeto desta dissertação, e estratificados, enquanto o *Mixture Model* e o modelo Euleriano são recomendados para ocasiões em que exista a necessidade de separação entre a fase contínua e a dispersa, excedendo-se 10%.

3.4.6.1 Modelagem com Open Channel

Como supracitado, o ANSYS Fluent™ tem a capacidade de modelar escoamentos de superfície livre. Dentre eles, pode descrever os efeitos do *Open Channel Flow*, ou escoamento de canais abertos, em tradução livre. Esse fenômeno é conhecido, por exemplo, pelo escoamento de rios, represas e estruturas perfurantes de superfície em escoamento ilimitado. Essa modelagem é dada a partir da formulação VoF com a condição de contorno de *Open Channel*. Esses escoamentos envolvem a existência de uma superfície livre entre o fluido que flui e o fluido acima dele (geralmente a atmosfera). Nesses casos, a propagação de possíveis ondas e o comportamento da superfície livre tornam-se importantes. O escoamento é geralmente governado pelas forças da gravidade e da inércia. Este recurso é principalmente aplicável a problemas marítimos e à análise de escoamento através de dispositivos de drenagem, como o canal por este trabalho estudado (ANSYS, 2021a).

Ainda, é necessário entender que, para modelar o escoamento de fluidos, é fundamental representar, no projeto, a forma a qual o *software* calculará o regime de escoamento, sendo este laminar ou turbulento, que pode ser definido a partir da Equação (4). A partir daí, o ANSYS Fluent™ possui diversos modelos para que o usuário defina qual o mais viável para o seu projeto de simulação. As próximas subseções estabelecem um dos modelos mais utilizados pela indústria e academia, o *k- ω* e suas variações.

3.4.7 Modelo k- ω padrão

Por padrão, o modelo de turbulência *k- ω* do ANSYS Fluent™ baseia-se no modelo proposto por Wilcox (1998). Este tem a capacidade de incorporar as modificações para efeitos

de baixos números de Reynolds, Equação (4), combinados com compressibilidade e espalhamento do fluxo de cisalhamento (ANSYS, 2021a). Dentre as vulnerabilidades demonstradas por esta abordagem, denota-se a sensibilidade das soluções a valores de k e ω fora da camada de cisalhamento, onde há uma sensibilidade ao escoamento livre, podendo influenciar significativamente nos resultados encontrados, principalmente para situações de escoamento de cisalhamento livre (ANSYS, 2021a; Menter, 2009). Apesar de uma nova versão ter sido elaborada (Wilcox, 2008), o problema de sensibilidade supracitado não foi totalmente solucionado (ANSYS, 2021a; Menter, 2009).

Ressalta-se, também, que o modelo padrão do $k-\omega$ é uma modelagem empírica, baseando-se nas equações do modelo de transporte para energia cinética de turbulência (ω) e da taxa de dissipação específica (k) (ANSYS, 2021a; Wilcox, 1998).

Ainda, destaque-se que novos termos de produção foram atribuídos às equações de k e ω , melhorando significativamente a precisão do modelo, principalmente quanto sua sensibilidade à escoamentos de cisalhamento livre.

Como alternativa para solucionar o destacado problema de sensibilidade, Menter (1994) elaborou uma equação diferente da proposta por Wilcox, a qual é apresentada a seguir.

3.4.8 Modelo Baseline (BSL) $k-\omega$

O modelo *Baseline*, ou linha de base em tradução livre, para $k-\omega$ foi desenvolvido por Menter (1994), tendo como objetivo combinar, de maneira efetiva, a formulação precisa e robusta do modelo $k-\omega$ na região próxima ao limite do domínio computacional, com a independência do escoamento livre proposta pelo modelo $k-\varepsilon$ (ANSYS, 2021a). Com isso, Menter (1994) conseguiu adaptar as equações do modelo $k-\varepsilon$ para convertê-las dentro da formulação do modelo $k-\omega$ (ANSYS, 2021a).

Apesar das semelhanças ao modelo $k-\omega$ padrão apresentado anterior, esta modelagem inclui algumas peculiaridades (ANSYS, 2021a):

- O $k-\omega$ padrão e o $k-\varepsilon$ convertido por Menter (1994) são multiplicados por uma função da mistura e somados ao final do processo. Essa função de mistura é projetada para se comportar como uma região próxima ao limite do domínio computacional, ativando o modelo $k-\omega$ padrão, e na distância nula da superfície, ativando o modelo $k-\varepsilon$ convertido;

- O modelo BSL incorpora um termo derivado de difusão cruzada na equação do ω ;
- As constantes de modelagem são diferentes das encontradas no padrão para k - ω .

Objetivando aprimorar ainda mais este modelo e torná-lo adaptável a várias situações, uma nova formulação foi proposta, a qual é abordada a seguir.

3.4.9 Modelo Shear-Stress Transport (SST) k - ω

O *Shear-Stress Transport* (SST), ou transporte da tensão de cisalhamento em tradução livre, para modelagem de k - ω inclui todas as adequações já propostas pelo modelo BSL supra abordado, adicionando-se o transporte da tensão de cisalhamento da turbulência na definição da viscosidade turbulenta do escoamento (ANSYS, 2021a).

Com isso, o modelo SST k - ω , proposto por Menter (1994), apresenta-se como o mais confiável e preciso dentre os demais apresentados, comportando-se bem para uma classe mais abrangente de escoamentos turbulentos (ANSYS, 2021a).

Ainda, uma adequação a este modelo, adicionando-se mais equações e tornando-o muito robusto, foi realizada, a qual será abordada a seguir.

3.4.10 Modelo Transition SST

O modelo definido como *Transition SST* para k - ω também é conhecido como modelo $\gamma - Re_\theta$. Essa modelagem baseia-se no acoplamento entre as equações propostas de transporte do SST k - ω com outras duas equações de transportes: a primeira para representar a intermitência; a segunda para estabelecer os critérios de início da transição do regime do escoamento, a qual se refere aos termos da espessura de momento do número de Reynolds. A ANSYS (2021a) elaborou uma relação empírica para cobrir a transição do desvio padrão, assim também para como os escoamentos livres em regimes de baixa turbulência.

O modelo apresenta as seguintes limitações (ANSYS, 2021a):

- Restringe-se a escoamentos limitados por condições de contorno em *Wall* (apresentado na subseção 3.4.11);

- Não se aplica bem para modelagens que incluam a transição em escoamentos de cisalhamento livre. Nestes, o *Transition SST* preditará o escoamento de cisalhamento livre como totalmente turbulento;
- Não é utilizável em domínios computacionais móveis, onde o campo da velocidade para o sistema de coordenadas é calculado;
- Não contempla a combinação de diferentes fenômenos físicos que possam afetar os termos de origem dos modelos de turbulência, como a flutuabilidade e a turbulência multifásica.

Ademais, conforme estabelecido, as condições de contorno impostas nas paredes do domínio computacional são de extrema importância no estudo dos escoamentos multifásico. A partir desta premissa, a próxima subseção discorre acerca das normatizações presente no ANSYS Fluent™.

3.4.11 Wall

Uma CC significativa nas modelagens de projetos em CFD, e principalmente nesta dissertação, é a *Wall*, ou parede em tradução livre. Como o nome sugere, é nela onde há a atribuição das condições de superfície que impedem que o escoamento do fluido ultrapasse o domínio de controle, contrariando a sua inércia. Por padrão, o ANSYS Fluent™ já cria uma *wall* para todas as faces do escoamento (ANSYS, 2021a). As diferentes condições que descrevem as forças aplicadas na *wall* podem ser observadas resumidamente no Quadro 2.

Ainda, ressalta-se que a rugosidade da parede no ANSYS Fluent™ é dada pela rugosidade equivalente da areia de Nikuradse (1933), no ANSYS Fluent™ chamado de *Roughness Height* [m], ou altura da rugosidade em tradução livre. Como no Brasil, a rugosidade dos canais apresenta-se, de maneira geral, pelo coeficiente de Manning (1891), a formulação proposta por Yen (2004), demonstrada da Equação (5), foi imprescindível para a realização deste trabalho.

Quadro 2 – Condições que Descrevem as Forças no *Wall*

Condição no <i>Wall</i>	Opção	Informação Adicional
O fluido gruda no <i>Wall</i> . Se o <i>Wall</i> está se movendo, o fluido se move com a mesma velocidade do <i>Wall</i> .	Antideslizamento	Especificar a velocidade da parede como estacionária ou rotativa.

Condição no <i>Wall</i>	Opção	Informação Adicional
Onde a viscosidade ou velocidade do escoamento de fluido representa que o atrito na interface com uma parede sólida tem um impacto desprezível e pode ser ignorado.	Deslizamento livre	Os componentes da velocidade normal, para uma parede de deslizamento livre, são zero. As paredes deslizantes são usadas para: • aproximar a superfície livre de um líquido, por exemplo, onde a superfície da água encontra o ar; • fornecer um limite de simetria modelando uma parede de deslizamento isolada.

Fonte: Adaptado da ANSYS (2021a).

3.5 PROCESSAMENTO

Após serem estabelecidos e aplicados todos os modelos equacionais durante o pré-processamento, a simulação numérica pode ser realizada. Durante este processo, o ANSYS Fluent™ permite o monitoramento, a impressão e a plotagem dos dados da solução, bem como a definição dos critérios de parada de convergência numérica (ANSYS, 2021a).

Essas definições podem e devem ser usadas para o estudo de monitoramento da convergência numérica, da independência da malha e do *time step* utilizado, bem como do registro do histórico de tempo necessário para a realização da simulação. O monitoramento de resíduos de erro possui informações acerca da convergência de diferentes variáveis de campo ou funções, como superfície, força, volume, integrais de continuidade e transferência de movimento (ANSYS, 2021a).

Couto (2019) ressalta que a convergência numérica é alcançada quando as taxas de erro residuais, provocadas pelos erros entre as iterações do cálculo numérico, permanecem dentro do intervalo definido pelo usuário. O próprio ANSYS (2021a) estabelece valores padrão para atingir uma convergência numérica aceitável, os quais não foram modificados na elaboração deste trabalho.

3.6 PÓS-PROCESSAMENTO

Visando analisar os resultados obtidos através das iterações numéricas para resolução das equações diferenciais, a ANSYS™ disponibiliza o pacote CFD-Post™. Dentre os principais recursos e benefício deste *software*, a ANSYS (2021a) cita:

- Interface gráfica acessível para o projetista, incluindo um painel de visualização que permite observar, em tempo real, todas as plotagens das saídas gráficas permitidas;
- Suporte à plotagem de inúmeros objetos gráficos e geométricos;
- Visualização da malha gerada;
- Estabelecimento de locais específicos para obtenção de resultados quantitativos;
- Definição de variáveis escalares e vetoriais;
- Comparação com outros arquivos importados por meio do congelamento de variáveis, e;
- Elaboração dos mais diversos relatórios, incluindo a plotação de gráficos, sejam eles espaciais e/ou temporais.

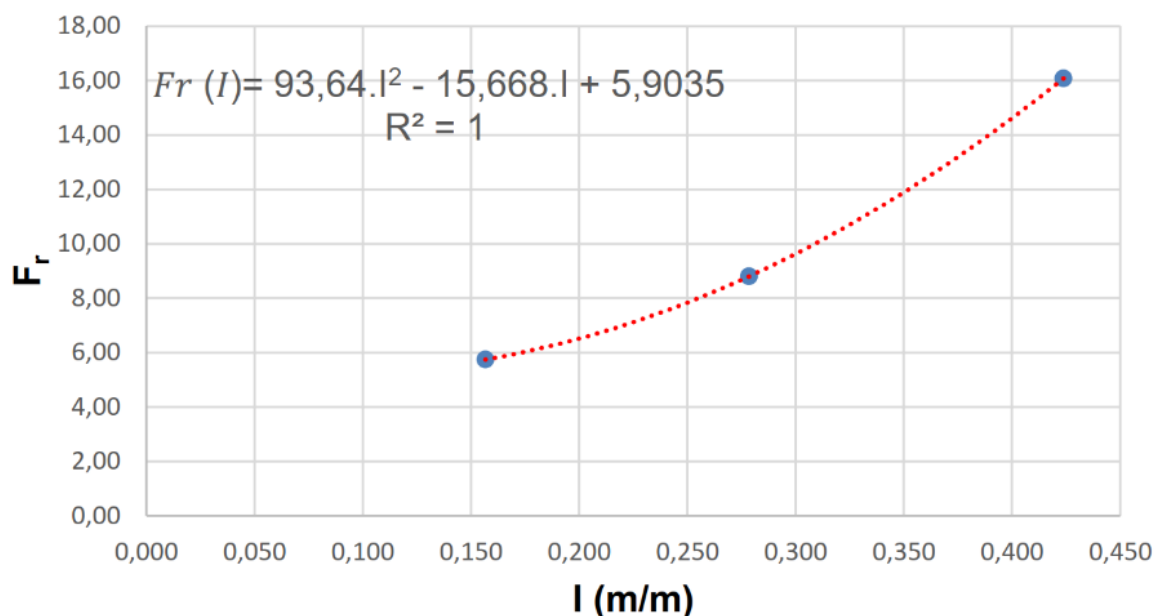
3.7 ESTADO DA ARTE DE CANAIS HIDRÁULICOS

O trabalho realizado por Anjos (2020) analisou a propagação de ressalto hidráulico a montante de um obstáculo no mesmo canal experimental estudado por esta dissertação. A partir dos dados encontrados experimentalmente no canal estudado, foi possível classificar o tipo do ressalto utilizando-se de barramentos ao longo de sua seção horizontal e também variando a sua declividade. Dentre outros importantes resultados obtidos, ressalta-se que o autor conseguiu correlacionar o número de Froude com a inclinação adotada no experimento, obtendo-se uma equação do número de Froude em função da declividade do canal de acrílico, conforme pode ser observado na Figura 14.

Na linha da evolução da drenagem urbana no atual milênio, Cardoso (2008) realizou um estudo para desenvolver uma metodologia para avaliação de alternativas de intervenção em cursos de água em áreas urbanas. No trabalho, visando-se avaliar impactos em curso de água e em diferentes aspectos hidrológicos/hidráulicos, sanitários, sociais e ambientais, foram propostos doze indicadores de desempenho. De acordo com a análise realizada, a autora ressaltou que indicadores encontrados foram capazes de englobar os principais impactos decorrentes de intervenções em cursos d'água. Dessa forma, a metodologia desenvolvida por Cardoso (2008) permite nortear a escolha de soluções pré-estabelecidas, como também construir novas alternativas de intervenção, podendo subsidiar regulamentações específicas e

apontar um potencial caráter normativo. A Tabela 2 apresenta os indicadores encontrados a partir da metodologia proposta.

Figura 14 – Número de Froude em função da declividade do canal



Fonte: Anjos (2020).

Tabela 2 – Indicadores Propostos por Cardoso (2008)

Indicador	Ponderação de base		Visão tecnicista	Visão ambientalista
	Peso	D.P.	Peso	Peso
Forma/Sinuosidade	8,0	3,86	4,14	8,00
Leito e Margens (seção)	9,5	4,33	5,17	13,83
Vulnerabilidade e Inundações no Local	14,5	4,24	18,74	12,26
Vazões de Jusante	11,5	4,35	15,85	11,50
Erosão e Assoreamento	9,0	2,98	11,98	11,98
Diversidade de Habitats	5,3	2,96	2,34	8,26
Áreas Verdes	6,5	1,97	4,53	8,47
Impacto Paisagístico	5,2	2,3	4,71	5,20
Proliferação de Insetos	8,0	5,2	8,00	8,00
Áreas/Equipamentos Urbanos e de Lazer	9,8	3,66	9,80	6,14
Desapropriação, Remoção e Reassentamento da População	8,2	4,19	12,39	4,01
Valorização Financeira da Área	4,5	2,15	2,35	2,35
Total =	100	100	100	100

Fonte: Adaptado de Cardoso (2008).

Carvalho *et al.* (2017) estudaram sobre os efeitos do revestimento de canal e impermeabilização do solo à dinâmica de inundação do rio Arrombados – PE. Para tal, utilizou-se do Modelo Matemático de Células de Escoamento para bacias urbanas (MODCEL), a fim de se obter os níveis de inundações e incremento de vazão no rio Arrombados em períodos de chuvas intensas, devido à ocupação do solo e o revestimento da calha fluvial. A partir daí, os autores ressaltam que ações de canalização e retificação de cursos d'água levam a impactos ao canal e a planície de inundação, desencadeando modificações significantes no padrão de drenagem, reduzindo-se o comprimento do canal pós-alargamento, aprofundamento e retificação, além da diminuição de rugosidades do leito e aumento do gradiente. Com os resultados obtidos, demonstrou-se que as inundações nas áreas marginais foram intensificadas devido aos fatores antrópicos. Assim, os autores recomendam que os projetistas atuem de maneira a gerir e planejar os espaços respeitando a natureza dos cursos d'água, bem como ajam de forma integrada e multidisciplinar. Da mesma forma, cobra-se uma sensibilidade ambiental, por meio de práticas sustentáveis, de forma que as ocupações urbanas possam ser objeto de ações governamentais, contribuindo significativamente na composição de novos cenários urbanos, de forma a garantir a conservação dos corpos hídricos.

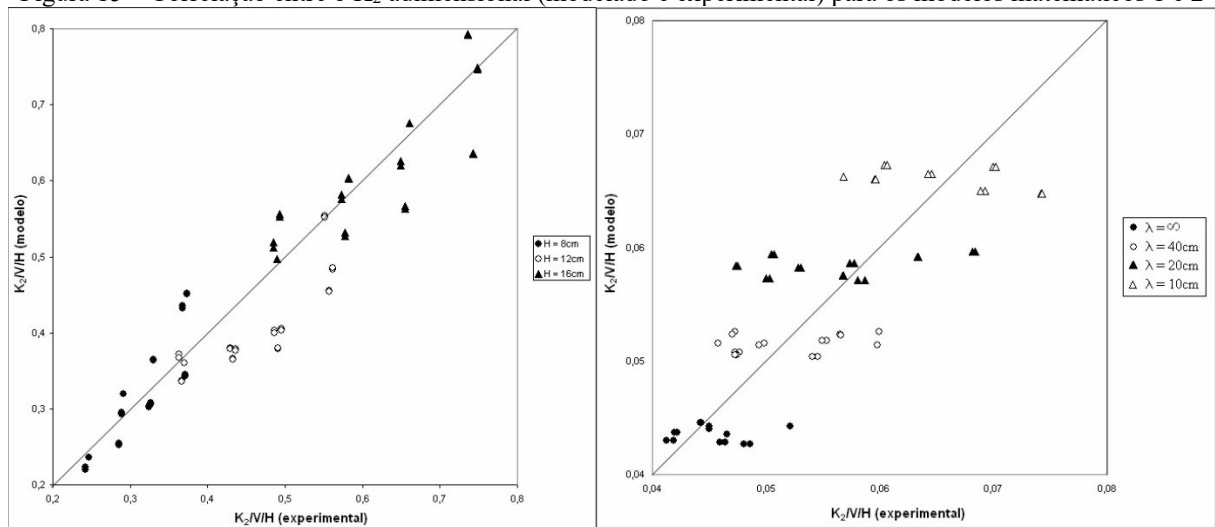
O trabalho estudado por Costa (2011) estudou a influência de macro-rugosidades do leito de um canal hidráulico sobre o coeficiente de reoxigenação superficial. Dessa forma, o trabalho objetivou realizar uma investigação experimental para averiguar a influência da reoxigenação na interface ar-água através do fenômeno de superfície livre em escoamento de canais. A partir disso, os estudos experimentais realizados demonstraram que os parâmetros de lâmina d'água, velocidade e rugosidade do leito possuem efeitos significativos no coeficiente K_2 de reaeração superficial. Dessa forma, tornou-se evidente, para o autor, que os valores encontrados para o K_2 são dependentes diretamente da tensão de cisalhamento existente entre o fluido escoado e o leito do canal experimental. A Figura 15 apresenta os resultados encontrados para diferentes cenários.

Outro conceito importante a ser entendido é o comprimento de entrada totalmente desenvolvido para escoamento de canais turbulentos. O trabalho de Lien *et al.* (2004) ajudou a preencher lacunas sobre o conhecimento a cerca desse tema. Para tal, realizaram uma investigação experimental em um canal suave. A velocidade média dos perfis foi obtida a partir de um tubo estático de Pitot, conforme pode ser observado na Figura 16. Dessa forma, os autores contribuíram ao demonstrar que o subdesenvolvimento em relação ao perfil de

velocidade, manifesta-se primeiro como um deslocamento vertical, provavelmente devido à mudança na fricção dada a partir da rugosidade das condições de parede.

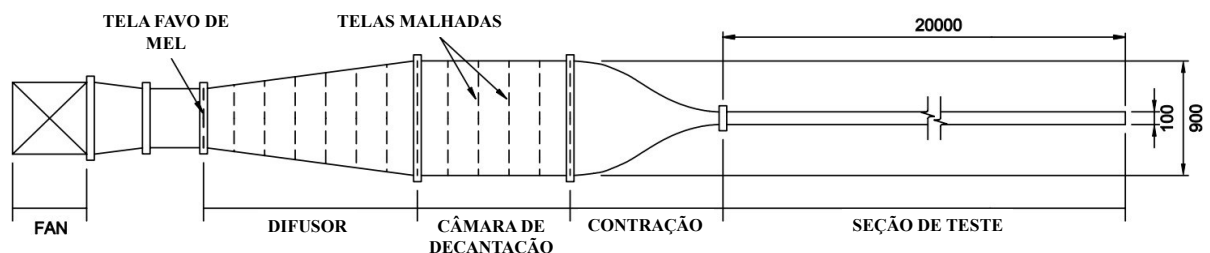
Da mesma forma, o trabalho Bonakdari *et al.* (2008) estudou sobre o perfil de velocidade turbulenta em canal aberto com escoamento totalmente desenvolvido. Neste estudo, uma nova proposta de lei é dada para um perfil de velocidade na região externa de qualquer largura de canal. A proposta lei foi validada com resultados experimentais e com diferentes conjuntos de dados da literatura, conforme pode ser observado na Figura 17. Considerando a hipótese levantada para simplificação da equação, a lei proposta tornou-se válida na região externa das camadas limites turbulentas e na região central dos canais.

Figura 15 – Correlação entre o K_2 adimensional (modelado e experimental) para os modelos matemáticos 1 e 2



Fonte: Adaptado de Costa (2011).

Figura 16 – Instalação do canal experimental (vista lateral)



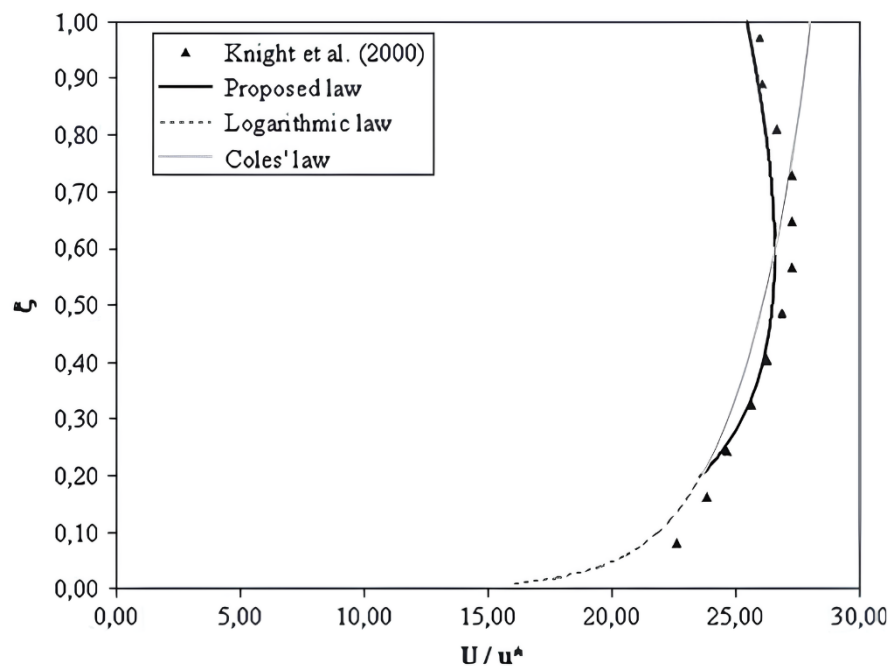
Fonte: Adaptado de Lien *et al.* (2004).

O trabalho realizado por Abdullah *et al.* (2023) buscou realizar uma nova investigação acerca da relação entre o coeficiente de Manning (1891) de tubos perfuradas de drenagem de águas pluviais subterrâneas e de parâmetros hidráulicos. Durante a realização do estudo, os

autores concluíram que à medida que o coeficiente de rugosidade de Manning aumentava, maior seria a capacidade da tubulação de reduzir a velocidade do escoamento, resultando em um menor pico de vazão e na capacidade de controlar a quantidade de águas pluviais no subsolo urbano. A Figura 18 demonstra a correlação encontrada entre o coeficiente de Manning e o número de Froude por este trabalho.

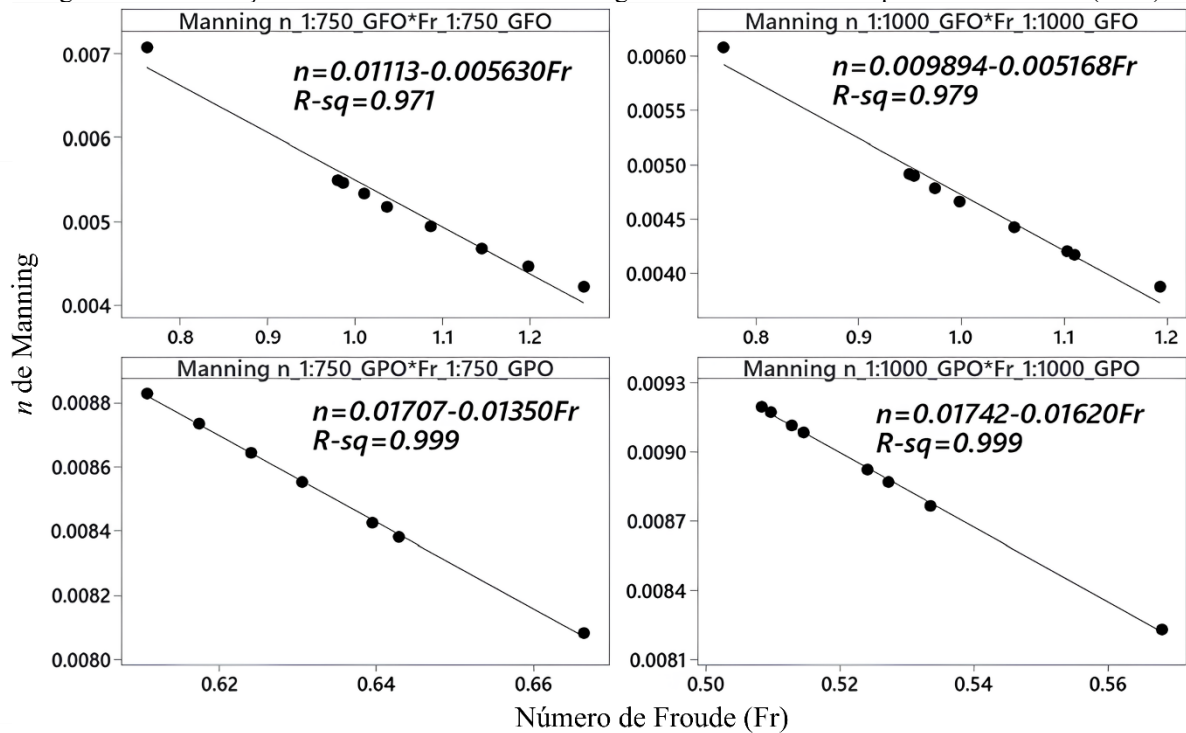
Visando-se amenizar os níveis de inundações de locais do Recife, Silva (2010) pesquisou sobre a aplicação e análise de técnicas de simulação computacional para resolução dos problemáticas apresentadas. Os resultados encontrado foram positivos, corroborando com demais literaturas técnicas semelhantes. A partir daí, o autor demonstrou que técnicas computacionais são eficientes para encontrar alternativas de redução de até 55% nos picos de vazão. Ainda, destacou que literaturas dessa natureza possuem a capacidade de fornecer subsídios técnicos diferenciais para órgãos gestores da drenagem urbana em seu município.

Figura 17 – Validação da proposta de lei por Bonakdari *et al.* (2008) a partir de dados experimentais em canal circular



Fonte: Bonakdari *et al.* (2008).

Figura 18 – Correlação entre o Coeficiente de Manning e o Número de Froude por Abdullah *et al.* (2023)



Fonte: Abdullah *et al.* (2023).

3.8 ESTADO DA ARTE DE CFD

Durante a pesquisa realizada, avaliou-se que vários autores concluíram que as técnicas de CFD possuem a capacidade de modelar fenômenos que envolvem hidráulica e hidrodinâmica. Além disso, demonstraram a grande viabilidade do pacote ANSYS Fluent™ na solução desses fenômenos, mesmo em versões mais antigas.

O trabalho realizado por Silva *et al.* (2018) objetivou avaliar a dispersão de poluentes em meios hídricos. Para tal, os autores realizaram análises experimentais e de CFD em canais hidráulicos. A ANSYS™ foi o *software* de simulação utilizado em questão, reforçando sua aplicação ampla na academia. Os autores ainda destacaram que a modelagem computacional obteve um excelente resultado, aproximando-se consideravelmente dos dados experimentais, concluindo que as técnicas de CFD possibilitaram um melhor entendimento dos fenômenos que envolvam a dispersão de poluentes em canais.

Almeida *et al.* (2019) procuraram analisar, a partir de técnicas de CFD, a influência positiva de diferentes obstáculos em escoamento de micro canais. Este estudo também utilizou o ANSYS Fluent™ para a realização de suas simulações. Como conclusão, os autores observaram que os obstáculos proporcionaram uma melhora significativa no escoamento,

alinhando-se com os resultados esperados. Ademais, salientaram que as alternativas propostas podem acarretar vazões idênticas em ramais de comprimentos diferentes.

Paralelamente, Moraes *et al.* (2016) apontaram que o CFD tem a capacidade de atuar como uma excelente ferramenta para a melhora de projetos de estruturas hidráulicas. Equívocos durante os projetos podem gerar problemas imensuráveis, não se limitando a perdas financeiras, mas também quanto a perdas humanas e ambientais. Concluíram, ainda, sobre a importância da modelagem numérica em escoamentos turbulentos, apresentando-se como uma alternativa para projetos de baixo orçamento e tempo limitado para otimização. Para mais, abordaram sobre a importância de dados de campos para maior precisão da modelagem e discorre sobre o elevado custo computacional que os modelos podem ter.

A pesquisa proposta por Koech *et al.* (2015) também se utilizou do ANSYS Fluent™ como *software* de aplicação de técnicas de CFD. Assim, simularam uma adutora de irrigação, de grande diâmetro, com a presença de um bloqueio. Com isso, o estudo afirmou que o resultado encontrado é presumivelmente mais confiável que o de estudos experimentais anteriores, de forma a reforçar a acuracidade da modelagem CFD para infraestruturas hidráulicas.

Conforme afirmado por Urbanek *et al.* (2019), a maioria dos trabalhos sobre a transição de escoamento de superfície livre para conduto forçado utiliza-se de modelagens computacionais simplificadas, limitando as inúmeras complexidades existentes nestes fenômenos. Objetivando suprir tal carência, os autores apresentaram o CFD como excelente alternativa para tentar descrever o fenômeno supracitado. Para a modelagem, utilizaram-se das mesmas abordagens dos trabalhos supracitados, principalmente quanto da utilização dos pacotes da ANSYS™. Ademais, concluíram que o CFD se trata de técnica computacional significativa, podendo auxiliar diversos pesquisadores no entendimento de fenômenos hidráulicos complexos.

Sánchez-Beltrán *et al.* (2017) justificaram a utilização de técnicas de CFD a fim de se caracterizar o comportamento hidráulico de estruturas de drenagem urbana. A modelagem proposta, elaborada no ANSYS Fluent™, foi validada e representou o comportamento das infraestruturas em situações de chuvas intensas. Ressalta-se que, ao final, compararam o resultado das técnicas de CFD com a modelagem o *Storm Water Management Model* (SWMM). Para mais, destacaram a possibilidade de análise de infraestruturas maiores, prevendo condições de preenchimento e esvaziamento em condições de chuvas fortes. Esta produção revalida o ANSYS Fluent™ como excelente solução para problemas propostos.

A discussão dada por Regueiro-Picallo *et al.* (2016) envolve o esgotamento sanitário. Os autores utilizaram outro pacote de CFD da ANSYS™, o ANSYS CFX™, assim como Silva (2017). Apesar de apresentar maiores facilidades para a modelagem multifísica, o ANSYS CFX™ possui menor grau de liberdade em comparação ao ANSYS Fluent™. Ainda, Regueiro-Picallo *et al.* (2016) reafirmaram que as técnicas de CFD são excelentes no que tange estudos hidráulicos, alcançando resultados com significativa validação experimental.

Objetivando prever o escoamento das águas superficiais em rodovias utilizando-se de técnicas de CFD, o trabalho proposto por Dianat *et al.* (2017) utilizou-se de um *software open source*, ou código aberto em tradução livre, de CFD, o OpenFOAM™. Diferentemente dos *softwares* comerciais, o OpenFOAM™ não apresenta interface gráfica, tornando-o de difícil aprendizagem.

Souto *et al.* (2017) propuseram uma abordagem lagrangiana para o estudo de escoamento livre, chamada *Smoothed Particle Hydrodynamics* (SPH). No respectivo método, o domínio computacional é discretizado com o emprego de partículas, diferentemente das malhas utilizadas no CFD. Todavia, os autores ressaltaram que a metodologia é voltada para escoamentos particulados, os quais envolvam grandes deformações e fronteiras deformáveis. Dessa forma, apesar do trabalho objetivar a modelagem de fenômenos que envolvam superfícies livres, não é equiparável aos fenômenos que a presente dissertação objetiva modelar.

Conforme abordado, objetivando-se modelar a interação água-ar existente em superfícies livre, faz necessário a utilização de modelos multifásicos que permitam compreender as diversas interfaces existentes no escoamento. Os trabalhos de Moraes *et al.* (2016) e Urbanek *et al.* (2019) utilizaram-se do método VoF para descrever a modelagem multifásica entre os materiais de água e ar. O trabalho realizado por Dianat *et al.* (2017), mesmo realizado a modelagem com o *software* OpenFOAM™, corrobora com a utilização do VoF como modelo equacional para descrever escoamentos que envolvam o acoplamento água-ar.

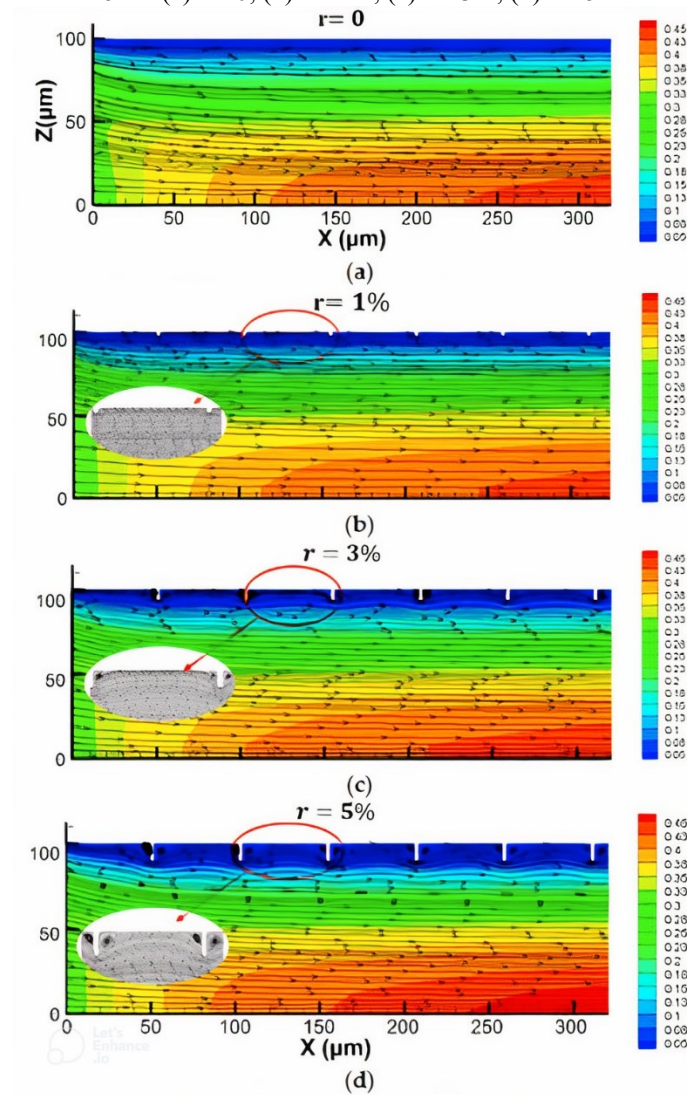
O trabalho de Li *et al.* (2020) estudou acerca do características escoamento na região de entrada com efeito de rugosidade em micro canais retangulares. Para tal, conduziram simulações para estimar os fatores que influenciam na definição do comprimento da região de entrada adimensional. Além disso, objetivou pesquisar, quantitativamente, os comprimentos de entrada em diferentes canais. Para realização desse estudo, os autores utilizaram-se do ICFM CFD 15.0. Para tal, geraram uma malha de alta qualidade, adotando-se de elementos hexaédricos estruturados, com refinamento de malha próximos às paredes. Dentre os resultados,

observaram que a rugosidade tem impacto significativo no desenvolvimento do escoamento pleno do canal, conforme pode ser observado na Figura 19.

Outro estudo de Bonakdari *et al.* (2014) também se demonstra interessante para este trabalho. Dessa vez, os autores utilizam-se de técnicas de CFD para realização de um estudo paramétrico de desenvolvimento de escoamentos turbulentos em canais retangulares. Segundo os autores, o escoamento turbulento em desenvolvimento em um canal aberto é um complexo escoamento tridimensional que é influenciado por correntes secundárias e efeitos de superfície livre. Dessa forma, assim como o estudo proposto por esta dissertação, não é passível de solução analítica. Para a utilização do CFD, o software ANSYS CFX™ foi selecionado. Bonakdari *et al.* (2014) relataram que as correntes secundárias simuladas movem o fluido com uma transferência de movimento relativamente alta em direção à porção central do canal, causando uma depressão observada na velocidade máxima abaixo da superfície livre chamada de fenômeno de mergulho (Nezu; Nakagawa, 1994). Para Bonakdari *et al.* (2014), o CFD foi capaz de simular o campo das curvas isotáquicas em toda a seção transversal, conforme pode ser observada na Figura 20. Os resultados das simulações em CFD demonstraram também que o fenômeno do mergulho ocorre no meio do canal, a 70% do nível da água a partir do leito.

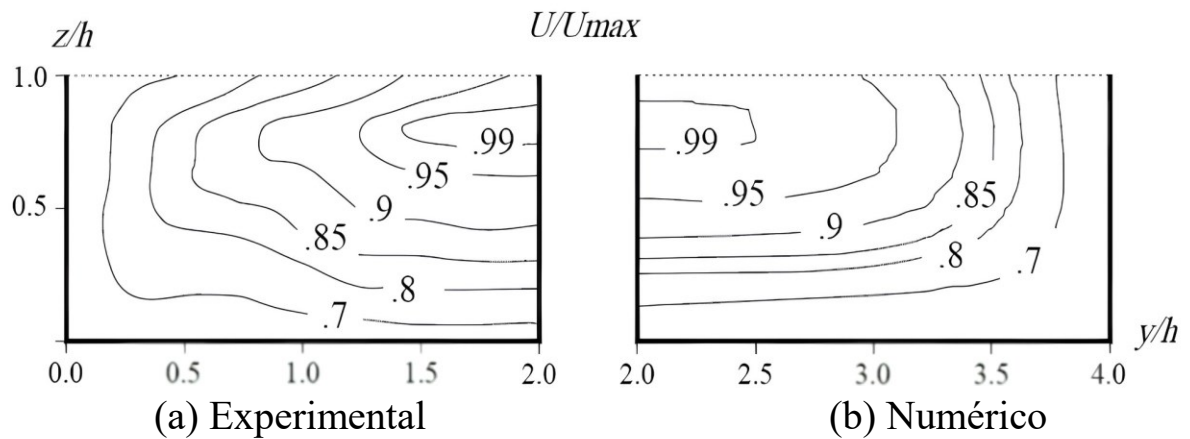
O trabalho de Ghani *et al.* (2014) propôs a realização de investigação numérica do desenvolvimento de distribuições de velocidade em escoamentos de canal aberto. O objetivo foi estudar o impacto da rugosidade e da inclinação da calha fluvial no comprimento necessário para o estabelecimento de um escoamento totalmente desenvolvido em um canal aberto. Observou-se que o aumento da rugosidade resulta na redução do comprimento de desenvolvimento. Ainda, o comprimento do desenvolvimento reduz drasticamente quando a rugosidade atinge uma faixa normalmente encontrada em escoamento de canais abertos com vegetação emergente ou escoamentos naturais de rios. Entretanto, observou-se que a mudança de declividade da calha não resultou em efeito perceptíveis no comprimento de desenvolvimento. Para a realização da pesquisa, o uso de técnicas de CFD foi requerido para obter um comprimento de desenvolvimento confiável antes da realização de um trabalho experimental. Como software, assim como nesta dissertação, o ANSYS Fluent™ foi utilizado. Um dos resultados obtidos na observação do desenvolvimento da velocidade ao longo do canal pode ser observado na Figura 21. Para mais, os autores concluíram que a redução no comprimento do desenvolvimento é pequena quando o aumento da rugosidade é muito pequeno. Entretanto, para valores elevados de rugosidade, há uma redução considerável neste mesmo comprimento de desenvolvimento.

Figura 19 – Diagramas e *streamlines* de velocidade dos micro canais com rugosidades relativas r de 0%, 1%, 3% e 5% - (a) $r = 0$; (b) $r = 1\%$; (c) $r = 3\%$; (d) $r = 5\%$



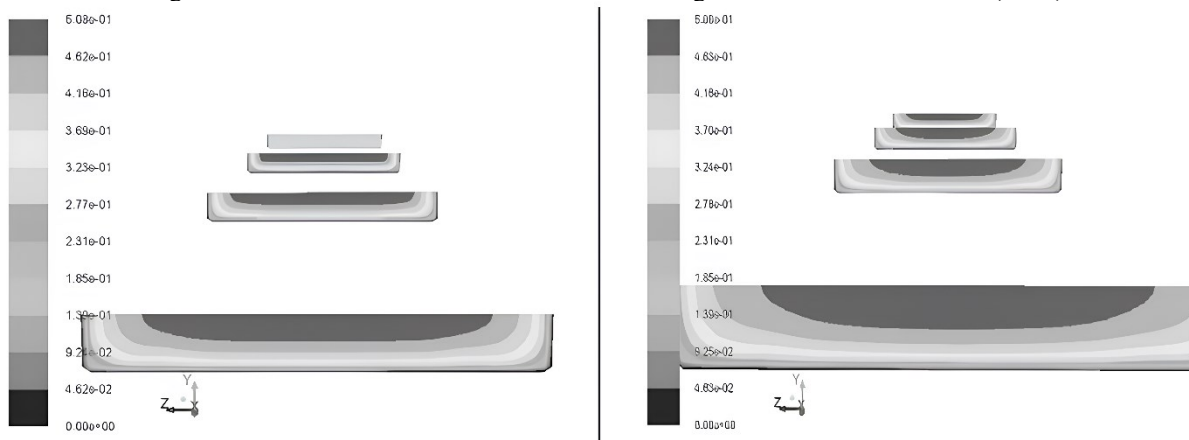
Fonte: Li *et al.* (2020).

Figura 20 – Comparação dos resultados experimentais de Tominaga *et al.* (1989) com os resultados numéricos de Bonakdari *et al.* (2014)



Fonte: Adaptado de Bonakdari *et al.* (2014).

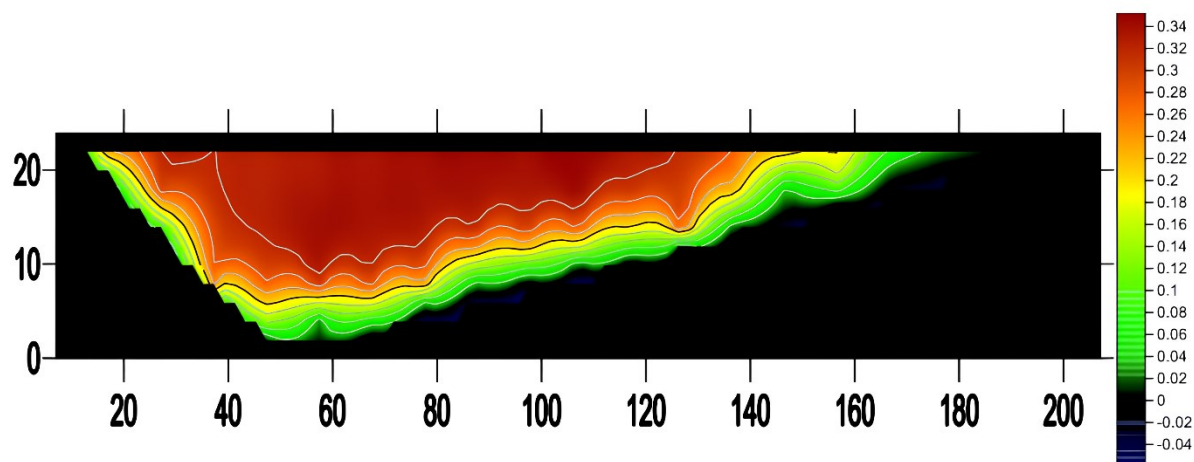
Figura 21 - Desenvolvimento da Velocidade ao longo do Canal de Ghani *et al.* (2014)



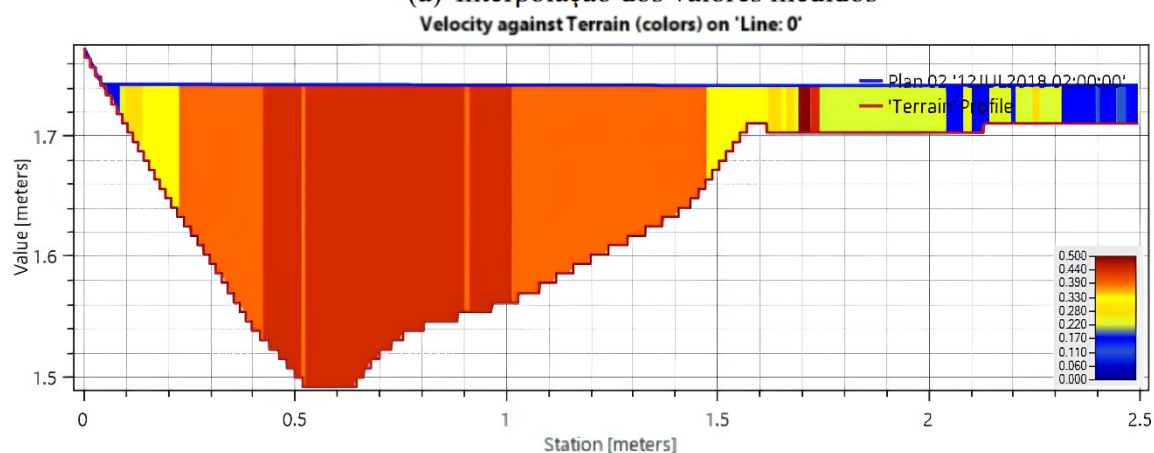
Fonte: Ghani *et al.* (2014).

O trabalho de Campos (2018) buscou avaliar a importância do coeficiente de rugosidade de Manning no assoreamento de reservatórios a fio d'água. Para tal, utilizou-se do modelo físico da Pequena Central Hidrelétrica (PCH) Salto Paraopeba, localizada no município de Belo Vale – MG. No modelo físico foram determinados os campos de velocidades do escoamento, contemplando desde as vazões médias até as extremas, para cenários do reservatório limpo e completamente assoreado. Como ferramenta computacional, utilizou-se HEC-RAS, em um domínio bidimensional para calibração e validação do coeficiente de rugosidade de Manning nos cenários citados. Os resultados indicaram que a distribuição de velocidades e os padrões de circulação nas seções transversais variaram significativamente, obtendo-se um coeficiente de rugosidade de Manning médio de 0,018 para o cenário desassoreado, correspondendo a um valor igual a 0,033 no canal experimental, compatível aos valores esperados para o trecho de rio em questão. Assim, concluiu sobre a importância do levantamento de níveis de água e medições de descarga em seções transversais ao longo dos reservatórios quando se deseja avaliar numericamente o comportamento do fenômenos de assoreamento, bem como para o auxílio da definição de medidas de controle. A Figura 22 apresenta um dos resultados da validação entre o resultado encontrado pelo HEC-RAS e os valores medidos no modelo físico.

Figura 22 – Comparação entre os campos de velocidade interpolado das medidas e os valores calculados pelo HEC-RAS, etapa de validação (TR = 5 anos)



(a) Interpolação dos valores medidos

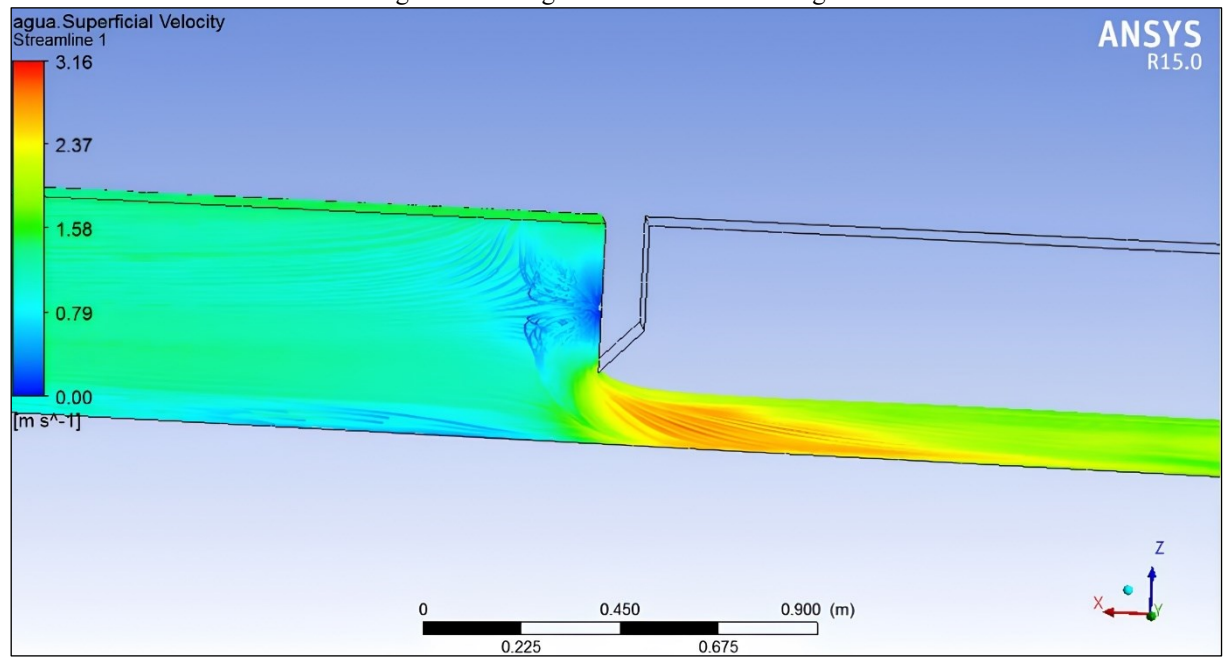


(b) Valores calculados no HEC-RAS

Fonte: Campos (2018).

Silva (2017) realizou uma simulação numérica para avaliação de escoamento sob comportas utilizando-se de técnicas de CFD. Para a sua metodologia, modelou o seu trabalho no ANSYS CFX™, o outro *software* de CFD da ANSYS além do Fluent™. Este trabalho também serviu como base para a metodologia aqui apresentada, no que tange ao desenvolvimento e apresentação dos resultados dos testes de malha e de independência de *time step*. A Figura 23 apresenta o resultado encontrado para o diagrama de velocidade da água.

Figura 23 – Diagrama de velocidade da água

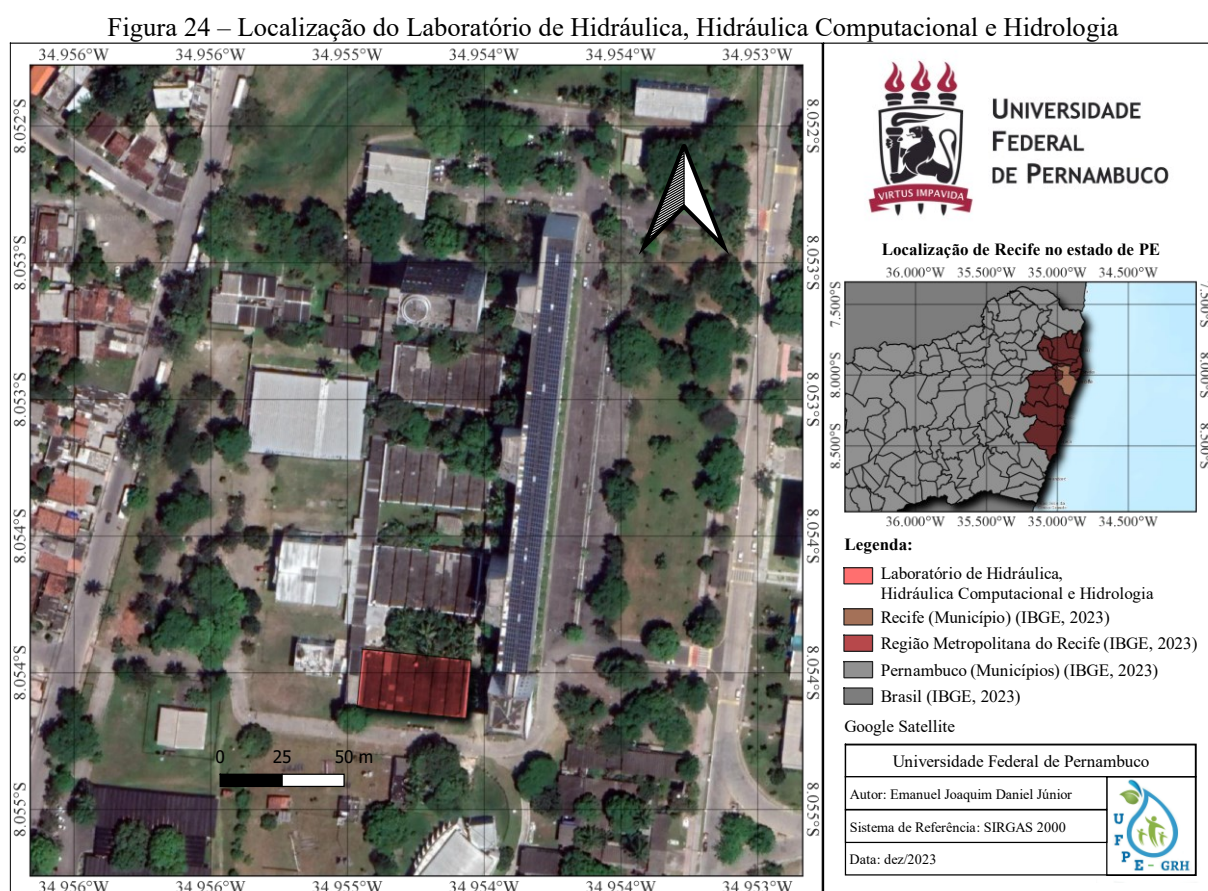


Fonte: Silva (2017).

Conforme referenciais teóricos bem fundamentados dentre os Capítulos 2 e 3, o Capítulo 4 apresenta os materiais e métodos utilizados neste trabalho.

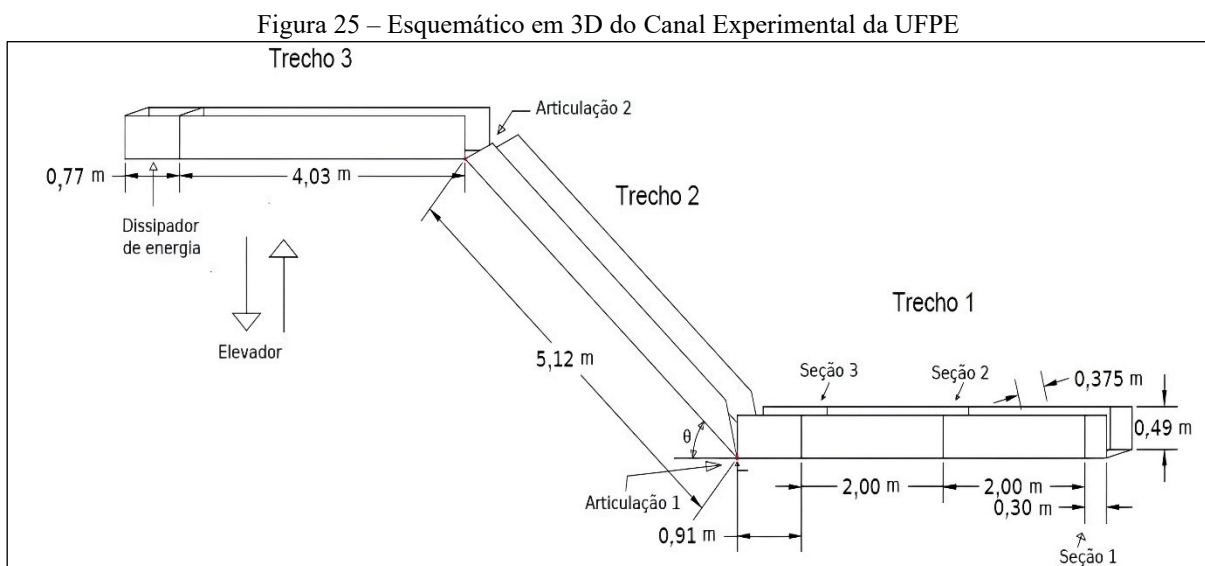
4 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste Capítulo apresenta-se a metodologia utilizada para realização de simulações numéricas voltadas a resolução de problemas que envolvam a hidráulica de canais, especificamente para este trabalho, principalmente no que tange a obtenção dos diagramas dos escalares de velocidade, para diferentes planos e rugosidades. Para a definição das condições de contorno do fenômeno estudado, realizou-se uma campanha de ensaios experimentais para obtenção dos dados geométricos e da vazão, os quais são apresentados na seção 4.1. A localização do Laboratório de Hidráulica, Hidráulica Computacional e Hidrologia da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), local onde se encontra o canal experimental modelado, pode ser observada na Figura 24. O Centro de Tecnologia e Geociências (CTG) da UFPE, que abriga o laboratório, encontra-se na Avenida da Arquitetura, s/n, no bairro da Cidade Universitária, em Recife – Pernambuco.



Fonte: O Autor (2024).

O canal experimental de acrílico estudado pode ser observado na Figura 25. Este possui inclinação variável, conforme detalhado na subseção 4.1.2, mas, para este trabalho, o canal foi utilizado em sua configuração em pequena declividade.



Fonte: Anjos (2020).

A escolha do ANSYS Fluent™, como ferramenta para simulação, justifica-se, assim como nos trabalhos de Couto (2019) e Daniel Júnior (2021), pela complexidade dos seus múltiplos modelos multifásicos e possibilidade de utilização de *Open Channel*. Além disso, é consonante com os trabalhos realizados na área nos últimos 5 anos, apresentados na seção 3.8. A versão utilizada foi a de licença estudantil gratuita do ANSYS™ 2023 R2. O *hardware* utilizado para a realização das simulações numéricas pode ser observado na Tabela 3.

Tabela 3 – *Hardware* utilizado para as Simulações

Item	Modelo
Notebook	Lenovo Ideapad <i>Gaming</i> 3i
Processador	Intel® Core™ i7-10750H CPU @ 5,00GHz
Nº de Núcleos	6
Nº de Threads	12
Cache	12 MB Intel® <i>Smart</i> Cache
Memória RAM	16,0 GB
Placa de Vídeo	NVIDIA GeForce GTX 1650

Fonte: O Autor (2024).

4.1 ENSAIO EXPERIMENTAL

Conforme supracitado, todos os experimentos desta pesquisa foram realizados em um canal experimental de acrílico com declividade variável, instalado no Laboratório de Hidráulica, Hidráulica Computacional e Hidrologia do Departamento de Engenharia Civil da UFPE, conforme localizado na Figura 24.

Seguindo a metodologia realizada por Anjos (2020), faz-se necessário o reconhecimento de todo o sistema que compõe o canal experimental para a correta obtenção de dados experimentais.

O canal, demonstrado na Figura 26, é feito de acrílico cristal. As dimensões internas podem ser observadas na Figura 25. O canal experimental é provido de caixas dissipação de energia a fim de se evitar turbulência na entrada, o que propiciaria uma alteração no regime de escoamento.

Figura 26 – Canal de acrílico presente no Laboratório de Hidráulica do Departamento de Engenharia Civil e Ambiental UFPE, campus Recife.



Fonte: O Autor (2024).

O canal divide-se em três partes, as quais são conectados por articulações, que possibilitam o deslocamento vertical de um dos trechos, fazendo com que o trecho central possa ficar inclinado, conforme as Figuras 25 e 26. Todas as conexões e registros do sistema hidráulico são em PVC soldável (Anjos, 2020).

4.1.1 Sistema de Alimentação do Canal de Acrílico

O sistema experimental do canal é abastecido a partir de um circuito fechado, o qual bombeia água de um reservatório subterrâneo de concreto armado. O reservatório possui as

seguintes dimensões: 10,0 m de comprimento, 10,0 m de largura e 2,0 m altura, com capacidade volumétrica de 200 m³ (Anjos, 2020). O reservatório pode ser observado na Figura 27.

A descarga de água afluyente no sistema de alimentação dá-se de forma que o fluxo hidráulico, que ocorre de montante para jusante, sempre ocorra em circuito fechado, conduzindo a água de volta ao reservatório (Anjos, 2020).

Figura 27 – Reservatório subterrâneo do Laboratório de Hidráulica da UFPE, alimentador do canal



Fonte: O Autor (2024).

Para funcionamento do sistema experimental, utilizou-se uma motobomba, cuja características podem ser observadas na Tabela 4. A tubulação de sucção possui diâmetro de 75 mm e a tubulação de recalque possui um diâmetro de 60 mm, a qual é conectada à tubulação do reservatório subterrâneo, responsável pela alimentação do canal (Anjos, 2020). A Figura 28 apresenta um registro fotográfico da motobomba em questão.

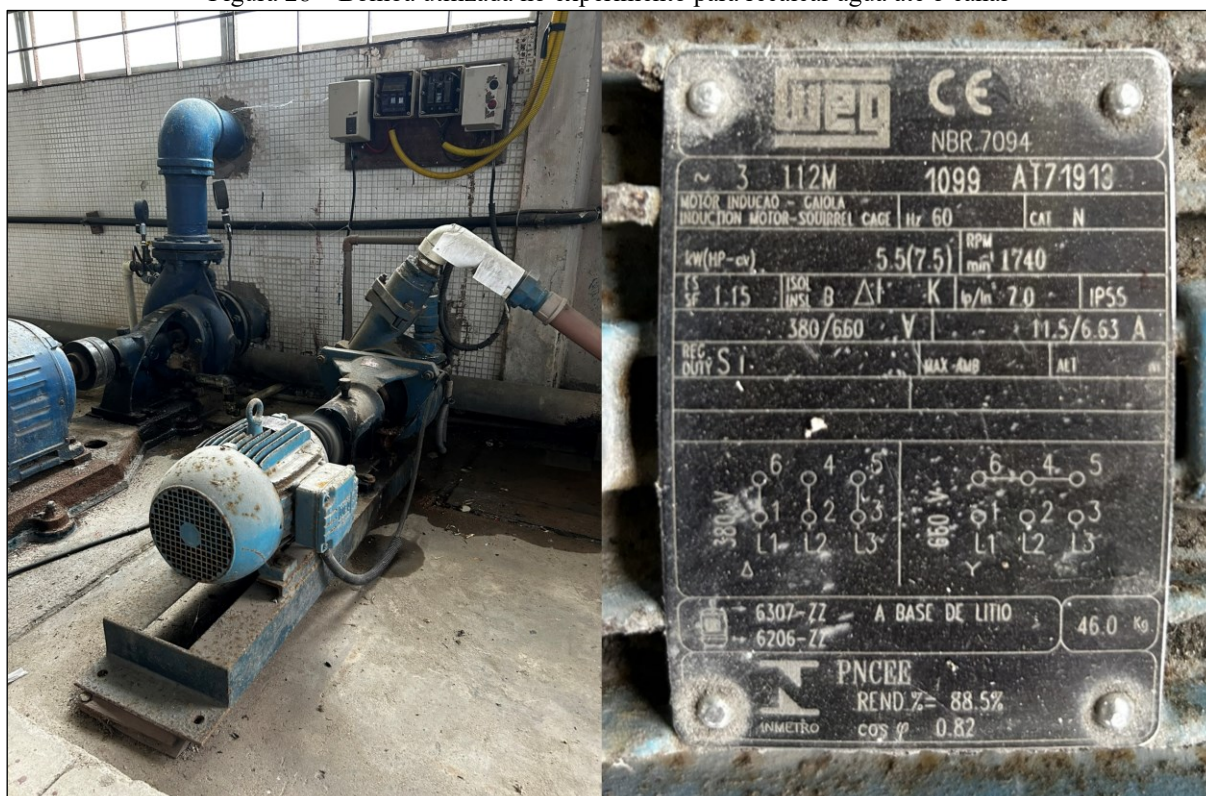
Tabela 4 – Características da Motobomba do Sistema Experimental

Item	Característica
Marca	WEG

Item	Característica
Modelo	AT71913
Potência	7,5 CV
Tensão Trifásica	380 V
Frequência	60 Hz
Rotação Nominal	1740 RPM
Altura Manométrica Máxima	50 m.c.a.
Vazão Volumétrica Máxima	17,604 m³/h

Fonte: ANJOS (2020).

Figura 28 – Bomba utilizada no experimento para recalcar água até o canal



Fonte: O Autor (2024).

O quadro elétrico do motobomba é acionado a partir de um quadro de comando, em chapa metálica, devidamente isolado, protegido com pintura eletrostática. No quadro, há inúmeros circuitos elétricos que acionam as bombas do sistema experimental, o qual é composto de botoeira liga-desliga da bomba que alimenta o canal de acrílico (Anjos, 2020).

4.1.2 Sistema de Mudança de Declividade do Canal de Acrílico

Para a mudança de declividade do sistema experimental, utiliza-se um elevador de carga (capacidade de 3.000 kg), acoplado a estrutura do canal de acrílico, que funciona através da

ativação elétrica de um motor trifásico. O elevador de carga é controlado a partir de um painel botoeira sobe e desce, permitindo, aos operadores, ajustar a inclinação do canal de acrílico. A inclinação máxima é de, aproximadamente, 25°, com elevação de 3,0 m de altura da parte articulada/acoplada ao elevador de carga (Anjos, 2020).

Em suma, o canal de acrílico possui três trechos conectados por duas articulações e os trechos da extremidade sempre permanecem na horizontal, enquanto apenas o Trecho 2, da Figura 25, ganha declividade à medida que o Trecho 3 sofre deslocamento vertical.

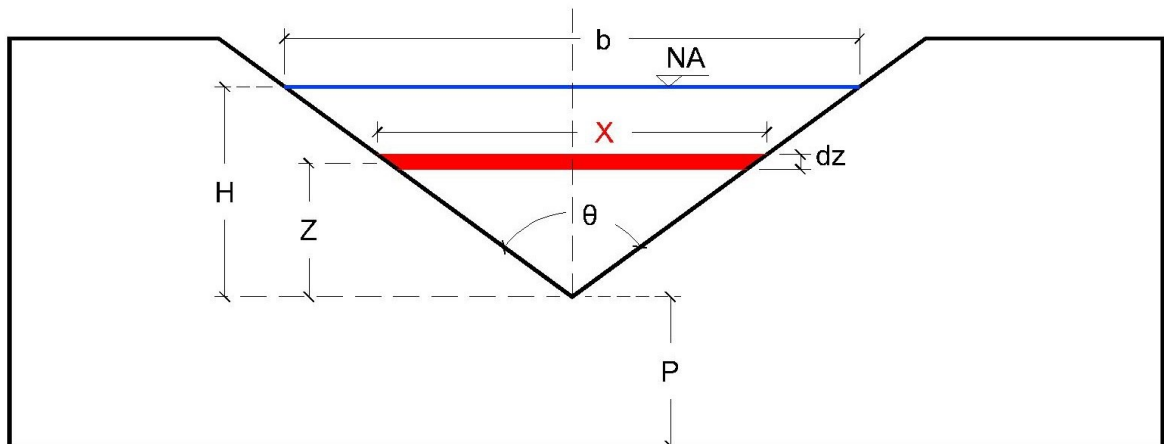
Ressalta-se que, apesar da possibilidade de mudança de declividade presente no sistema experimental, para este trabalho, utilizou-se o canal plenamente na horizontal, considerando-se uma baixa declividade de 1%.

4.1.3 Dispositivo Medidor de Vazão

Para pequenos escoamentos, Anjos (2020) afirma que o vertedor triangular representa com maior fidelidade a medição das pequenas vazões (UFOP, 2014). A determinação da expressão para determinar a vazão leva em consideração que $b = f(Z)$, ou seja, b não será constante. Assim, realizando-se a integração considerando $b = f(Z)$, encontra-se a Equação (11) (Anjos, 2020). A Figura 30 apresenta as variáveis da respectiva Equação.

$$Q = \frac{8}{15} \times c_d \times H^{\frac{5}{2}} \times \tan\left(\frac{\theta}{2}\right) \times \sqrt{2 \times g} \quad (11)$$

Figura 29 – Vertedouro Triangular



Fonte: Adaptado de UFOP (2014) *apud* Anjos (2020).

Ainda, de acordo com Lenz (1943), os vertedores triangulares possuem dependência direta de θ , mas o c_d compreende-se dentro do intervalo de 0,58 e 0,62.

A partir daí, para determinação da vazão no canal de acrílico, utilizou-se o vertedor triangular de abertura com $60,8^\circ$, existente no Laboratório de Hidráulica, Hidráulica Computacional e Hidrologia da UFPE, o qual pode ser observado na Figura 30.

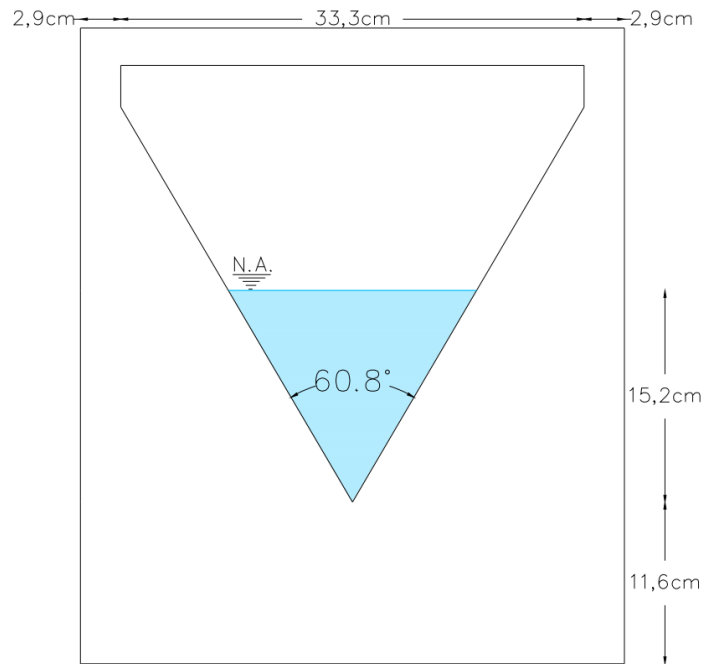
Figura 30 – Vertedor Triangular de Chapa Metálica para Medição de Vazão



Fonte: O Autor (2024).

Calculou-se a vazão, então, a partir da Equação (11). Levou-se em consideração a variação do c_d , de 0,58 até 0,62, na literatura (Lenz, 1943) para vertedores triangulares de parede esbelta. Assim, adotou-se um c_d médio igual 0,60, conforme o estudo realizado por Anjos (2020). A gravidade adotada foi de $9,81 \text{ m/s}^2$, assim como na subseção 4.2.3. O valor de H (carga vertente) foi medido conforme a diferença da lâmina d'água estabilizada pela distância do vértice do vertedor até o fundo do canal, a ser observado na Figura 31. A partir da medição, obteve-se uma vazão de aproximadamente 7 L/s , a qual foi utilizada como a condição de contorno do *inlet*, apresentada na subseção 4.2.3 e nas Figuras 39 e 40.

Figura 31 – Croqui Esquemático do Método Utilizado para Medição de Vazão do Canal



Fonte: O Autor (2024).

4.2 MODELAGEM NUMÉRICA

Para execução desta metodologia, seguiu-se as boas práticas utilizadas por Silva (2017), Couto (2019), Daniel Júnior (2021), além da própria ANSYS (2016; 2021a; 2021b; 2021c).

4.2.1 Criação de Geometria

Como apresentado na seção 3.2, esta é a etapa destinada a criação da geometria que representa o domínio computacional a ser modelado. Visando compreender de forma mais profunda os fenômenos presentes no canal, alinhando-se com a proposta de Silva (2017), optou-se pela elaboração de um corpo único em 3D. A ANSYSTM disponibiliza dois pacotes de CAD para a elaboração do domínio computacional: SpaceClaimTM e DesignModelerTM. Tratando-se de uma geometria simples hexaédrica, o segundo *software* foi utilizado, já que demonstra bom desempenho na criação de corpos simples e é de fácil utilização. Os dados da geometria podem ser observados na Figura 25, considerando-se que todas as 3 (três) partes estavam sem qualquer inclinação aparente, com as articulações em θ igual 0 (zero). Representou-se, ainda, uma inclinação de 1%, elevando-se o início da geometria em 0,1513 m, conforme a Equação (12). O domínio computacional criado no ANSYS DesignModelerTM pode ser observado na Figura

32. A geometria conta com base de 15,13m, altura de 0,49m e largura de 0,375m. Salienta-se que, devido sua simplicidade, esta geometria foi criada em corpo único, visando também facilitar a etapa posterior: geração da malha computacional.

$$i = \frac{\Delta y}{\Delta x} \quad (12)$$

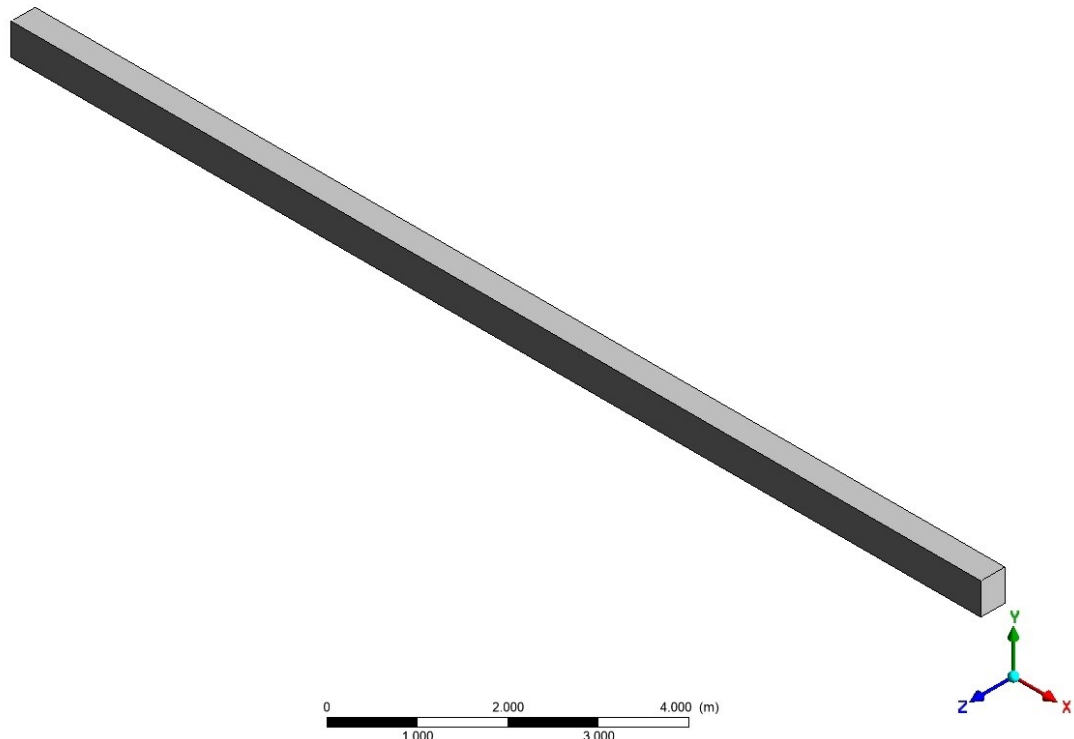
$$0,01 = \frac{\Delta y}{15,13}$$

$$\Delta y = 15,13 \times 0,01 = 0,1513 \text{ m}$$

Em que: i é a declividade, em m/m; Δy é a variação da altura, em m, e; Δx é a variação do comprimento, em m.

Figura 32 – Geometria em 3D criada no DesignModeler™

Ansys
2023 R2
STUDENT



Fonte: O Autor (2024).

Na próxima subseção, demonstram-se os métodos utilizados na geração da malha computacional, necessária para discretizar o domínio criado e possibilitar as interpolações

matemáticas que acompanham o escoamento dos fluidos estudados através do domínio computacional.

4.2.2 Geração da Malha

Conforme abordado anteriormente, esta é a etapa em que o domínio computacional é dividido em n volumes de controle, a fim de obter a solução para os modelos equacionais propostos durante o pré-processamento. Inicialmente, uma malha extremamente refinada, de 448.440 elementos, foi gerada, visando não tornar a simulação dependente de seu refinamento. Ressalta-se que a licença para uso estudantil da ANSYSTM possui limitação de 550.000 elementos para técnicas de CFD. Assim, visou-se, de início, ir perto do limite que o *software* disponível suporta. A posteriori, um teste de independência de malha foi realizado a partir de 6 diferentes configurações, engrossando gradativamente os elementos da malha e mudando suas características, principalmente no que tange a região da camada limite. Esse teste é necessário para que se obtenha a melhor relação de custo computacional e resultado, em que se alcance uma malha com a menor quantidade de elementos possível, diminuindo o custo computacional, mas que não tenha interferência, ou a mínima possível, nos resultados encontrados.

Para a geração dessas malhas, utilizaram-se algumas ferramentas especiais, como: (i) o método de controle de malha MultiZone, apresentado na subseção 3.3.1, cujo seu método *Hex* conseguiu induzir para que a malha fosse completamente hexaédrica, estruturada e mapeada; (ii) *Sizing*, apresentado na subseção 3.3.2, para que fosse possível controlar o tamanho máximo dos elementos, e; (iii) *inflation*, apresentado na subseção 3.3.3, objetivando-se detalhar a camada limite e não perder os fenômenos que ali ocorrem. A Tabela 5 apresenta as características das malhas geradas, com a quantidade de elementos e nós, além das configurações de *Inflation* e *Sizing* específicas utilizadas para cada uma delas. Ressalta-se, que, apesar de uma numeração apresentada na primeira coluna da Tabela 5, este trabalho nomeia as malhas com o seu número de elementos.

Tabela 5 – Características das Malhas

Malha	<i>Sizing</i>	<i>Inflation</i>			Nós	Elementos
	<i>Max Size [m]</i>	<i>Number of Layers</i>	<i>Growth Rate</i>	<i>Maximum Thickness</i>		
1	0,035	6	1,2	0,035	182.280	168.004
2	0,035	7	1,2	0,020	199.640	184.891
3	0,035	8	1,2	0,020	217.000	201.778

Malha	Sizing		Inflation		Nós	Elementos
	Max Size [m]	Number of Layers	Growth Rate	Maximum Thickness		
4	0,030	6	1,2	0,030	273.240	254.015
5	0,025	7	1,2	0,020	441.896	415.110
6	0,025	8	1,2	0,020	475.888	448.440

Fonte: O Autor (2024).

Dentre os procedimentos de boas práticas realizados durante a elaboração deste projeto, os parâmetros de qualidade de malha também foram cuidadosamente monitorados. Conforme os principais parâmetros apresentados na subseção 3.3.4, a Tabela 6 apresenta os valores encontrados para cada uma das malhas geradas. Observa-se que todas se encontram dentro dos limites demonstrados nas Figuras 11 e 13.

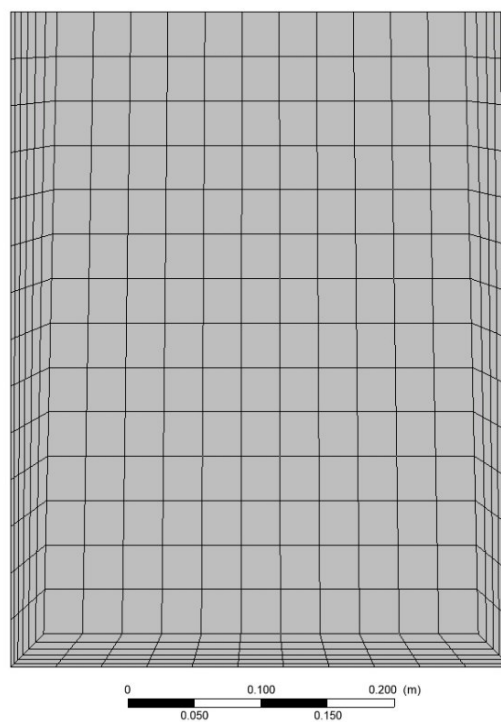
Ademais, dentre as Figuras 33 e 38, é possível observar a característica geral, para o plano YZ, de cada uma das malhas utilizadas para o teste de independência de malha.

Tabela 6 – Parâmetros de Qualidade da Malha

Malha	Elementos	Orthogonal Quality		Skewness		Aspect Ratio	
		Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.
1	168.004	0,69	1	1,30E-03	0,51	1,18	14,02
2	184.891	0,67	1	7,26E-04	0,51	1,11	31,92
3	201.778	0,66	1	7,26E-04	0,51	1,11	40,78
4	254.015	0,70	1	9,37E-04	0,51	1,17	14,03
5	415.110	0,69	1	5,22E-04	0,51	1,08	22,82
6	448.440	0,69	1	5,22E-04	0,51	1,08	29,13

Fonte: O Autor (2024).

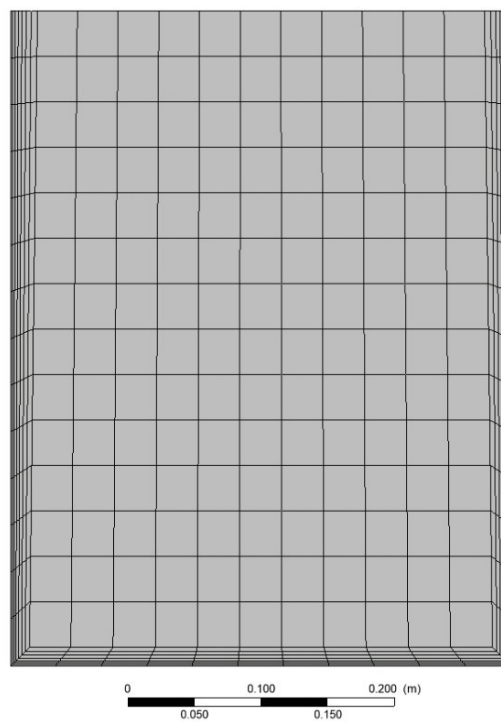
Figura 33 – Malha 1



Ansys
2023 R2
STUDENT

Fonte: O Autor (2024).

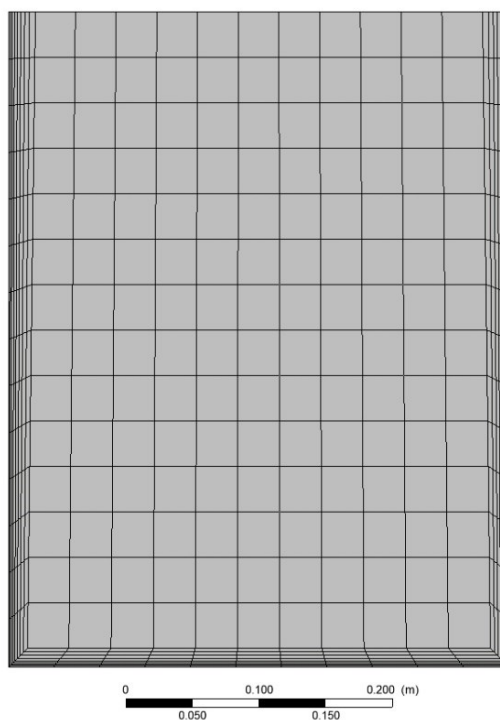
Figura 34 – Malha 2



Ansys
2023 R2
STUDENT

Fonte: O Autor (2024).

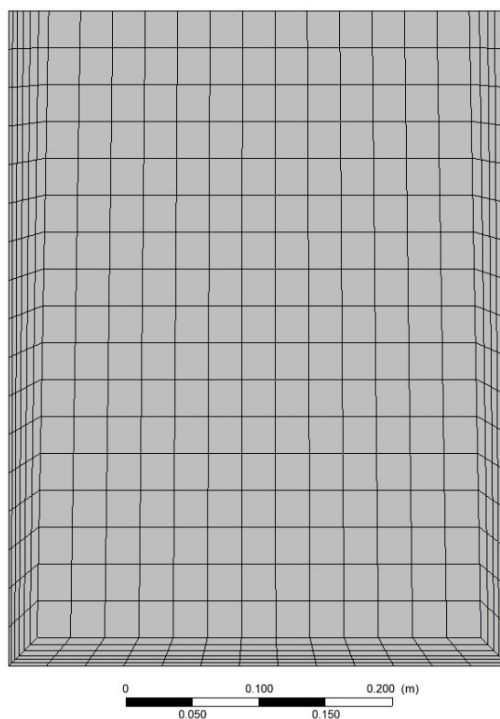
Figura 35 – Malha 3



Ansys
2023 R2
STUDENT

Fonte: O Autor (2024).

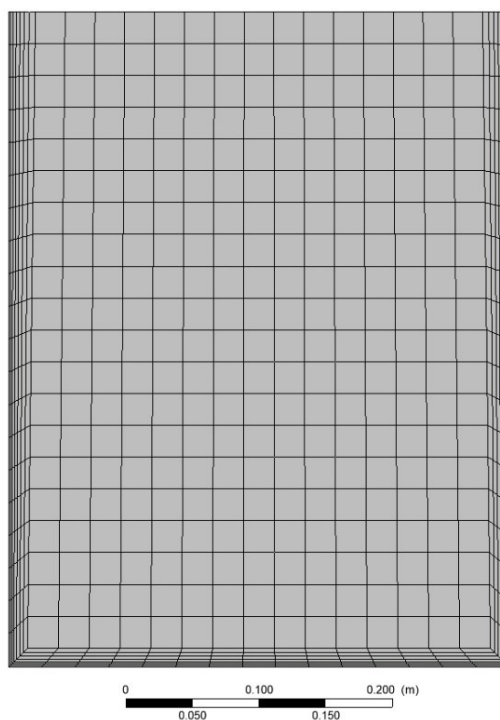
Figura 36 – Malha 4



Ansys
2023 R2
STUDENT

Fonte: O Autor (2024).

Figura 37 – Malha 5

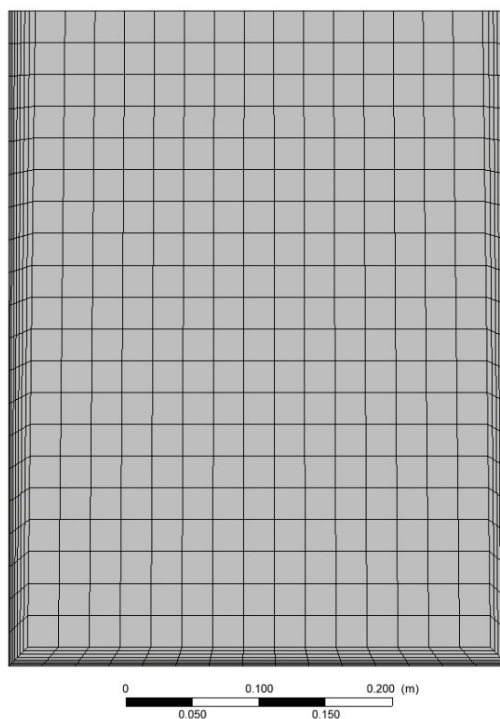


Ansys
2023 R2
STUDENT



Fonte: O Autor (2024).

Figura 38 – Malha 6



Ansys
2023 R2
STUDENT



Fonte: O Autor (2024).

Para mais, a próxima seção tratará a respeito das abordagens utilizadas para o pré-processamento do modelo computacional.

4.2.3 Elaboração do Pré-processamento

Em acordo com os trabalhos apresentados no estado da arte das seções 3.7 e 3.8 (Morais *et al.*, 2016; Urbanek *et al.*, 2019; Regueiro-Picallo *et al.*, 2016; Dianat *et al.*, 2017), nesta pesquisa utilizou-se a modelagem VoF, de forma implícita, para modelar a multifase dos fluidos estudados. Ainda, segundo Daniel Júnior (2021), a equação de turbulência *SST k- ω* apresenta excelente comportamento para projetos que envolvam superfície livre, de forma que os fenômenos próximos à camada limite e à limítrofe da superfície livre são lidos corretamente. Assim sendo, obtendo-se um número de Reynolds de aproximadamente 8605, conforme a Equação (4), adotou-se o para este trabalho um comportamento de escoamento turbulento, a ser calculado pelas equações do *SST k- ω* . As propriedades dos materiais utilizados, água líquida e ar, foram retiradas do padrão da biblioteca do ANSYS Fluent™ e podem ser observadas na Tabela 7. O coeficiente de tensão superficial da interação entre as fases foi definido como 0,72 N/m.

Tabela 7 – Propriedades dos Materiais utilizados no Fluent™

Material	Massa Específica ρ [kg/m ³]	Viscosidade [kg / (m s)]
Água líquida	998,200	0,001003
Ar	1,225	1,7894E-05

Fonte: O Autor (2024).

Partindo-se para a definição das condições de contorno, no *inlet* (entendido como a entrada do canal) foi medida e imposta a velocidade e altura de água do escoamento. Para a velocidade, utilizou-se do valor de vazão medido no ensaio experimental, apresentado na seção 4.1, transformado em velocidade a partir da Equação (13). Do ensaio experimental, utilizou da vazão medida, de 7 L/s, e da altura de água, 26,8 cm, conforme pode ser observado na Figura 31. A partir daí, obteve-se, então, uma velocidade de 0,06965 m/s.

$$V = \frac{Q}{A_M} \quad (13)$$

$$\rightarrow 7 \text{ L/s} \rightarrow 0,007 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$\therefore V = \frac{0,007}{0,268 \times 0,375} \cong 0,06965 \text{ m/s}$$

Em que: V é a velocidade média, em m/s; Q é a vazão, em m³/s, e; A_M é a área molhada, em m².

Ainda na modelagem geral, definiu-se que a solução do projeto se daria baseada na pressão, com aceleração da gravidade, para baixo, de 9,81 m/s²; com formulação de velocidade absoluta e de forma transiente. A parte superior do domínio computacional foi imputada como *Open Channel*, de forma que o *software* compreendesse que esta parte estava aberta para a atmosfera. Um croqui esquemático das condições de contorno pode ser observado na Figura 39. A Figura 40 apresenta as condições de contorno devidamente modeladas dentro do ANSYS Fluent™.

Assim, prosseguiu-se para o estudo do estado transiente do escoamento. O tempo total de simulação deve ser considerado de tal forma que o fluido escoe até que a variável atinja estabilidade, ou seja, quando não haja alterações significativas em seus valores (Silva, 2017). Para este trabalho, esse tempo é demonstrado e discutido no início da seção 5.1, a partir da Figura 46. Com isso, a partir da definição da velocidade com a Equação (13) e das dimensões da discretização do domínio computacional da subseção 4.2.2, obtém-se o Número de Courant, conforme a Equação (14).

Figura 39 – Croqui Esquemático das Condições de Contorno, em $t = 0$

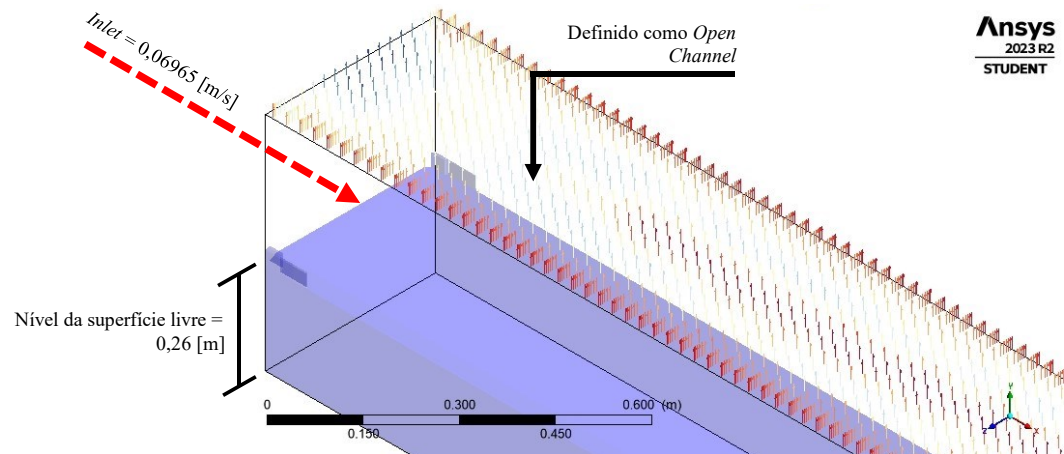
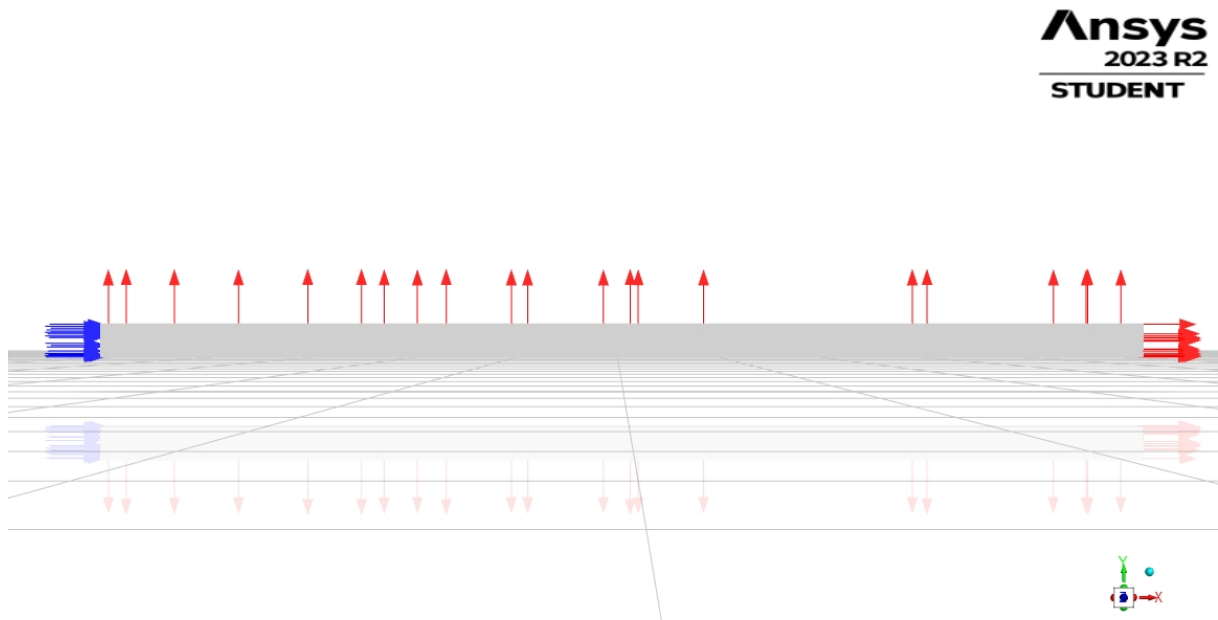


Figura 40 – Condições de Contorno no ANSYS Fluent™



$$\text{Courant} = \frac{V\Delta t}{\Delta x} \quad (14)$$

Em que: V é velocidade do escoamento, em m/s; Δt é o *time step*, ou passo de tempo em tradução livre, e; Δx é o tamanho do elemento obtido a partir da discretização do domínio computacional em uma malha.

O Número de Courant, dentre outras coisas, é de suma importância para a definição do *time step*, parâmetro fundamental para um estudo em estado transiente. Para isso, realiza-se um

estudo de independência de *time step* para o projeto, de forma que a solução encontrada não dependa do *time step* definido, mas que também não possua um custo computacional muito oneroso. Assim, utilizou-se uma malha bem refinada para não interferir nos resultados, Malha 6, Figura 38, no caso deste trabalho. Daí, varia-se o tamanho do *time step* para diferentes Números de Courant. Os *time steps* estudados podem ser observados na Tabela 8.

Tabela 8 – Proposta de Teste de *Time Step* para Diferentes Números de Courant

V [m/s]	Time Step [Δt] [s]	Δx [m]	Número de Courant
0,06965	0,010	0,0021	0,33
	0,015		0,50
	0,025		0,83
	0,050		1,66
	0,075		2,50
	0,100		3,33

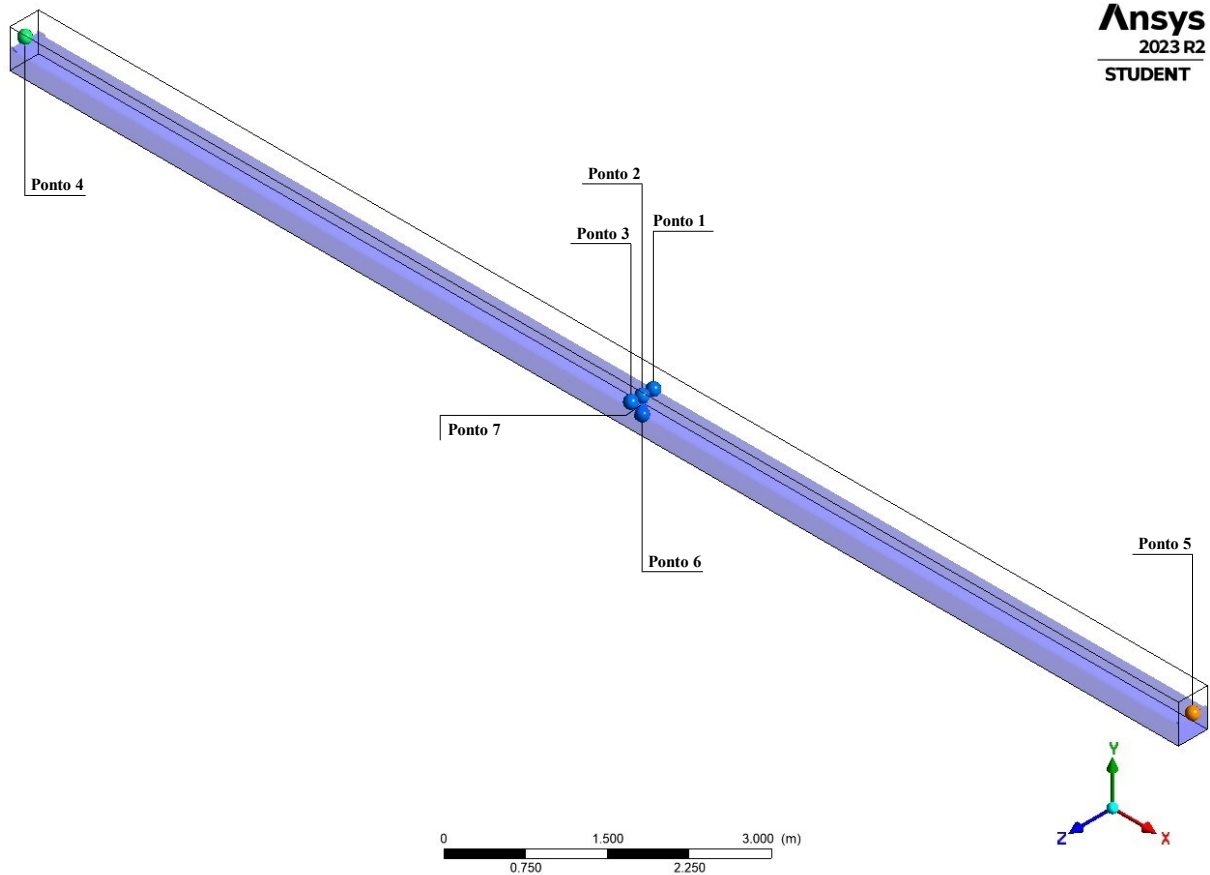
Fonte: O Autor (2024).

Para definição da independência do *time step*, monitorou-se a velocidade do escoamento em diferentes pontos. Foram definidos 7 (sete) pontos ao longo do canal, conforme Figura 41. As coordenadas cartesianas desses pontos podem ser verificadas na Tabela 9. A disposição dos pontos foi dada segundo a importância do escoamento, abrangendo assim o *inlet* e *outlet*, além de diferentes pontos de uma seção intermediária, conforme a verificação do modelo da seção 5.3. Nessa região, por não possuir influência das condições de entrada e saída, foram inseridos 5 (cinco) pontos para monitoramento dos escalares de velocidade.

Tabela 9 – Coordenadas Cartesianas dos Pontos Definidos para o Teste de *Time Step*

Pontos	X [m]	Y [m]	Z [m]
1	8,0000	0,2680	0,0417
2	8,0000	0,2680	0,1875
3	8,0000	0,2680	0,3333
4	0,0100	0,2900	0,1875
5	15,1290	0,2750	0,1875
6	8,0000	0,0544	0,1875
7	8,0000	0,1633	0,1875

Fonte: O Autor (2024).

Figura 41 – Pontos para Monitoramento do Teste de *Time Step*

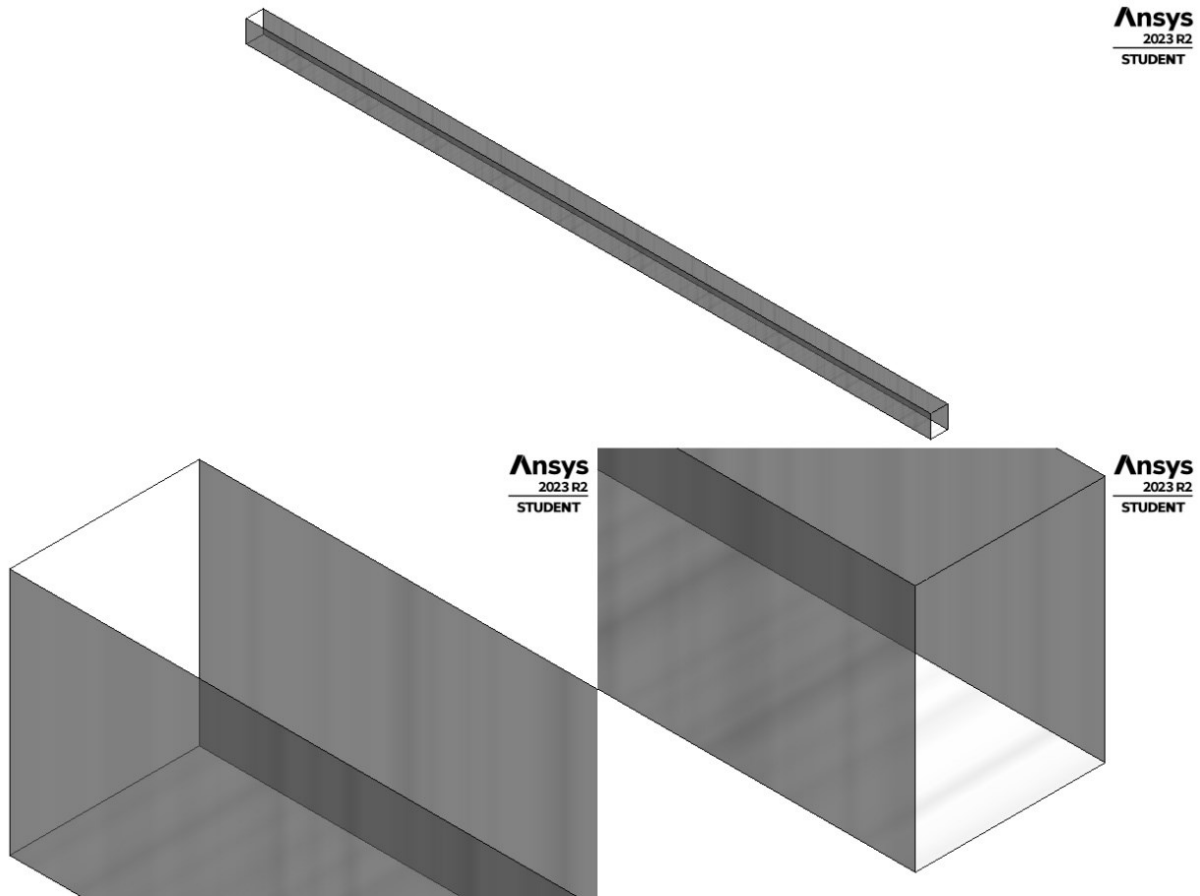
Fonte: O Autor (2024).

4.2.3.1 Modelagem de Diferentes Rugosidades nas Paredes

Devido a importância do parâmetro de rugosidade da parede para o fenômeno a ser estudado por esse trabalho, diferentes materiais foram modelados. A Figura 42 apresenta as paredes que foram alvo dessa condição de contorno: em branco, o fundo do canal; em cinza, as laterais do canal.

Conforme explanado na subseção 3.4.11, o ANSYS Fluent™ apenas aceita a rugosidade equivalente da areia de Nikuradse (1933), k_s , como condição de contorno para suas paredes, chamada por ele de *Roughness Height* [m]. Assim, como a rugosidade do Brasil é dada majoritariamente pelo coeficiente de Manning (1891), n , utilizou-se a equação proposta por Yen (2004), a qual foi demonstrada pela Equação (5), para transformação dos coeficientes. A Tabela 10 apresenta os resultados obtidos.

Figura 42 – Condições de Parede - em Branco, *Wall* de fundo, em Cinza, *Walls* laterais



Fonte: O Autor (2024).

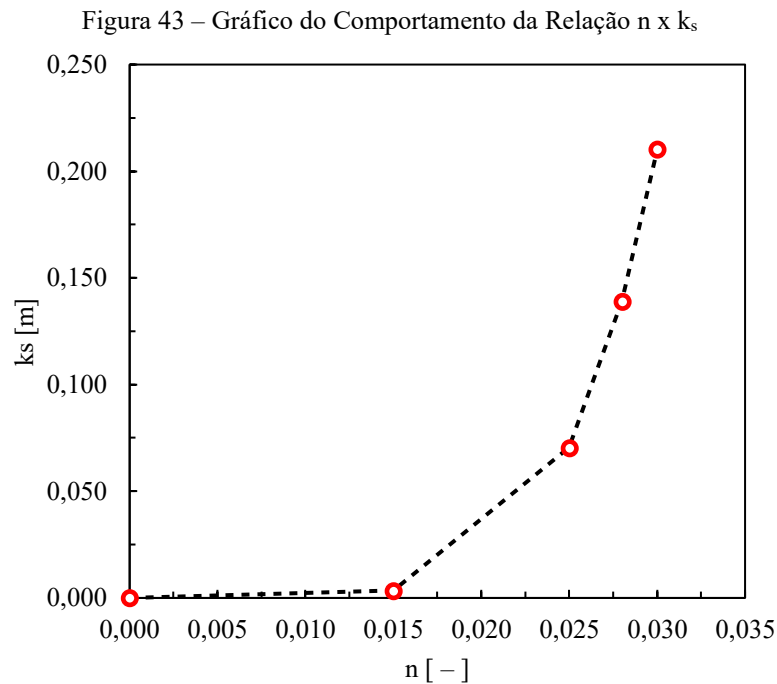
Tabela 10 – Rugosidade de Manning e Nikuradse para Diferentes Materiais Modelados

Materiais	n [-]	k_s [m]
Acrílico	0	0
Concreto	0,015	0,0032873802857143
Laterita	0,025	0,0704599684009411
Gabião	0,028	0,1390754840271250
Revestimento Natural	0,030	0,2103923382857150

Fonte: O Autor (2024).

O Acrílico representa o revestimento existente no sistema experimental utilizado, conforme a subseção 4.1.1. Concreto foi definido já que representa o principal revestimento escolhido para projetos que envolvam a retificação e canalização de cursos hídricos, conforme a subseção 2.2.2.1. Revestimento natural foi definido para buscar representar o objetivo desse trabalho e favorecer uma drenagem que esteja em sintonia com a natureza, conforme a subseção 2.1.5. Para mais, Gabião e Laterita também foram modelados, objetivando apresentar revestimentos alternativos ao concreto, mas que propiciem um pouco de favorecimento à infiltração.

Colocando-se os resultados encontrados em um gráfico, conforme a Figura 43, nota-se que a conversão possui um caráter exponencial, de acordo com o que se era esperado ao observar a Equação (5). Tal fato também é verificado com os resultados encontrados por esta pesquisa, tendo como exemplo o comportamento a ser observado e discutido a partir da Figura 80.



Fonte: O Autor (2024).

4.2.4 Definição e Monitoramento do Processamento

Nesta etapa foram definidos os critérios de paradas, além de monitorados e encontrados os resíduos de erro do cálculo numérico para que a convergência do modelo fosse checada, conforme abordado na seção 3.5. Inicialmente, ainda na interface entre o pré-processamento e o processamento, define-se os métodos numéricos a serem utilizados para a solução dos modelos equacionais propostos para o projeto. Conforme a ANSYS (2021b), os métodos numéricos utilizados podem ser observados na Tabela 11.

Tabela 11 – Métodos Numéricos para Solução dos Modelos Equacionais

Variável	Método Numérico
Acoplamento Pressão-Velocidade	
Esquema	<i>Coupled</i>

Variável	Método Numérico
Discretização Espacial	
Gradiente	<i>Least Squares Cell Based</i>
Pressão	<i>PRESTO!</i>
Transferência de Movimento	<i>Second Order Upwind</i>
Fração Volumétrica	<i>Compressive</i>
Energia Turbulenta Cinética	<i>Second Order Upwind</i>
Taxa de Dissipação Específica	<i>Second Order Upwind</i>
Formulação Transiente	
	<i>First Order Implicit</i>

Fonte: O Autor (2024).

O acompanhamento dos resíduos de erros dos cálculos numéricos foram importantes para o entendimento de em quais testes, seja de independência de malha ou de *time step*, o modelo tendeu a convergir ou divergir. A atribuição dos critérios de parada define se o cálculo é convergente ou divergente. Para este trabalho, a Tabela 12 apresenta os valores atribuídos. Neste caso, foram utilizados os valores padrão do ANSYS Fluent™. Um exemplo dos resíduos de erro convergentes neste trabalho pode ser observado na Figura 44. Um exemplo dos resíduos de erro divergentes neste trabalho pode ser observado na Figura 45.

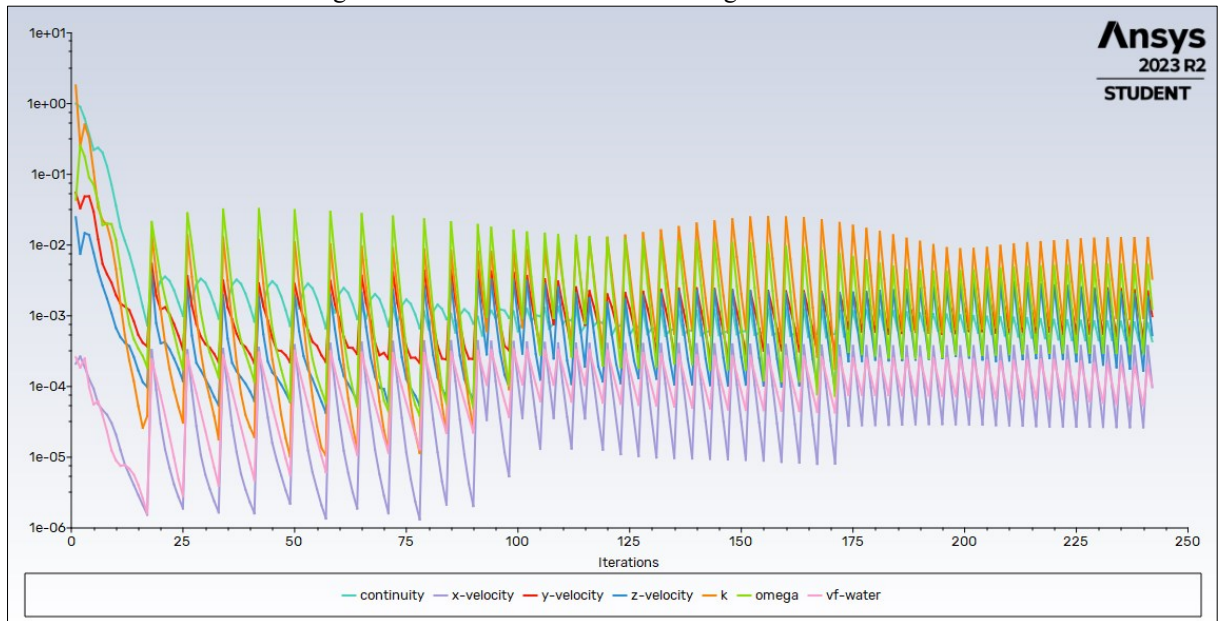
Observa-se que, na Figura 44, os resíduos encontram-se dentre dos critérios absolutos da Tabela 12. Ao se obter valores abaixo de 0,001, o método numérico passa para a iteração do próximo *time step*. Em contraponto, na Figura 45, observa-se que os resíduos não descem abaixo 0,1, passando para o próximo *time step* somente após 20 interações.

Tabela 12 – Critérios de Parada para Convergência Numérica, conforme padrão do ANSYS Fluent™

Variável Residual	Critérios Absolutos
<i>continuity</i>	0,001
<i>x-velocity</i>	0,001
<i>y-velocity</i>	0,001
<i>z-velocity</i>	0,001
<i>k</i>	0,001
<i>omega</i>	0,001
<i>vf-water</i>	0,001

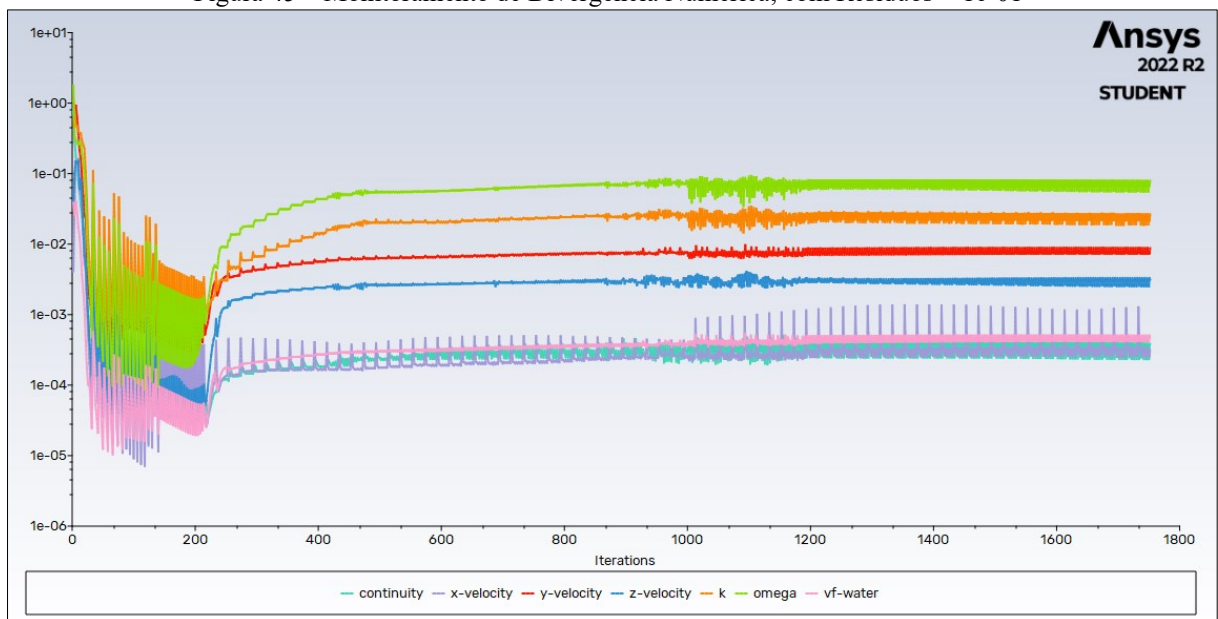
Fonte: O Autor (2024).

Figura 44 – Monitoramento de Convergência Numérica



Fonte: O Autor (2024).

Figura 45 – Monitoramento de Divergência Numérica, com Resíduos > 1e-01



Fonte: O Autor (2024).

4.2.5 Análise do Pós-processamento

Esta é a última fase do projeto, a qual analisa, verifica e valida os resultados obtidos. Um projeto de simulação computacional não segue um fluxo padrão de um projeto convencional. Por vezes, os resultados encontrados são apenas parciais, reiniciando-se o modelo, refazendo-se a geometria, buscando-se maiores ou menores detalhes, novas

adaptações e criações de superfícies que auxiliem numa melhor discretização da malha (ANSYS, 2021a). Realizam-se testes sem a multifase aplicada, sem turbulência, sem estado transiente etc. Sendo assim, todos os resultados foram analisados por meio de outro *software* presente no rol de pacotes da ANSYS™, o CFD Post™. Com tais observações, novas otimizações são realizadas e verificadas, conforme abordado no Capítulo 5 a seguir.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste Capítulo são apresentados os resultados obtidos a partir da realização de simulações numéricas voltadas a resolução de problemas de superfície livre envolvendo canais hidráulicos. Para tal, a discussão dos resultados está dividida em 4 (quatro) etapas: (i) validação do *Time Step*; (ii) validação da malha; (iii) verificação do modelo fluidodinâmico, analisando-se diferentes escalares, e; (iv) análise quanti-qualitativa, visando estudar os contornos velocidade para diferentes planos e diferentes materiais de composição da parede do canal.

5.1 VALIDAÇÃO DE INDEPENDÊNCIA DE *TIME STEP*

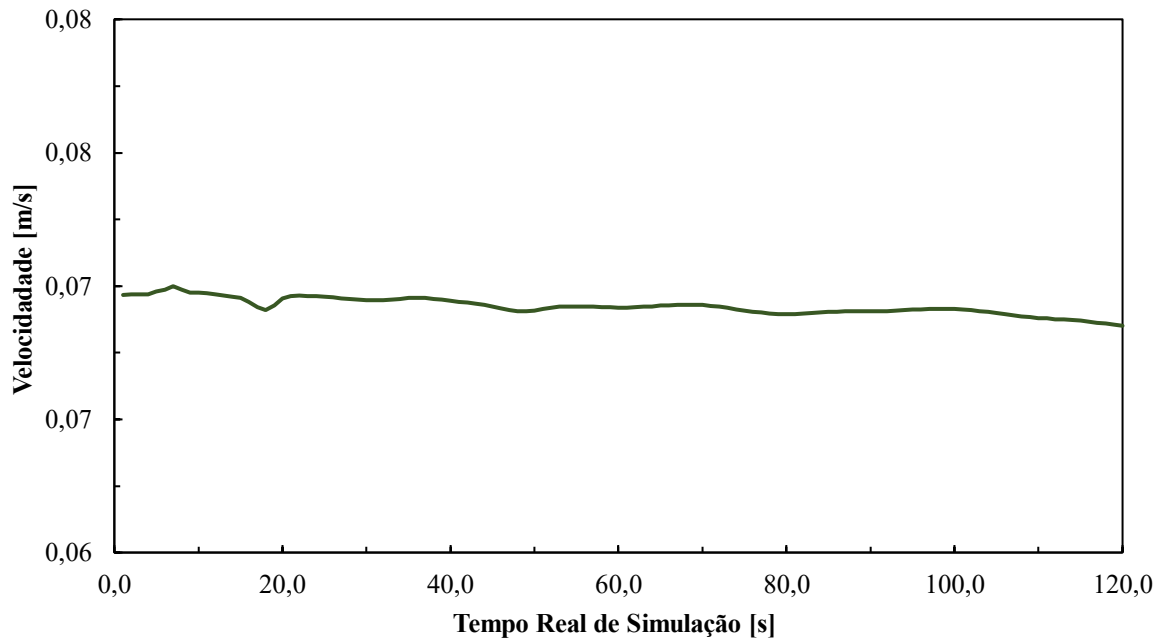
Inicialmente, definiu-se o tempo real de simulação para o projeto de simulação aqui proposto. O tempo real refere-se ao efetivo tempo de fenômeno simulado, não estando relacionado ao tempo computacional necessário para realizar tal simulação. Por exemplo, 10 segundos de tempo real de simulação pode demorar dias de tempo computacional para conclusão dos cálculos numéricos. Assim, simulou-se um grande período de tempo real, cerca de 120 (cento e vinte) segundos, objetivando observar o momento em que o fenômeno se encontra devidamente estabilizado, mas que também não acresça demais o tempo de simulação do projeto e o custo computacional requerido. Para tal, o Ponto 7 foi utilizado. A Tabela 13 demonstra o valor mínimo e máximo encontrado, além do erro padrão calculado entre todos os valores da simulação. Este erro é dado a partir da razão entre o desvio padrão da amostra pela raiz da quantidade da amostragem. Além disso, a Figura 46 apresenta o comportamento que o estudo transiente possuiu ao passar do tempo. Observa-se determinada instabilidade durante os 20 (vinte) segundos iniciais. A partir do segundo 24 (vinte e quatro), o gráfico adotou um comportamento mais linear. Assim, para o teste de *time step*, adotou-se um intervalo de 24 (vinte e quatro) a 24,2 (vinte e quatro vírgula dois) segundos para determinação do número de *time step* requerido para alcançar a estabilidade. O intervalo existe porque cada *time step* pode requerer um número a mais de simulação para alcançar um número inteiro.

Tabela 13 – Erro Padrão Encontrado para Definição do Tempo Real de Simulação

Valor Máximo [m/s]	Valor Mínimo [m/s]	Erro Padrão [%]
0,069996	0,068516	0,0028%

Fonte: O Autor (2024).

Figura 46 – Definição do Tempo Real de Simulação



Fonte: O Autor (2024).

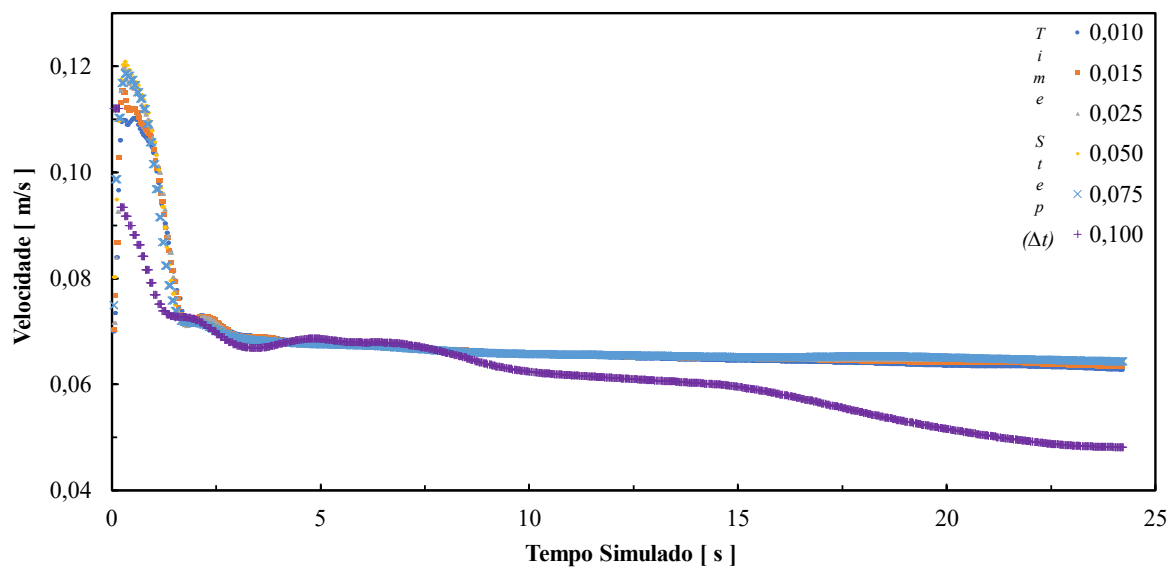
A partir daí, simulou-se a variação do escalar da velocidade ao longo do tempo para diferentes números de Courant, conforme a Tabela 8, para os 7 (sete) pontos distintos, conforme a Tabela 9 e a Figura 41. Dentre as Figuras 47 e 53, pode-se observar os resultados obtidos.

Analisando-se as Figuras, confirma-se que o modelo alcança a estabilidade prevista e adquire um comportamento linear na variação de velocidade. Conforme pode ser observado nas Figuras 47, 48, 49, 50, 52 e 53, o *time step* de 0,1 (zero vírgula um) é bem discrepante dos demais, o que é consonante com a Figura 45. Sendo assim, foi imediatamente descartado.

O *time step* de 0,075 também apresenta um comportamento inadequado ao se observar as Figuras 48 e 50. Os demais *time steps* apresentaram um comportamento semelhante, tendendo que se escolha o de menor custo computacional, principalmente no que tange as Figuras 48, 51, 52 e 53. Nas Figuras 47 e 49, os *time steps* restantes possuem comportamento parecido, principalmente os *time steps* de 0,050 e 0,025.

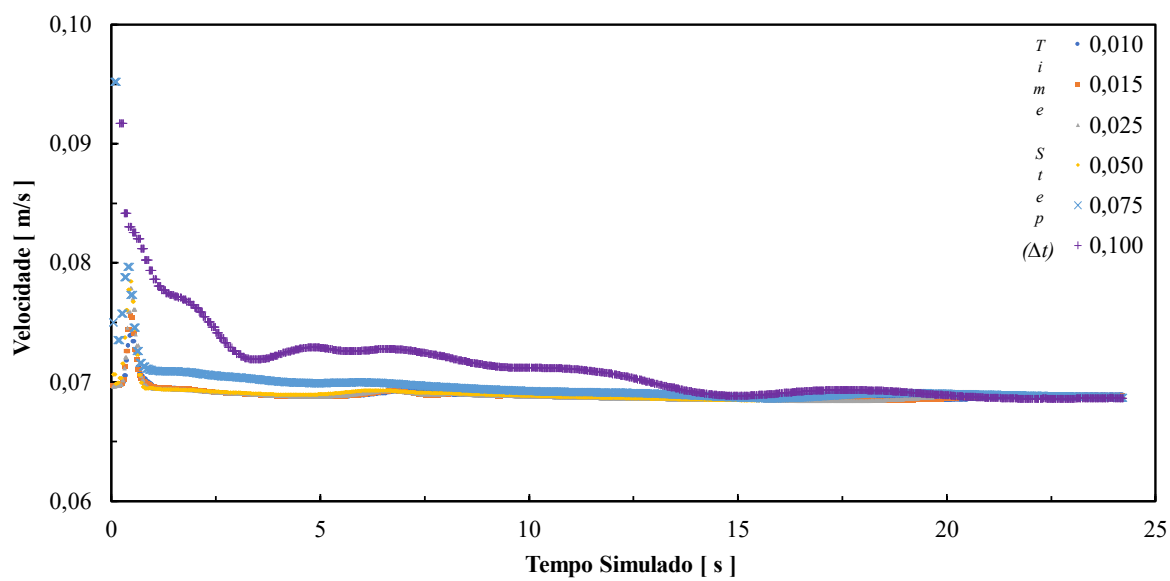
A partir daí, uma análise mais minuciosa foi requerida. Observando-se com maior cuidado para a Figura 50, repara-se que o *time step* de 0,025 apresenta um comportamento gráfico mais compatível com os *time steps* menores, 0,010 e o 0,015, diferentemente do que ocorre com o *time step* de 0,050.

Figura 47 – Variação de Velocidade no Ponto 1



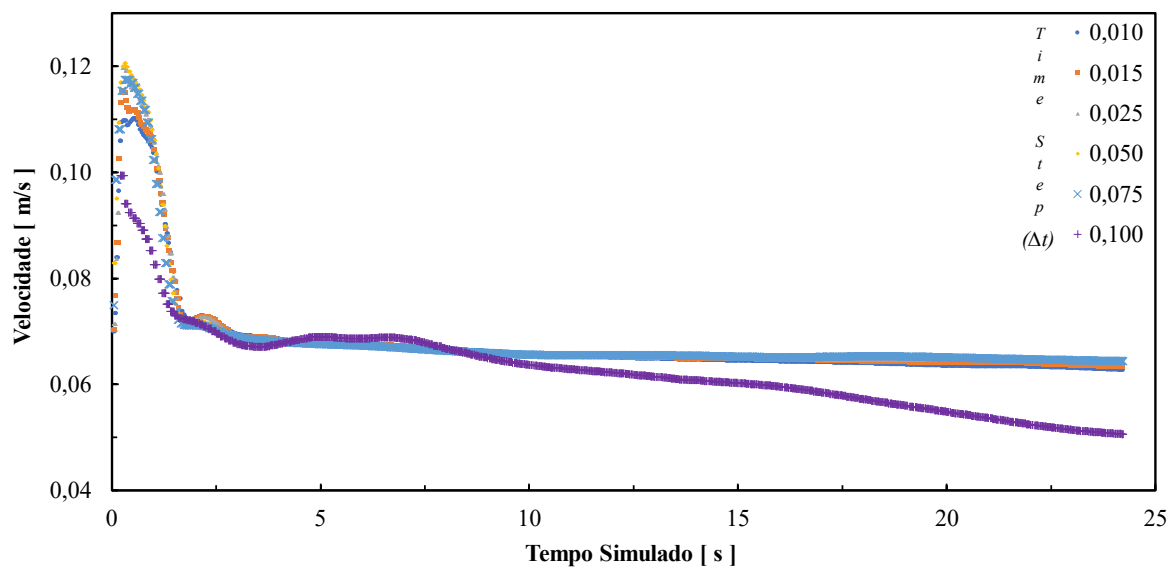
Fonte: O Autor (2024).

Figura 48 – Variação de Velocidade no Ponto 2



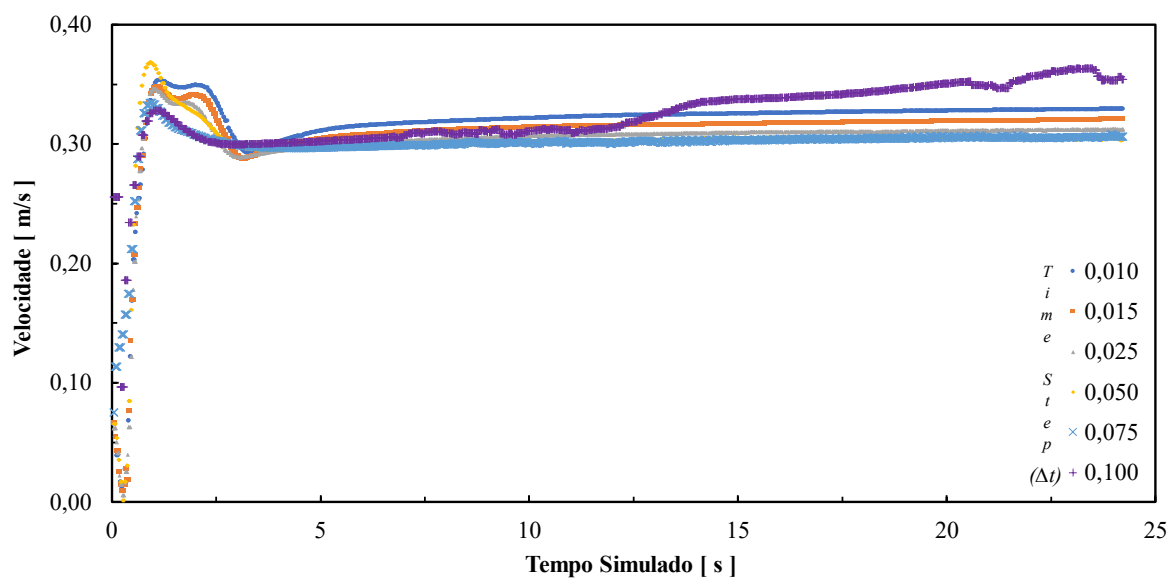
Fonte: O Autor (2024).

Figura 49 – Variação de Velocidade no Ponto 3



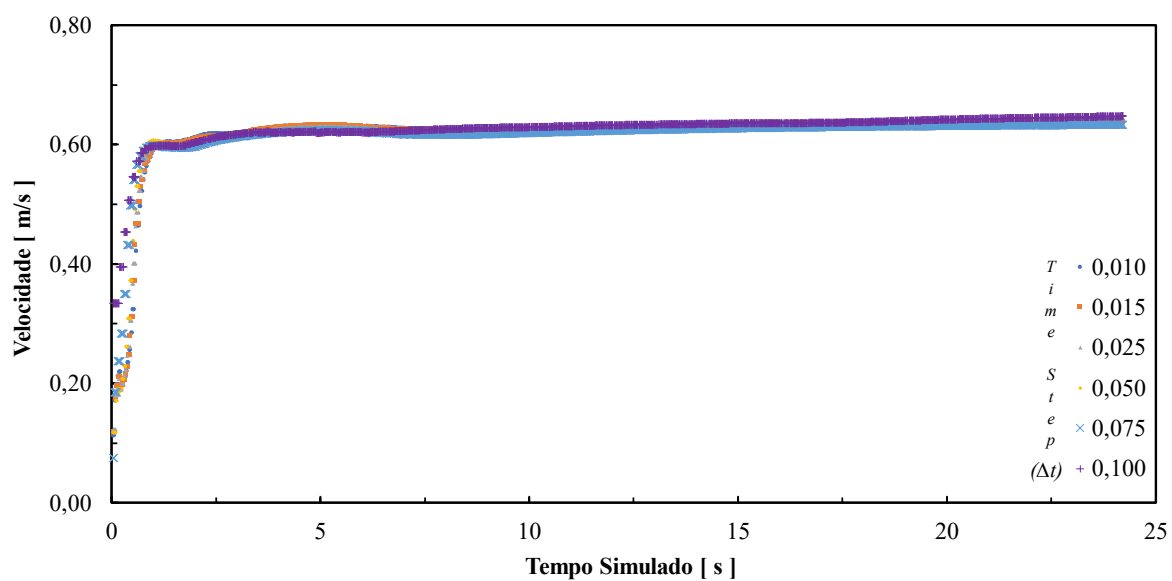
Fonte: O Autor (2024).

Figura 50 – Variação de Velocidade no Ponto 4



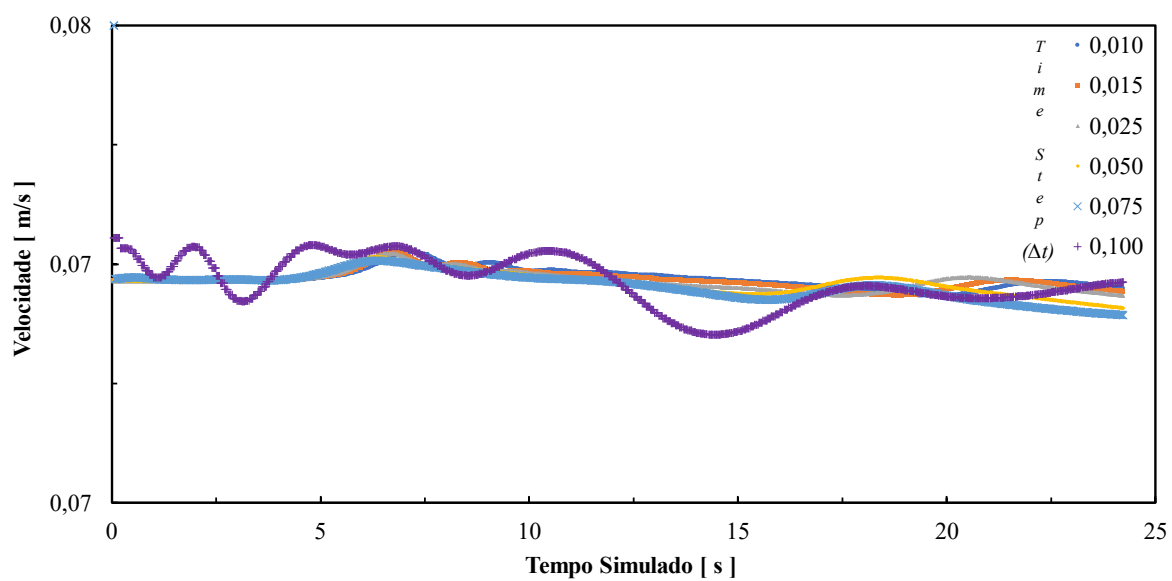
Fonte: O Autor (2024).

Figura 51 – Variação de Velocidade no Ponto 5



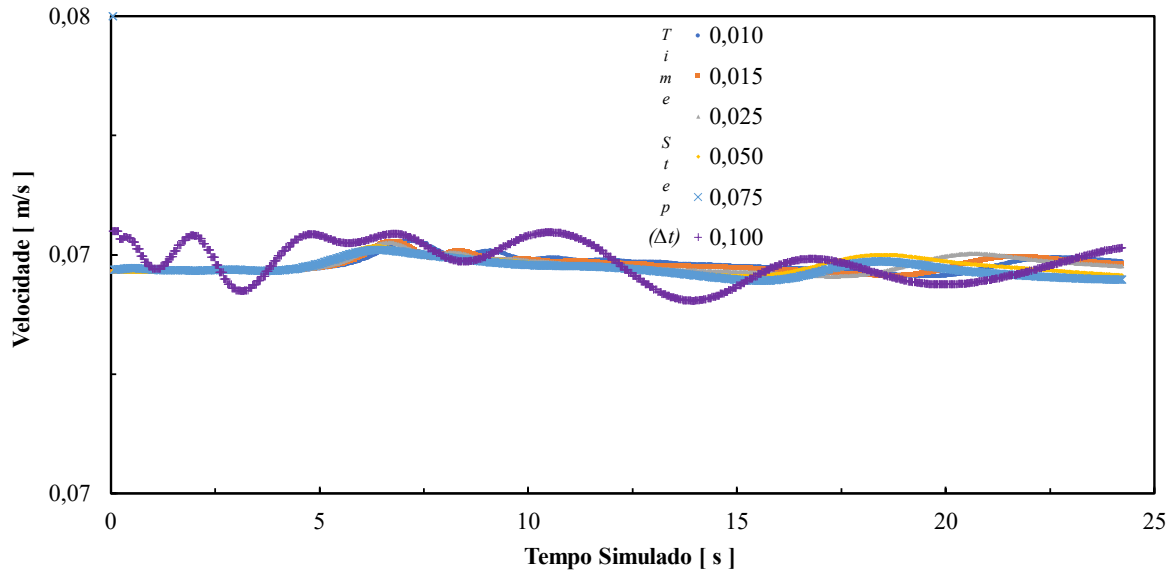
Fonte: O Autor (2024).

Figura 52 – Variação de Velocidade no Ponto 6



Fonte: O Autor (2024).

Figura 53 – Variação de Velocidade no Ponto 7



Fonte: O Autor (2024).

Com esta análise, concluiu-se que a utilização do *time step* de 0,025 seria a mais assertiva para este trabalho, resultando em um *time step* compatível com o comportamento de outrem menores, mas com um custo computacional relativamente menor, considerando-se, principalmente, que é até 2,5x maior que o *time step* de 0,010 segundos.

A Tabela 14 apresenta o erro padrão encontrado para cada um dos pontos. Os valores obtidos não aparentam ser significativos. Isso ocorre principalmente porque a variação no escalar de velocidade ocorre majoritariamente a partir da terceira casa decimal. Sendo assim, conclui-se que a análise visual do comportamento da velocidade através do tempo seja mais aplicável para este estudo em questão.

Tabela 14 – Erro Padrão para cada Número de Courant em cada Ponto, para $t = 24s$

Time Step [Δt] [s]	Número de Courant	V [m/s]						
		Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3	Ponto 4	Ponto 5	Ponto 6	Ponto 7
0,010	0,33	0,06272	0,06889	0,06271	0,32932	0,64171	0,06950	0,06985
0,015	0,50	0,06325	0,06884	0,06326	0,32056	0,63857	0,06942	0,06980
0,025	0,83	0,06409	0,06881	0,06409	0,31244	0,63595	0,06935	0,06976
0,050	1,66	0,06444	0,06868	0,06444	0,30343	0,63396	0,06908	0,06957
0,075	2,50	0,06435	0,06869	0,06441	0,30625	0,63376	0,06893	0,06948
0,100	3,33	0,04818	0,06865	0,05066	0,35421	0,64795	0,06962	0,07015
Erro Padrão [%] =		0,26%	0,00%	0,22%	0,77%	0,22%	0,01%	0,01%

Fonte: O Autor (2024).

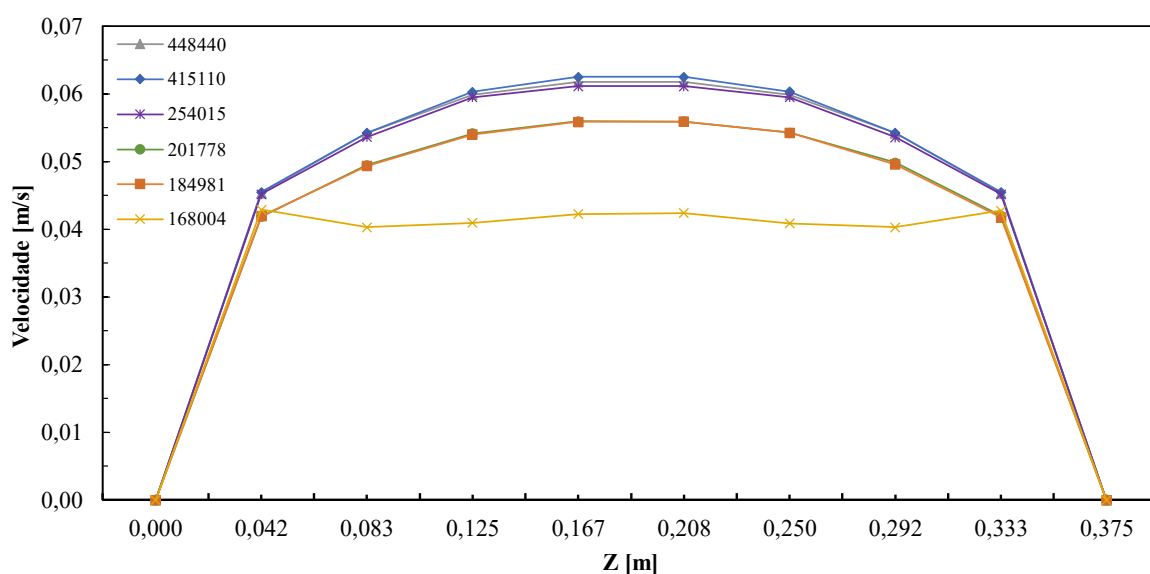
5.2 VALIDAÇÃO DE INDEPENDÊNCIA DE MALHA

Em continuação a etapa anterior, realizou-se um estudo para o teste de independência de malha, conforme abordado na subseção 4.2.2. De acordo com as malhas já estabelecidas na Tabela 5, os testes foram realizados também para os 24 (vinte e quatro) segundos já justificados. A Figura 54 apresenta o perfil de velocidade encontrado para as diferentes malhas no plano ZX. A Tabela 15 explicita os dados quantitativos alcançados a partir dessa análise.

Ressalta-se que todos os pontos notáveis dos eixos Z e Y foram definidos automaticamente pelo próprio CFD Post™.

Observa-se, na Figura 54, que, a partir da malha de 254.015 elementos, em roxo, não há mais diferenças significativas em comparação às malhas mais refinadas, como a de 448.440 elementos. Comportamento o qual é reforçado na Figura 55. A Tabela 15 também demonstra que não há erros significativos, sendo o maior valor encontrado nos pontos 0,083 m e 0,292 m do eixo Z.

Figura 54 – Teste de Malha para os Perfis de Velocidade no Plano ZX



Fonte: O Autor (2024).

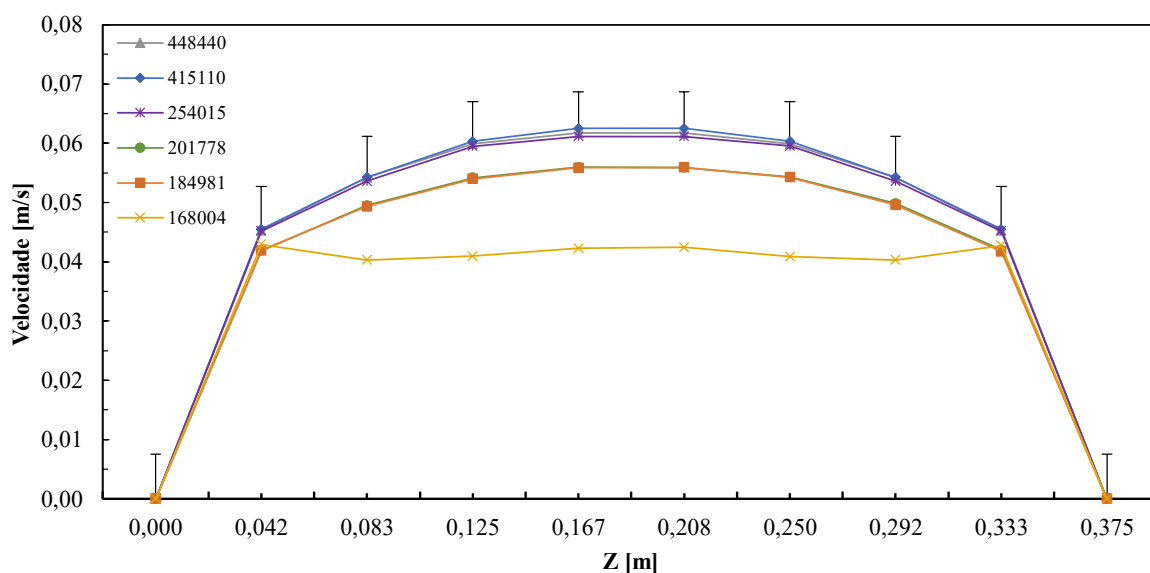
Tabela 15 – Teste de Malha para as Velocidade no Plano ZX, para t = 24s

Z [m]	Velocidade [m/s] 448.440	Velocidade [m/s] 415.110	Velocidade [m/s] 254.015	Velocidade [m/s] 201.778	Velocidade [m/s] 184.891	Velocidade [m/s] 168.004	Erro* [%]
0,000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00
0,042	0,04533	0,04551	0,04518	0,04186	0,04194	0,04292	0,34
0,083	0,05419	0,05424	0,05362	0,04948	0,04935	0,04029	1,06

Z [m]	Velocidade [m/s] 448.440	Velocidade [m/s] 415.110	Velocidade [m/s] 254.015	Velocidade [m/s] 201.778	Velocidade [m/s] 184.891	Velocidade [m/s] 168.004	Erro* [%]
0,125	0,05990	0,06032	0,05950	0,05417	0,05399	0,04095	0,66
0,167	0,06174	0,06250	0,06116	0,05596	0,05587	0,04227	0,94
0,208	0,06174	0,06251	0,06116	0,05592	0,05591	0,04242	0,94
0,250	0,05989	0,06033	0,05951	0,05428	0,05425	0,04088	0,64
0,292	0,05419	0,05424	0,05360	0,04984	0,04958	0,04031	1,09
0,333	0,04532	0,04549	0,04517	0,04198	0,04175	0,04276	0,34
0,375	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00
Erro dado pela razão das malhas 254.015 e 448.440						Erro Médio [%]	0,75

Fonte: O Autor (2024).

Figura 55 – Erro Padrão a partir da Malha de 254.015 Elementos, no Plano ZX



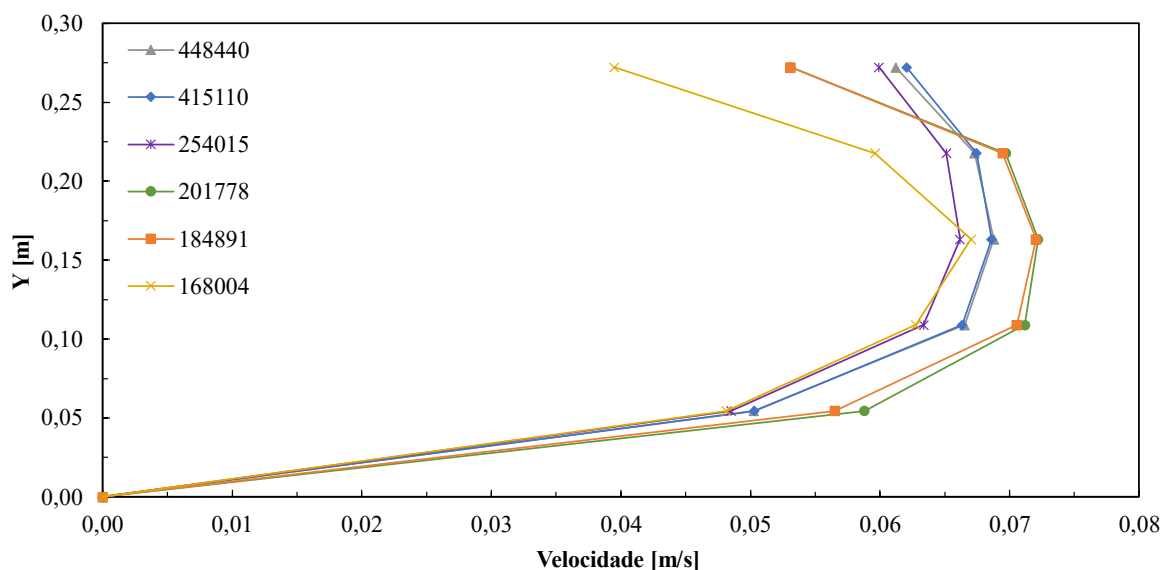
Fonte: O Autor (2024).

A Figura 56 apresenta o diagrama vertical de velocidades encontrado para as diferentes malhas no Plano XY. A Tabela 16 explicita os dados quantitativos alcançados a partir dessa análise.

Observa-se, na Figura 56, que, no plano XY, as malhas possuem um comportamento um pouco mais difuso do que o apresentado pela Figura 54. De toda forma, a malha de 254.015 elementos apresenta um comportamento muito semelhante às malhas de 415.110 e 448.440 elementos, diferentemente das malhas de 201.778 ou mais grosseiras. Em ambos os planos, a malha de 168.004 de longe apresenta o pior comportamento dentre todas. Tal fato deve ocorrer pela combinação de um baixo *Number of Layers*, 6, e uma elevada *Maximun Thickness*, de 0,035 m, conforme apontado na Tabela 5.

A Tabela 16 demonstra que há erros mais significativos que os presentes na Tabela 15, sendo o maior valor encontrado no ponto 0,109 m do eixo Y. Analisando-se também a Figura 57, em conjunto com as demais Figuras, optou-se pela utilização da malha de 254.015 elementos como a malha deste projeto, já que, em análise global, apresenta resultado satisfatório, mas com a menor quantidade de elementos.

Figura 56 – Teste de Malha para o Diagrama Vertical de Velocidades



Fonte: O Autor (2024).

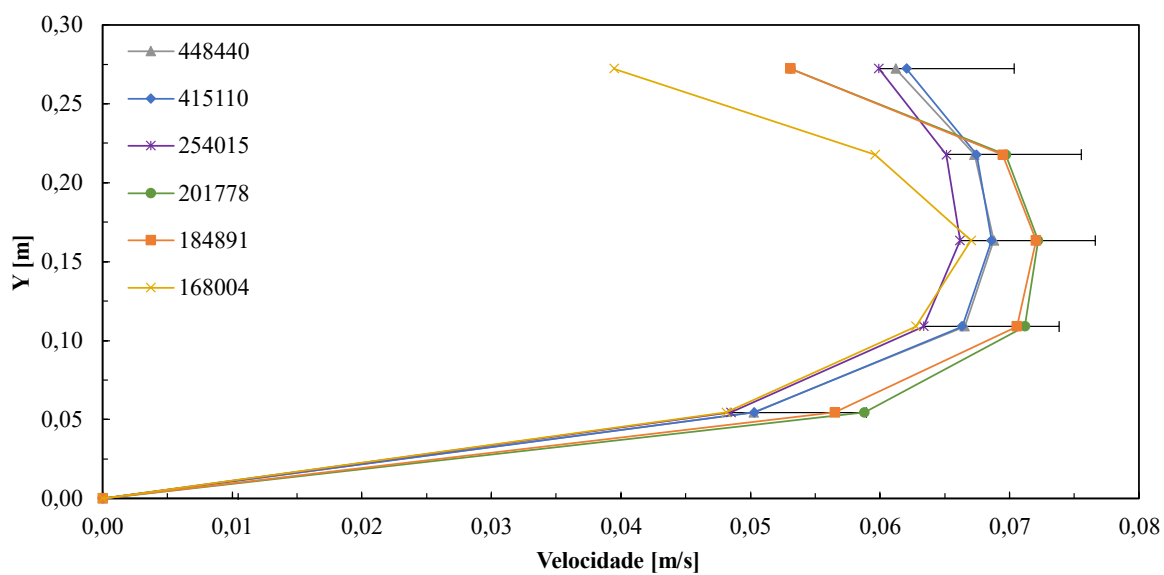
Tabela 16 – Teste de Malha para as Velocidades no Plano XY

Y [m]	Velocidade [m/s] 448.440	Velocidade [m/s] 415.110	Velocidade [m/s] 254.015	Velocidade [m/s] 201.778	Velocidade [m/s] 184.891	Velocidade [m/s] 168.004	Erro* [%]
0,000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00
0,054	0,05026	0,05031	0,04850	0,05880	0,05652	0,04814	3,49
0,109	0,06654	0,06633	0,06337	0,07118	0,07057	0,06276	4,76
0,163	0,06879	0,06861	0,06618	0,07221	0,07205	0,06703	3,79
0,218	0,06730	0,06745	0,06511	0,06972	0,06947	0,05963	3,24
0,272	0,06122	0,06206	0,05991	0,05309	0,05310	0,03947	2,14
Erro dado pela razão das malhas 254.015 e 448.440						Erro Médio [%]	3,49

Fonte: O Autor (2024).

Com a definição da malha de 254.015 como a malha validada para este projeto, a Figura 58 apresenta o aspecto geral do domínio discretizado para esta quantidade de elementos. A Figura 59 apresenta o detalhamento da malha no plano XY, enquanto a Figura 60 apresenta o detalhamento da malha para o plano ZX. Ressalta-se que a Figura 36 já apresenta o detalhamento no plano YZ.

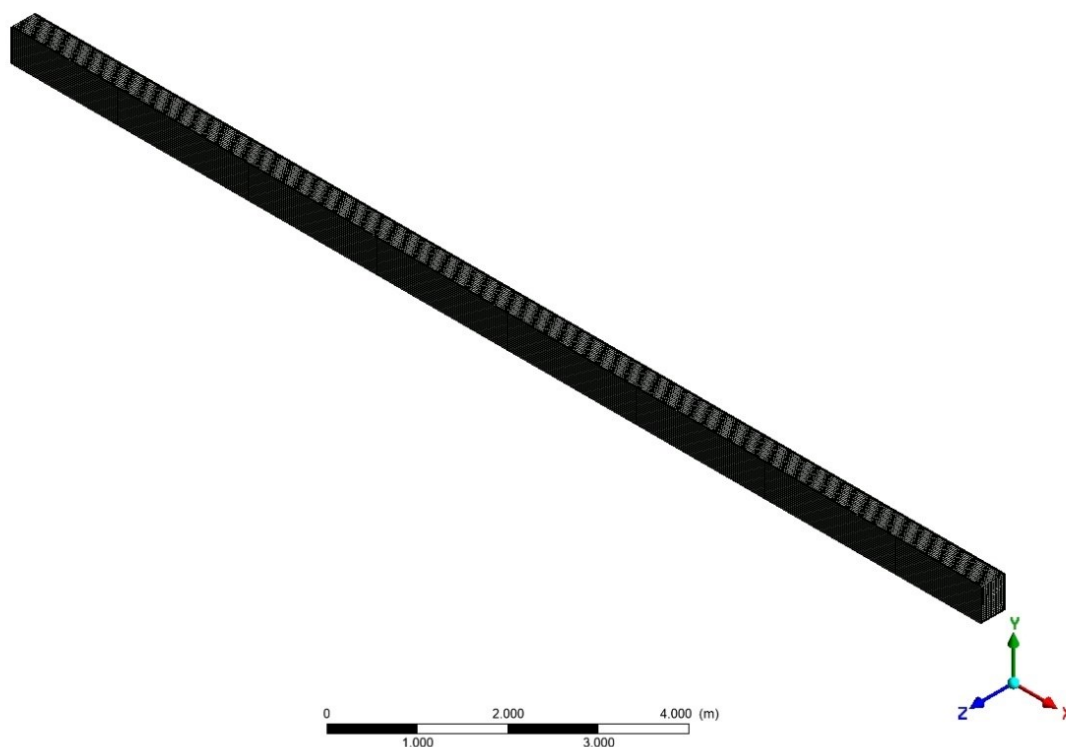
Figura 57 – Erro Padrão a partir da Malha de 254.015 Elementos, no Diagrama Vertical de Velocidades



Fonte: O Autor (2024).

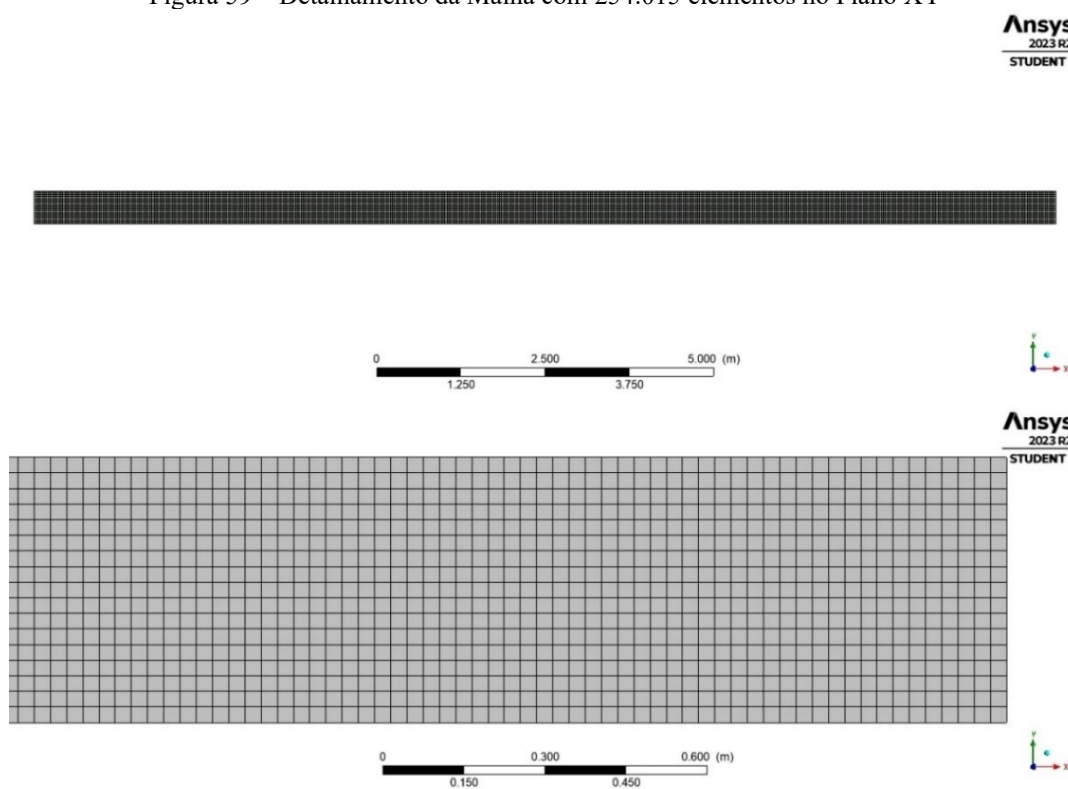
Figura 58 – Visão Geral da Malha com 254.015 elementos

Ansys
2023 R2
STUDENT



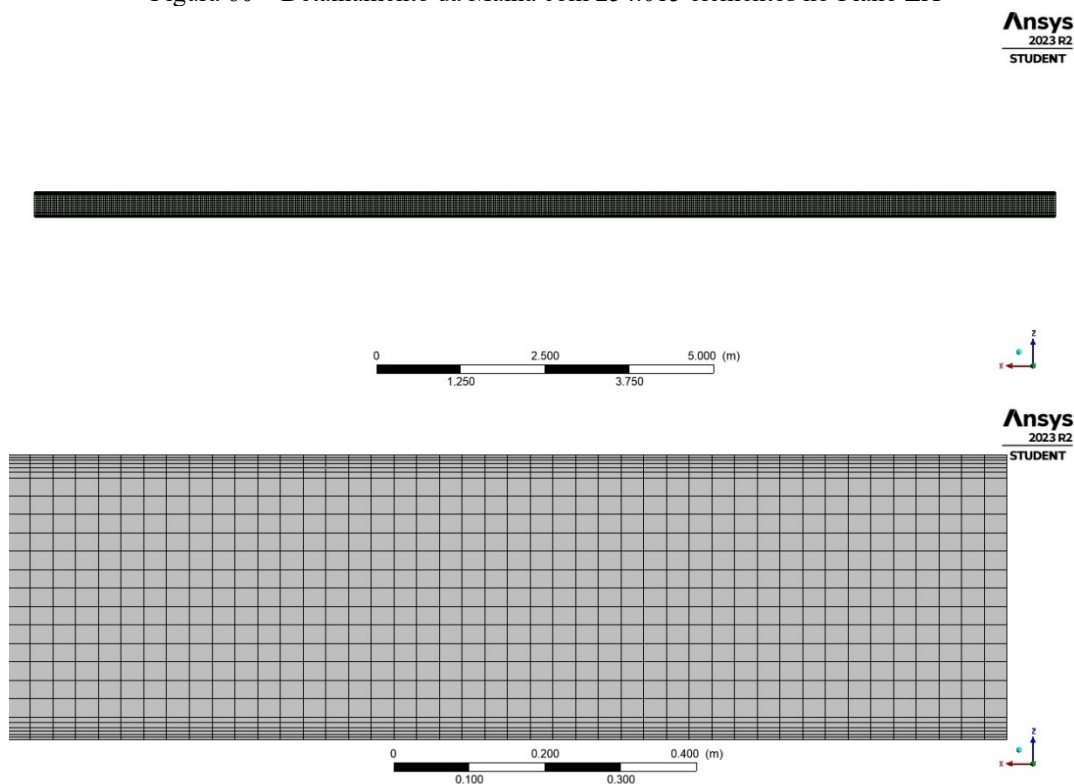
Fonte: O Autor (2024).

Figura 59 – Detalhamento da Malha com 254.015 elementos no Plano XY



Fonte: O Autor (2024).

Figura 60 – Detalhamento da Malha com 254.015 elementos no Plano ZX



Fonte: O Autor (2024).

5.3 VERIFICAÇÃO DO MODELO

Nesta etapa, analisou-se os resultados globais obtidos a fim de se verificar os fenômenos físico-químico modelados e se os escalares resultantes se comportaram conforme o esperado. Para isso, os escalares de pressão relativa, velocidade e fração volumétrica da água foram extraídos para diferentes planos: XY, YZ e ZX.

Para que fosse realizada a extração dos dados quantitativos, diferentes linhas foram traçadas dentro do domínio computacional, uma em cada um dos planos. Conforme os escalares foram sendo verificados, a alocação de cada uma das linhas foi modificada de forma a melhor representar os resultados para cada um dos planos, de contemplar o escoamento em seu pleno desenvolvimento e de encontrar até qual ponto a fração volumétrica da água é igual a 1. As coordenadas cartesianas de cada uma das linhas pode ser observada na Tabela 17.

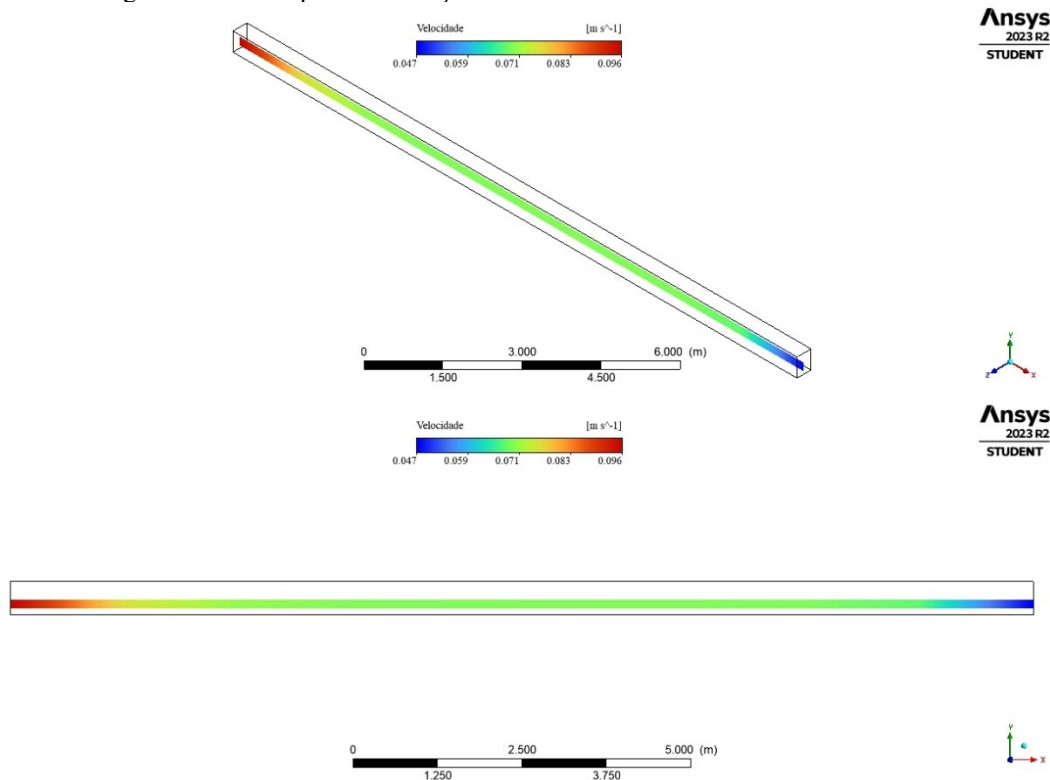
Tabela 17 – Coordenadas Cartesianas das Linhas de Verificação do Modelo			
Pontos	Coordenada		
	x	y	z
Linha para Desenvolvimento do Pleno Escoamento			
1	0,0000	0,1600	0,1875
2	15,1300	0,1600	0,1875
Linha para Fração Volumétrica da Água			
1	8,0000	0,0000	0,1875
2	8,0000	0,4900	0,1875
Linha para Perfil de Velocidade no Plano ZX			
1	8,0000	0,1600	0,0000
2	8,0000	0,1600	0,3750

Fonte: O Autor (2024).

O primeiro escalar de variável verificado foi a velocidade no eixo X, de forma a obter o resultado perfil de velocidade ao longo de todo o canal e observar o intervalo onde o escoamento encontra-se em pleno desenvolvimento, conforme os trabalhos de Lien *et al.* (2004) e Bonakdari *et al.* (2008). Ainda, tomou-se o cuidado para locar a linha onde a fração volumétrica da água fosse 1 no eixo Y, além de estar bem centralizada no eixo Z. A Figura 61 apresenta a reta traçada no domínio computacional, enquanto a Figura 62 apresenta o gráfico do perfil de velocidade obtido a partir dessa reta.

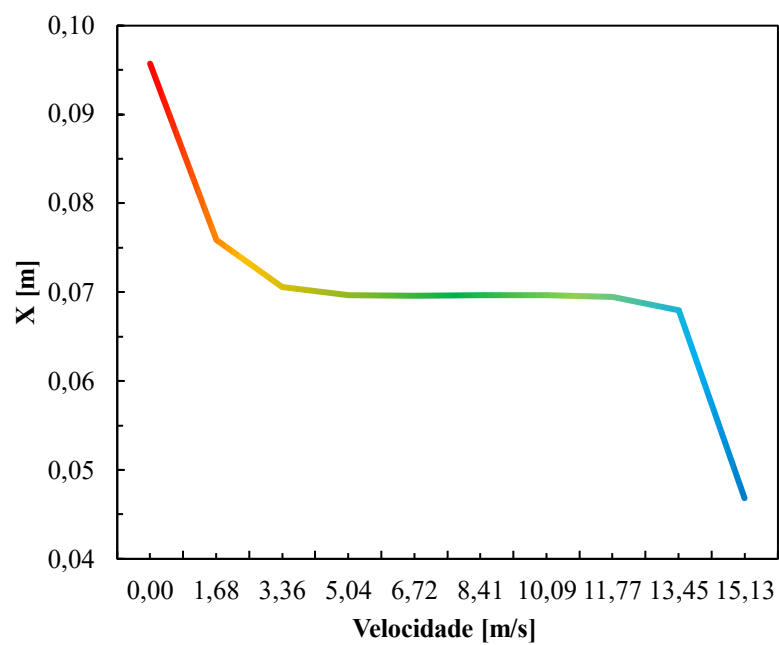
A Tabela 18 demonstra que o pleno desenvolvimento do escoamento se encontra no intervalo de 5,04 m e 11,77 m do eixo X.

Figura 61 – Linha para Verificação do Desenvolvimento do Pleno Escoamento



Fonte: O Autor (2024).

Figura 62 – Gráfico para Verificação do Desenvolvimento do Pleno Escoamento



Fonte: O Autor (2024).

Tabela 18 – Valores de Velocidade para Diferentes Pontos no Eixo X

X [m]	Velocidade [m/s]
0,00	0,09572
1,68	0,07586
3,36	0,07059
5,04	0,06969
6,72	0,06959
8,41	0,06963
10,09	0,06963
11,77	0,06943
13,45	0,06796
15,13	0,04684

Fonte: O Autor (2024).

Para fins deste trabalho, conforme observação da Tabela 18, adotou-se o ponto médio no eixo X de 8,00 m, já que este é próximo ao centro do canal, de 15,13 m, e encontra-se no intervalo observado de pleno desenvolvimento de escoamento.

Utilizando-se deste critério, traçou-se a linha no eixo Y para observação do escalar da fração volumétrica da água. Esse escalar define e demonstra para o usuário o local onde há 100% de água, com valor igual a 1 (um), e os locais onde há uma interface entre a água e o ar, possuindo o valor de 0,99 (zero vírgula noventa e nove) ou inferior.

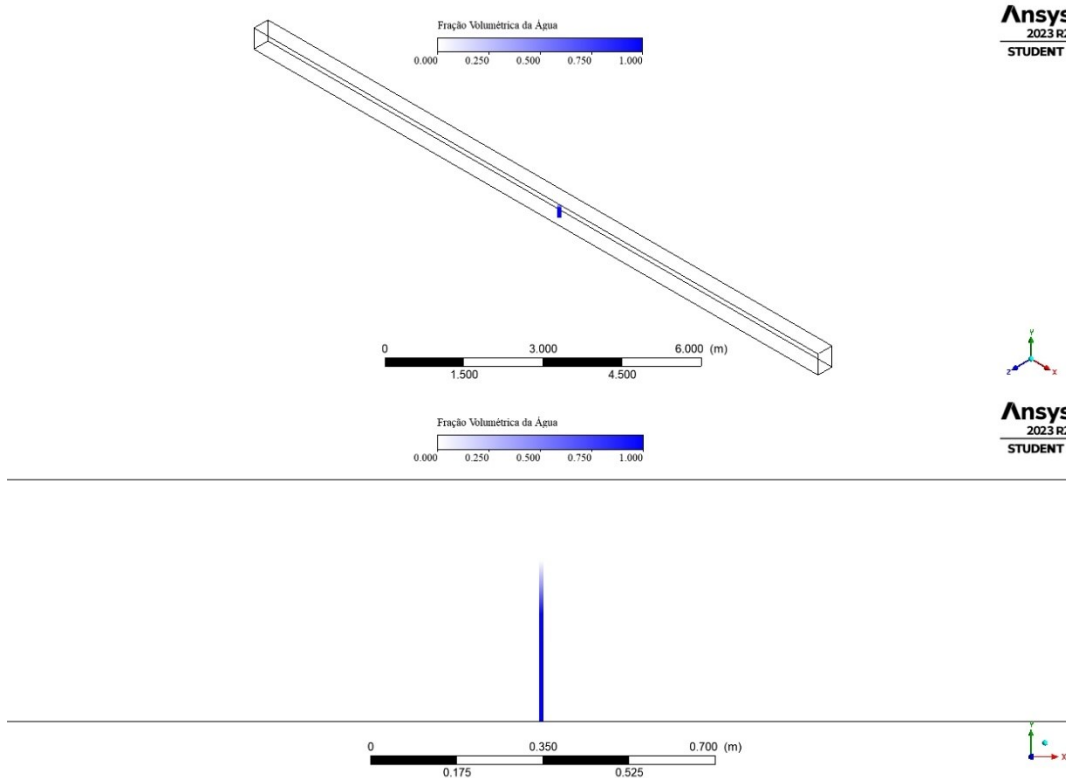
Na Tabela 19 é possível inferir que a partir da altura de 0,22 m do eixo Y há uma reaeração da água próximo à superfície livre do escoamento. Ao observar a Figura 63, é possível entender o gradiente da fração volumétrica da água através do eixo Y. Bem como, na Figura 64, é possível observar um gráfico obtido a partir da Tabela 19. Nele, é possível verificar o local onde se inicia a deflexão da reta e início da reaeração da superfície livre.

Tabela 19 – Valores de Fração Volumétrica para Diferentes Pontos no Eixo Y

Y [m]	Fração Volumétrica da Água [-]
0,00	1,00
0,05	1,00
0,11	1,00
0,16	1,00
0,22	0,98
0,27	0,44
0,33	0,00
0,38	0,00
0,44	0,00
0,49	0,00

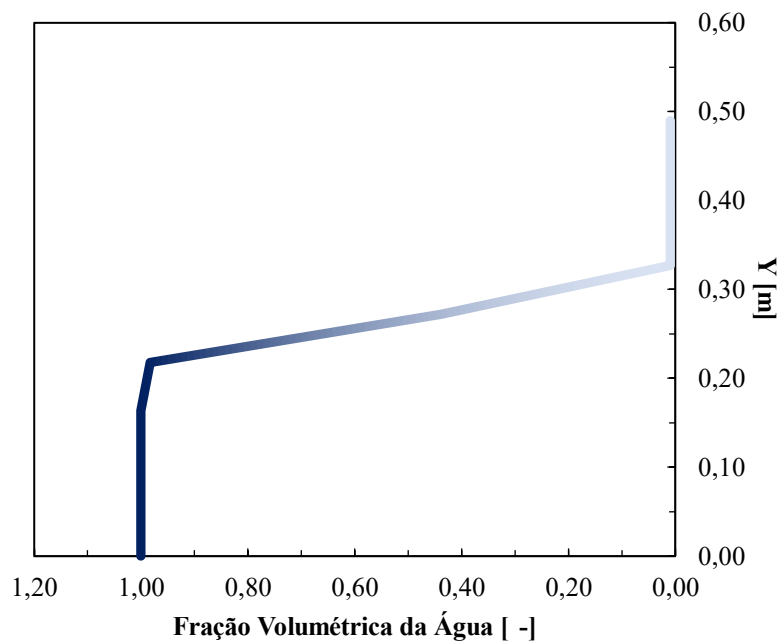
Fonte: O Autor (2024).

Figura 63 – Linha para Verificação da Fração Volumétrica da Água



Fonte: O Autor (2024).

Figura 64 – Gráfico para Verificação da Fração Volumétrica da Água



Fonte: O Autor (2024).

Por fim, observou-se também o perfil de distribuição de velocidades ao longo do eixo Z, utilizando dos pontos descobertos a partir das análises do escalares de velocidade e de fração volumétrica da água nos eixos X e Y.

No eixo Z é possível verificar diretamente o impacto dos coeficientes de rugosidade no escoamento do canal e em seu perfil de velocidade, de forma que a velocidade na parede tenda a zero e que no meio não haja impactos relevantes, conforme já demonstrado na Figura 1.

Analisando-se a Tabela 20, é possível denotar que o coeficiente de rugosidade, em paredes revestidas em acrílico, só tem impacto até 8 cm da parede, em ambos os lados, já que são simétricos. Dessa forma, observa-se que o escoamento entre o intervalo de 0,08 m e 0,29 m adquiriu uma velocidade praticamente idêntica a esperada, apenas variando $\sim 0,0002$ m/s, variação que pode ser ocorrer devido aos resíduos de erro do cálculo numérico.

Sendo assim, entende-se que o modelo adquiriu excelente comportamento físico-químico, verificando-se em resultado de certo confiáveis.

Tabela 20 – Valores de Velocidade para Diferentes Pontos no Eixo Z

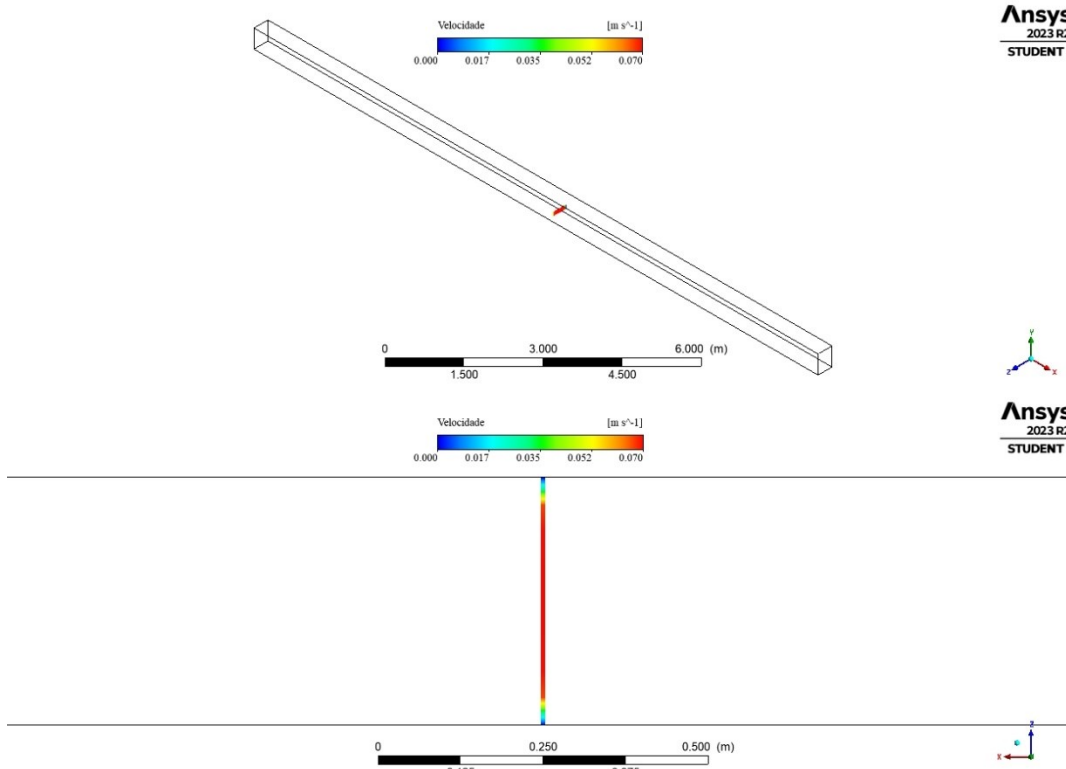
Z [m]	Velocidade [m/s]
0,00	0,00000
0,04	0,06645
0,08	0,06953
0,13	0,06961
0,17	0,06961
0,21	0,06962
0,25	0,06962
0,29	0,06953
0,33	0,06653
0,37	0,00000

Fonte: O Autor (2024).

A Figura 65 demonstra a alocação da reta no plano ZX, inclusive a sua escala de velocidade. Ainda, a Figura 66 demonstra graficamente os resultados obtidos na Tabela 20, estando dentro do esperado para a modelagem proposta.

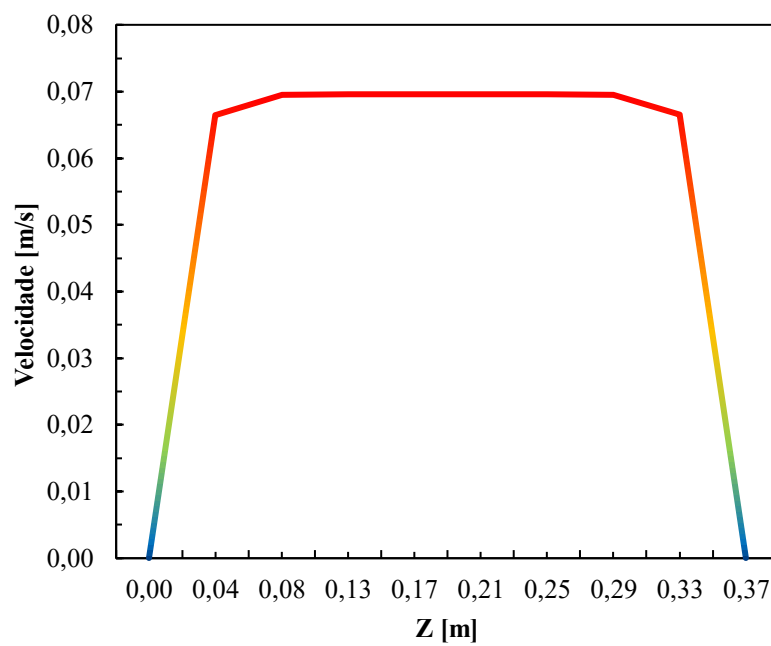
Ademais, a Figura 67 demonstra o comportamento global da fração volumétrica da água. Esta deve ser observada junto à Figura 68, a qual apresenta o seu detalhamento. Nota-se que o modelo também pode ler uma pequena sobre-elevação esperada da água no início e no final do canal, adquirindo um comportamento adequado ao esperado pela modelagem equacional realizada.

Figura 65 – Linha para Verificação do Perfil de Velocidade no Plano ZX



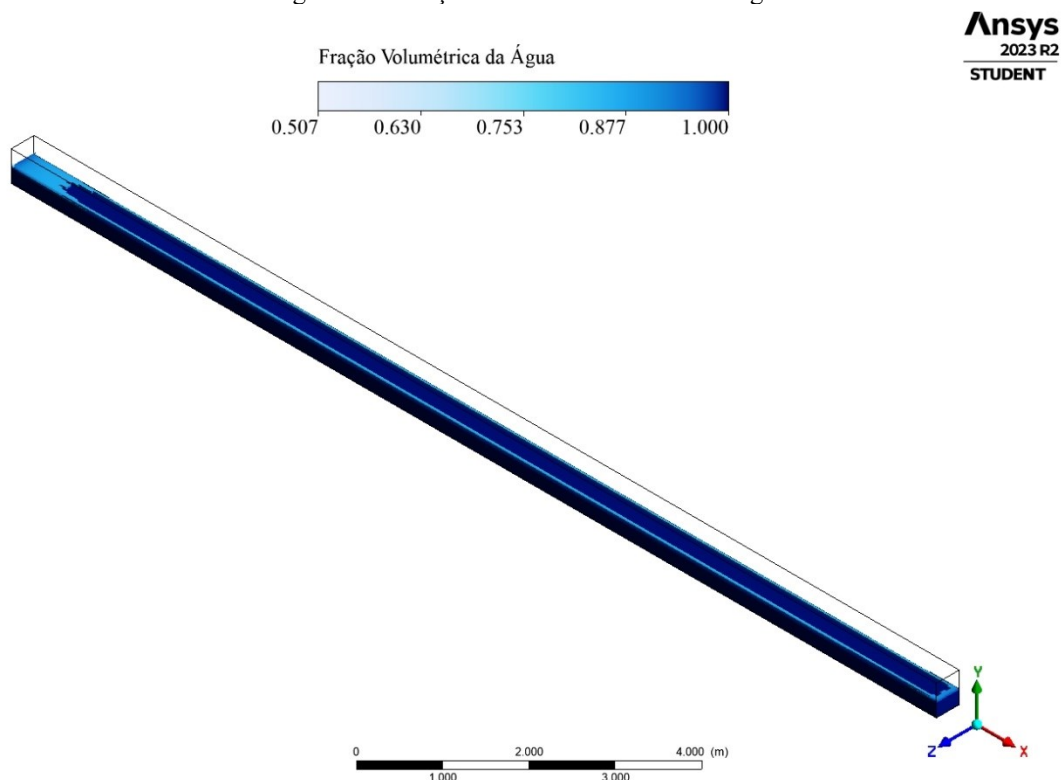
Fonte: O Autor (2024).

Figura 66 – Gráfico para Verificação do Perfil de Velocidade no Plano ZX



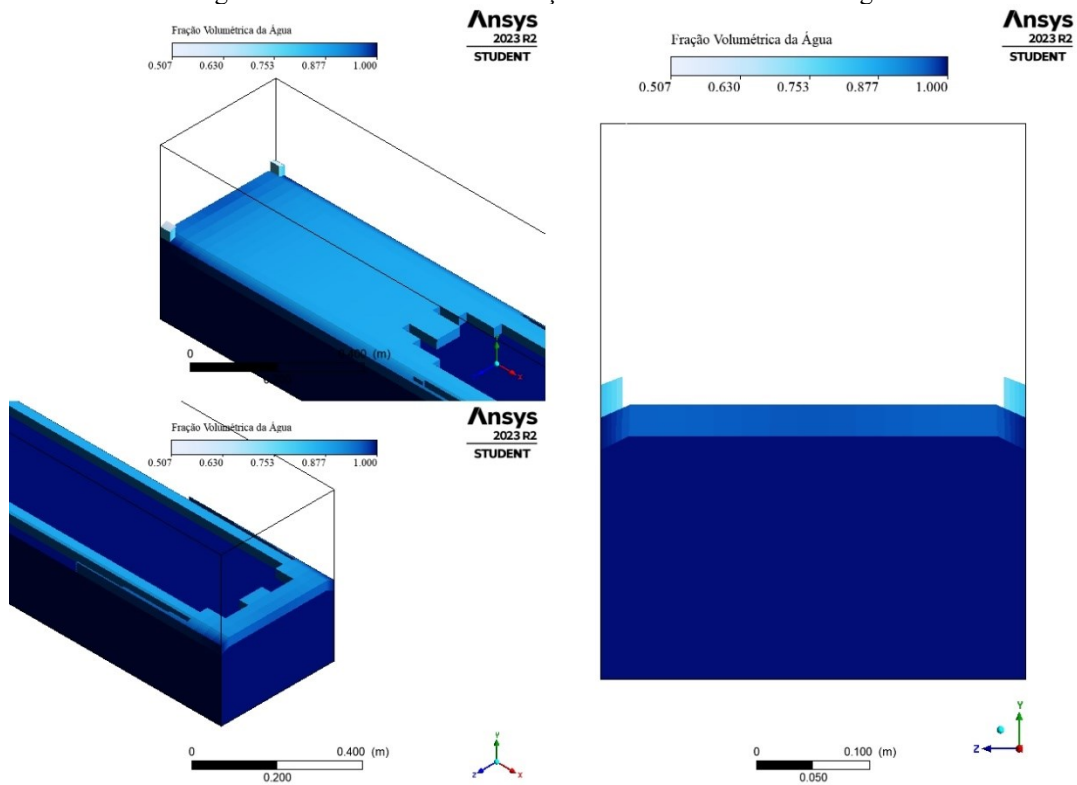
Fonte: O Autor (2024).

Figura 67 – Fração Volumétrica Global da Água



Fonte: O Autor (2024).

Figura 68 – Detalhamento da Fração Volumétrica Global da Água



Fonte: O Autor (2024).

Por fim, mais uma verificação foi realizada por meio dos escalares de pressão relativa no plano YZ, de forma especial no eixo Y. Para tal, realizou-se uma correlação entre a pressão relativa dada em Pascal [Pa] pelo *software* e o valor de perda de carga dado por Bernoulli, a partir de um cálculo dinâmico, de forma que o resultado obtido foi concomitante com a fração volumétrica da água e altura esperada para aquele trecho do escoamento.

Para que essa correlação fosse realizada, utilizou-se de uma adaptação da Equação (15), demonstrada na Equação (16), considerando-se $z = 0$ e minorando-se o valor encontrado pela fração volumétrica da água, wv_f , já que esta diz respeito à quantidade de água no respectivo ponto notável observado. Assim, extraiu-se os dados da pressão relativa, velocidade e fração volumétrica da água na mesma linha demonstrada na Figura 63, ao longo de todo o eixo Y. Os valores obtidos, bem como o valor da perda de carga, H, podem ser observados na Tabela 21. A Altura Esperada, em metro, refere-se à diferença absoluta entre a superfície livre medida no experimento, observada na Figura 31, 0,268 m, e o ponto notável no eixo Y, em m. Dessa forma, é possível comparar o resultado obtido numericamente no software, sua correlação com o cálculo analítico, a partir da Equação (16), e o valor esperado a partir do experimento realizado.

$$H = \frac{p}{\rho g} + \frac{V^2}{2g} + z \quad (15)$$

$$H = \left(\frac{p}{\rho g} + \frac{V^2}{2g} \right) \times wv_f \quad (16)$$

Em que: H é a perda de carga por Bernoulli, em m; p é a pressão relativa, em Pa; ρ é a massa específica, em kg/m^3 ; g é a gravidade, em m/s^2 ; V é a velocidade no ponto, em m/s ; z é a altura relativa, em m, e; wv_f é a fração volumétrica da água, adimensional.

Tabela 21 – Verificação do Modelo com a Comparação entre a Pressão Relativa x Perda de Carga por Bernoulli

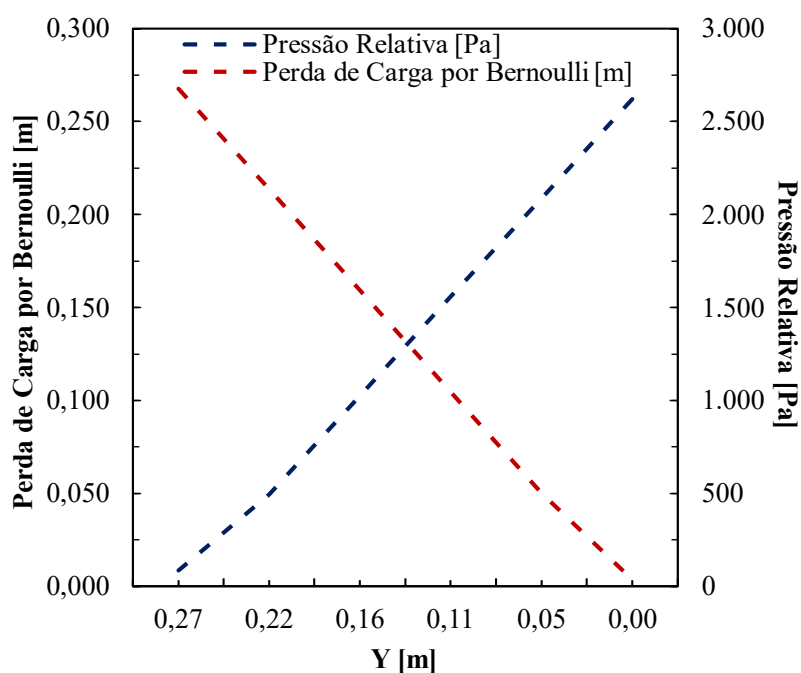
Y [m]	Pressão Relativa [Pa]	Massa Específica ρ [kg/m^3]	Gravidade [m/s^2]	Velocidade [m/s]	Fração Volumétrica da Água [-]	Perda de Carga por Bernoulli [m]	Altura Esperada [m]
0,00	2621,75	998,2	9,81	0,00000	1,00	0,268	0,268
0,05	2089,09	998,2	9,81	0,06912	1,00	0,214	0,214
0,11	1556,61	998,2	9,81	0,06961	1,00	0,159	0,159
0,16	1024,134	998,2	9,810	0,06961	1,00	0,105	0,105

Y [m]	Pressão Relativa [Pa]	Massa Específica ρ [kg/m ³]	Gravidade [m/s ²]	Velocidade [m/s]	Fração Volumétrica da Água [-]	Perda de Carga por Bernoulli [m]	Altura Esperada [m]
0,22	494,00	998,2	9,81	0,06957	0,99	0,050	0,050
0,27	86,92	998,2	9,81	0,06901	0,42	0,004	0,004
0,33	0,02	998,2	9,81	0,06644	0,00	0,000	0,000
0,38	0,00	998,2	9,81	0,05237	0,00	0,000	0,000
0,44	0,00	998,2	9,81	0,03104	0,00	0,000	0,000
0,49	0,00	998,2	9,81	0,01064	0,00	0,000	0,000

Fonte: O Autor (2024).

As Figuras 69, 70 e 71 demonstram o gráfico da correlação demonstrada na Tabela 21, o perfil global da pressão relativa e o seu detalhamento, respectivamente.

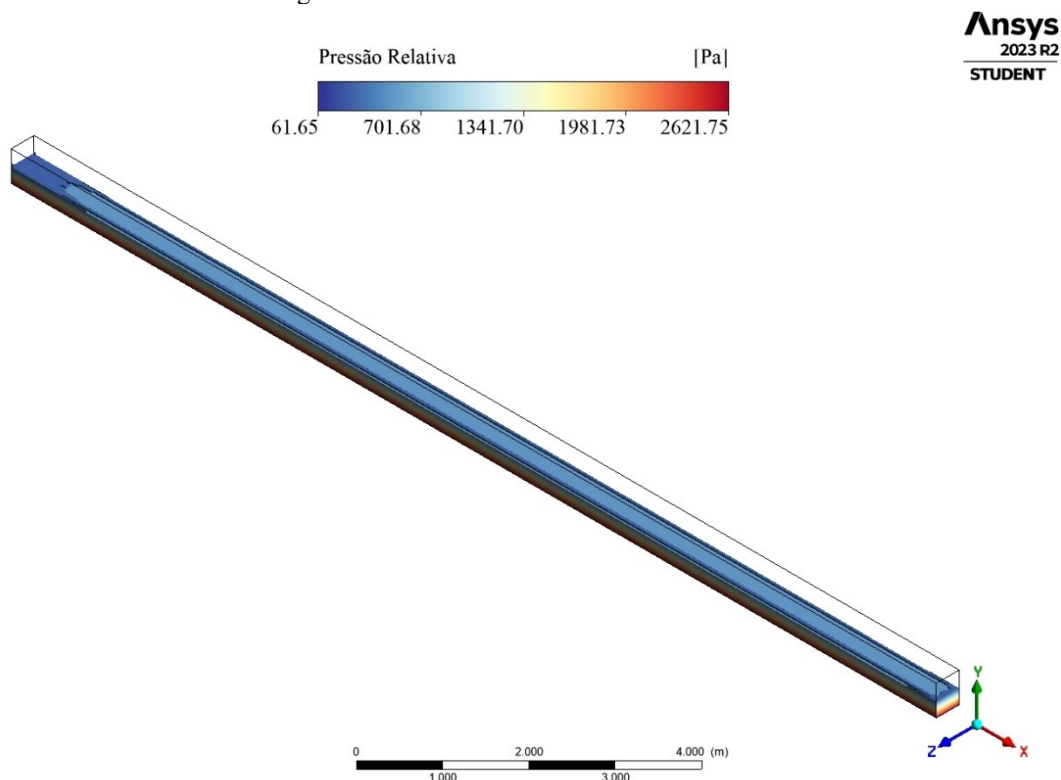
Figura 69 – Relação entre a Pressão Relativa e a Perda de Carga por Bernoulli



Fonte: O Autor (2024).

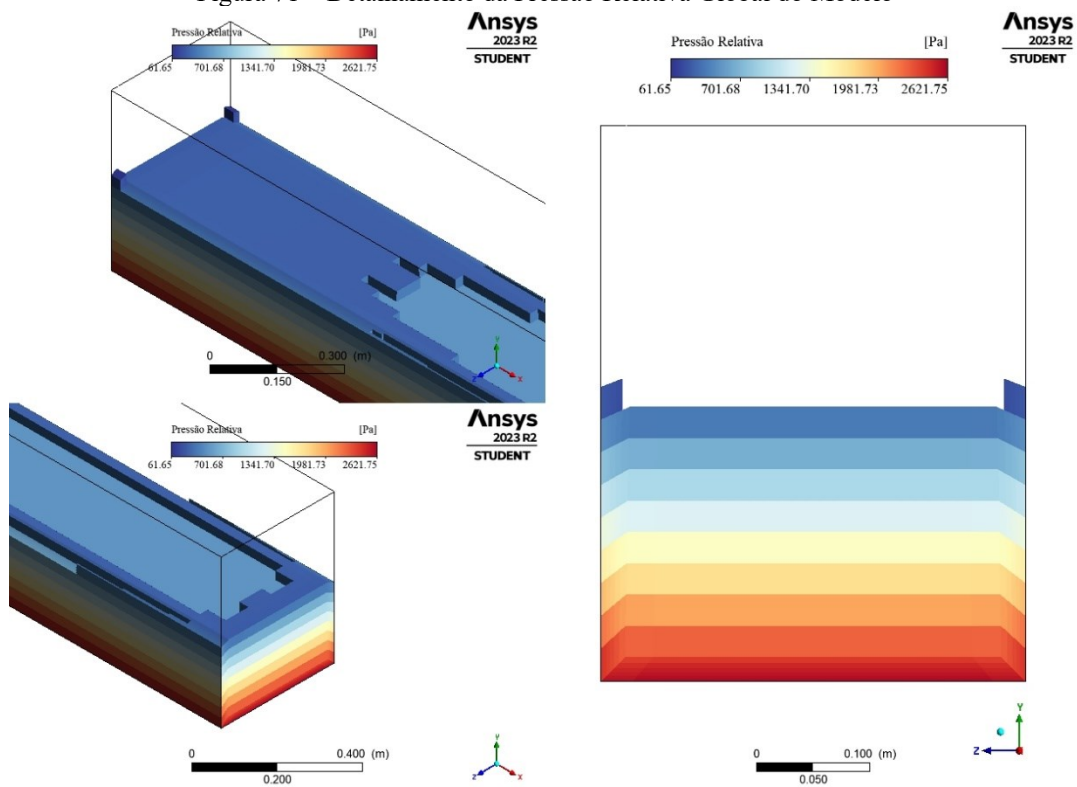
Para mais, as Figuras 72 e 73 representam, de forma ilustrativa, o fluxo de massa global da água, bem como o seu detalhamento, respectivamente. As Figuras 74 e 75 representam, de forma ilustrativa, o perfil de velocidade global do escoamento, bem como o seu detalhamento, respectivamente.

Figura 70 – Pressão Relativa Global do Modelo



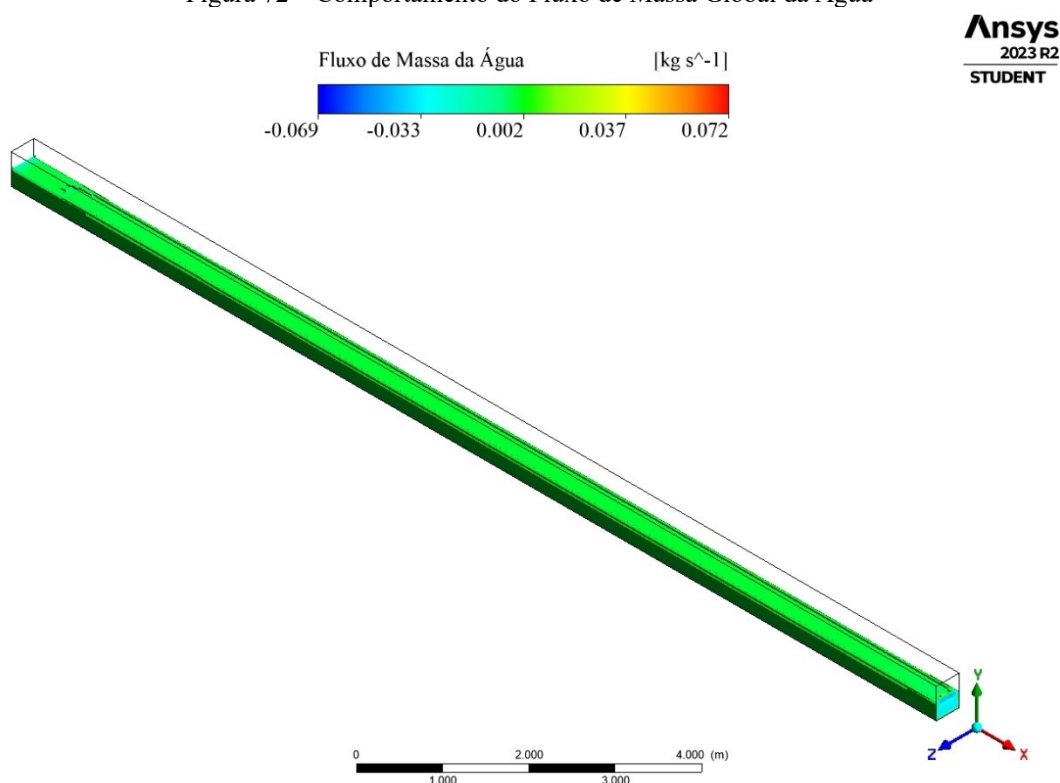
Fonte: O Autor (2024).

Figura 71 – Detalhamento da Pressão Relativa Global do Modelo



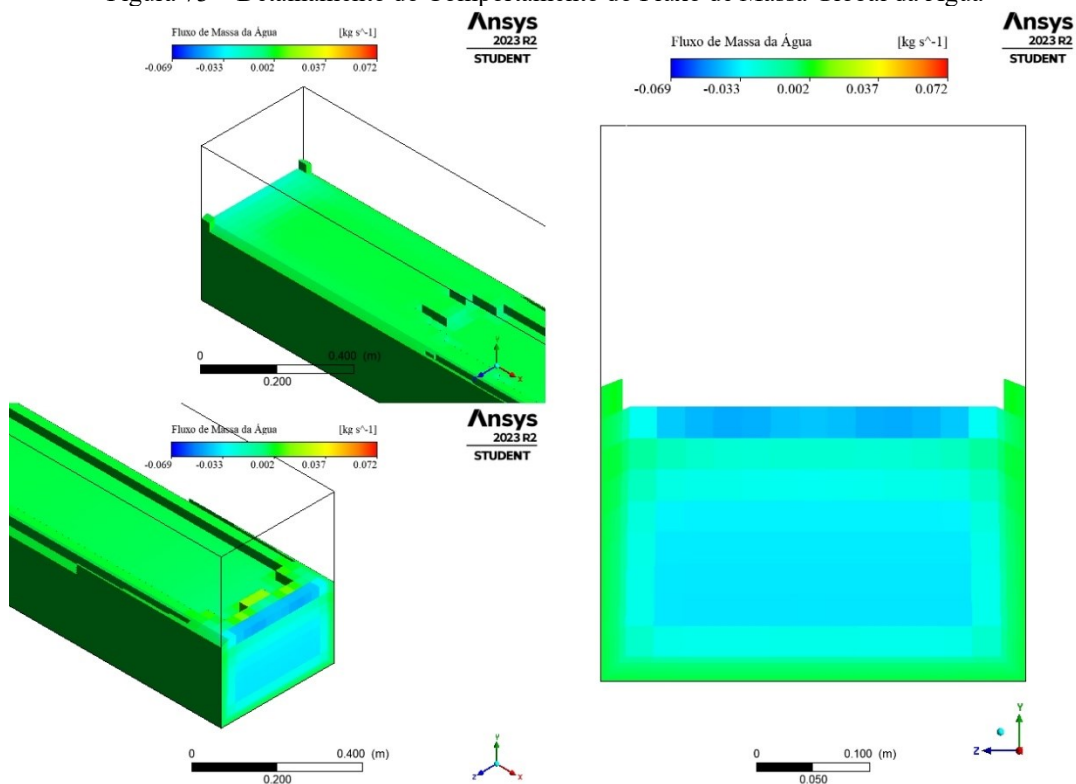
Fonte: O Autor (2024).

Figura 72 – Comportamento do Fluxo de Massa Global da Água



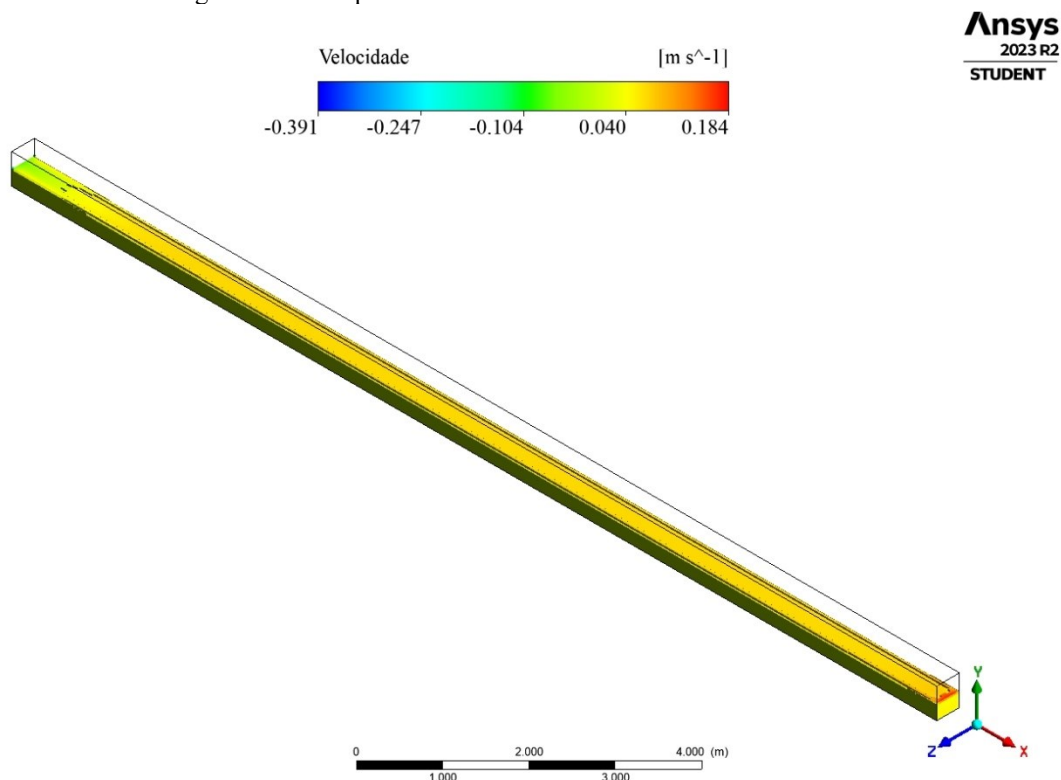
Fonte: O Autor (2024).

Figura 73 – Detalhamento do Comportamento do Fluxo de Massa Global da Água



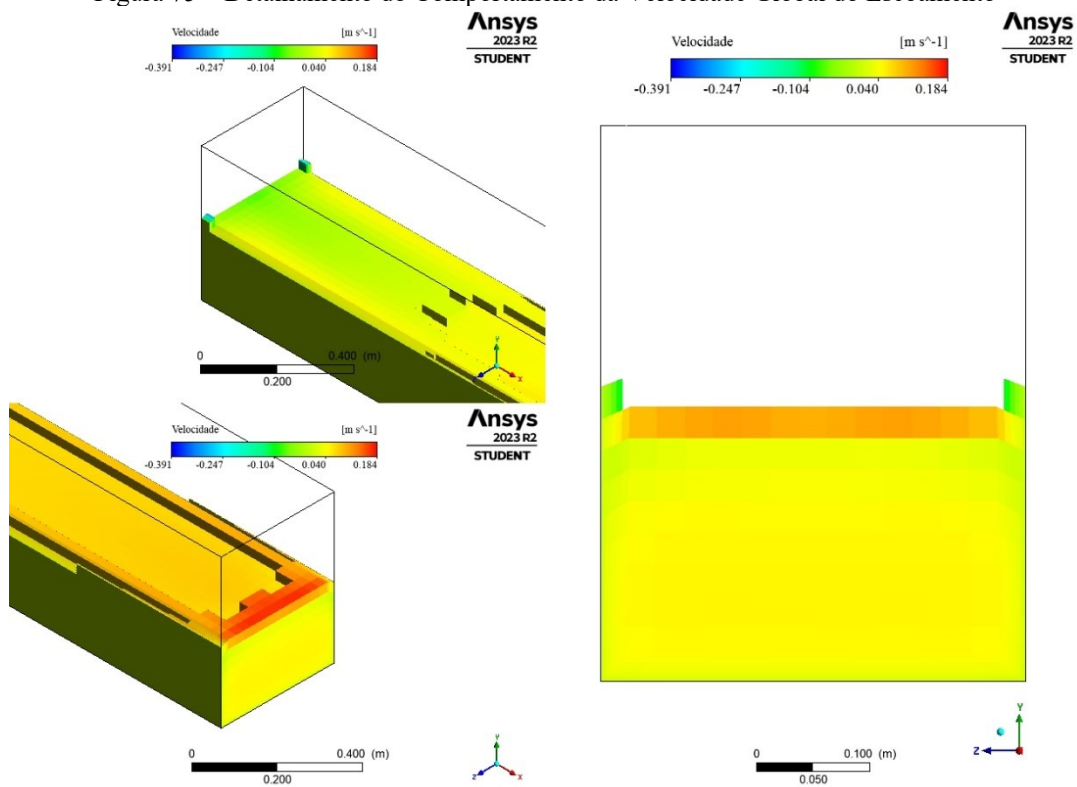
Fonte: O Autor (2024).

Figura 74 – Comportamento da Velocidade Global do Escoamento



Fonte: O Autor (2024).

Figura 75 – Detalhamento do Comportamento da Velocidade Global do Escoamento

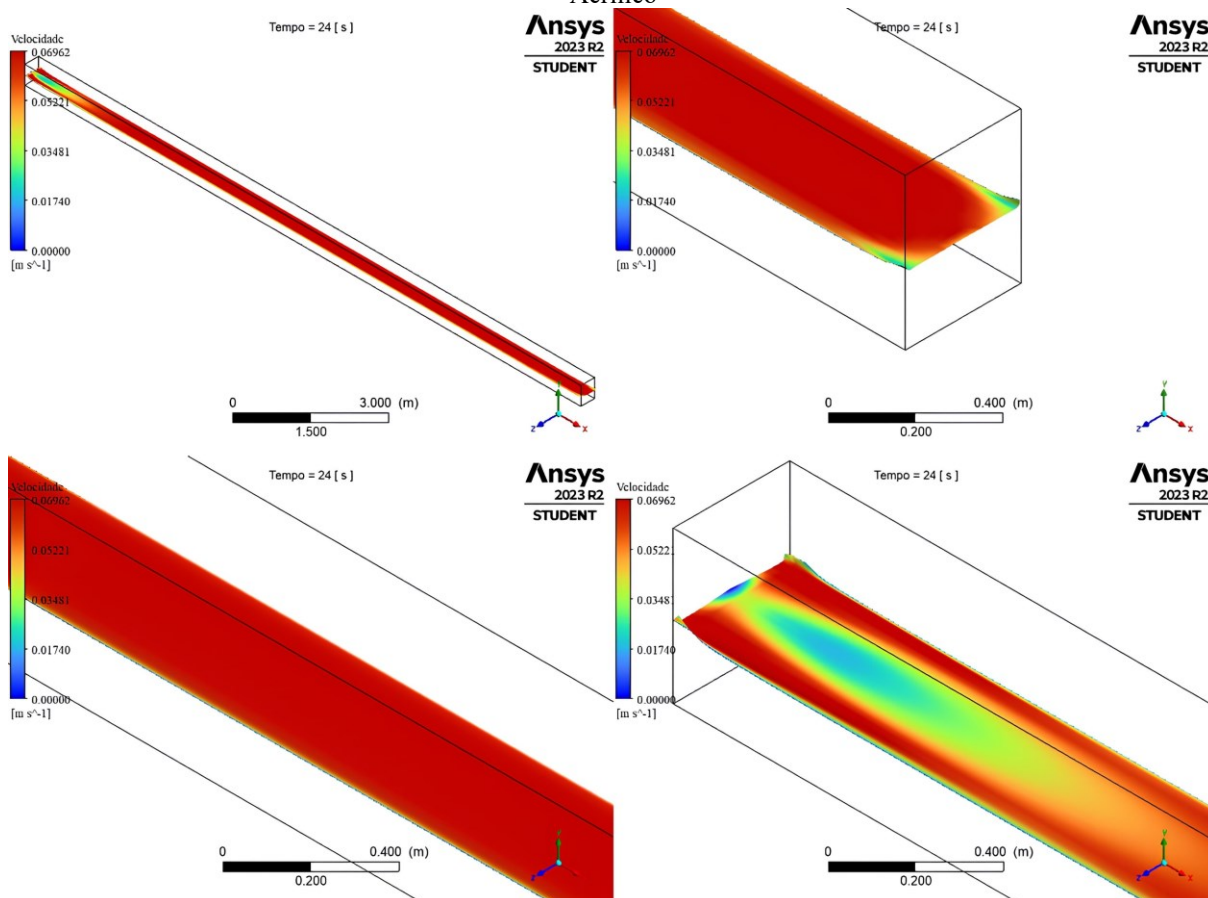


Fonte: O Autor (2024).

Ressalta-se que estes escalares são apresentados apenas de forma representativa, já que para sua correta leitura um perfil global não é indicado. De toda forma, ilustra-se como o escoamento tende a se comportar ao longo do domínio computacional modelado.

Por fim, a Figura 76 demonstra o comportamento da velocidade local a partir da superfície mais alta com fração volumétrica da água igual a 1. Na Figura 76, observa-se o perfil de velocidade do escoamento no *inlet*, à sudeste, e do *outlet*, à nordeste.

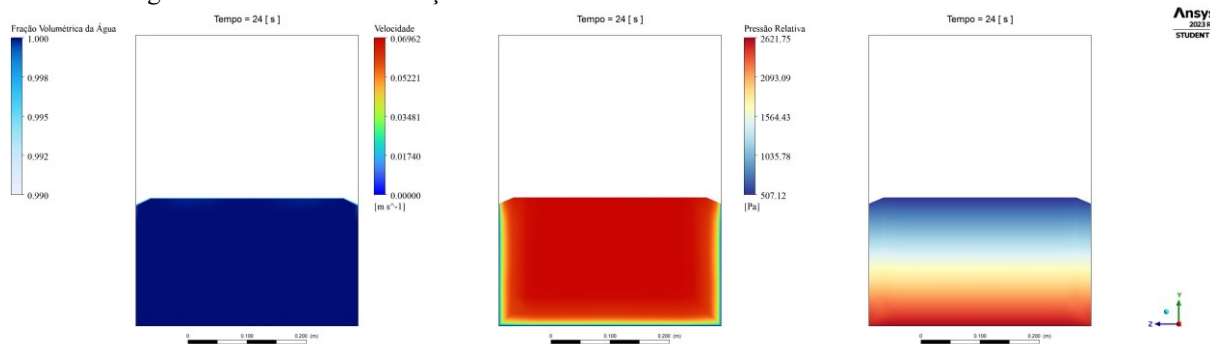
Figura 76 – Detalhamento do Comportamento da Velocidade Local do Escoamento para Revestimento em Acrílico



Fonte: O Autor (2024).

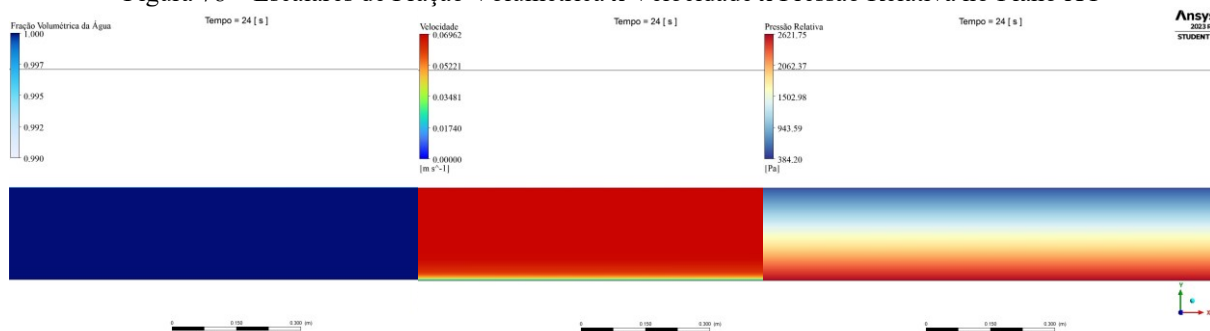
Entre as Figuras 77 e 79, observa-se a comparação entre os 3 escalares estudados por esta seção: fração volumétrica da água; pressão relativa, e; velocidade. Cada uma das Figuras apresenta os escalares para diferentes planos: YZ; XY, e; ZX; respectivamente.

Figura 77 – Escalares de Fração Volumétrica x Velocidade x Pressão Relativa no Plano YZ



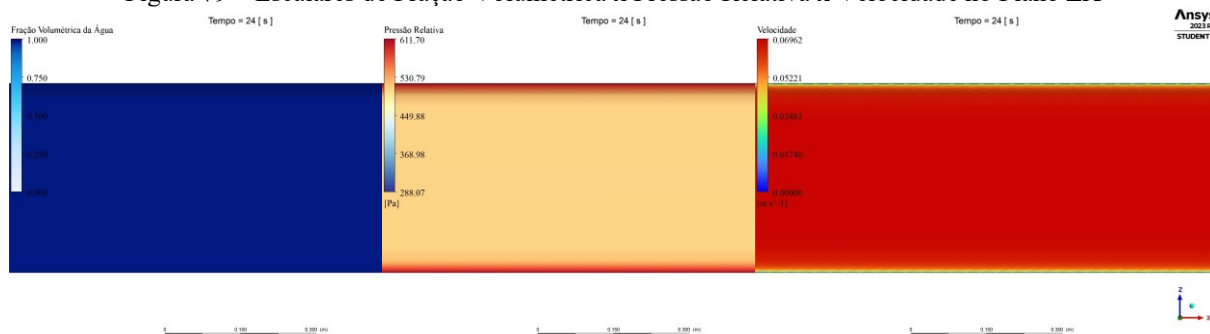
Fonte: O Autor (2024).

Figura 78 – Escalares de Fração Volumétrica x Velocidade x Pressão Relativa no Plano XY



Fonte: O Autor (2024).

Figura 79 – Escalares de Fração Volumétrica x Pressão Relativa x Velocidade no Plano ZX



Fonte: O Autor (2024).

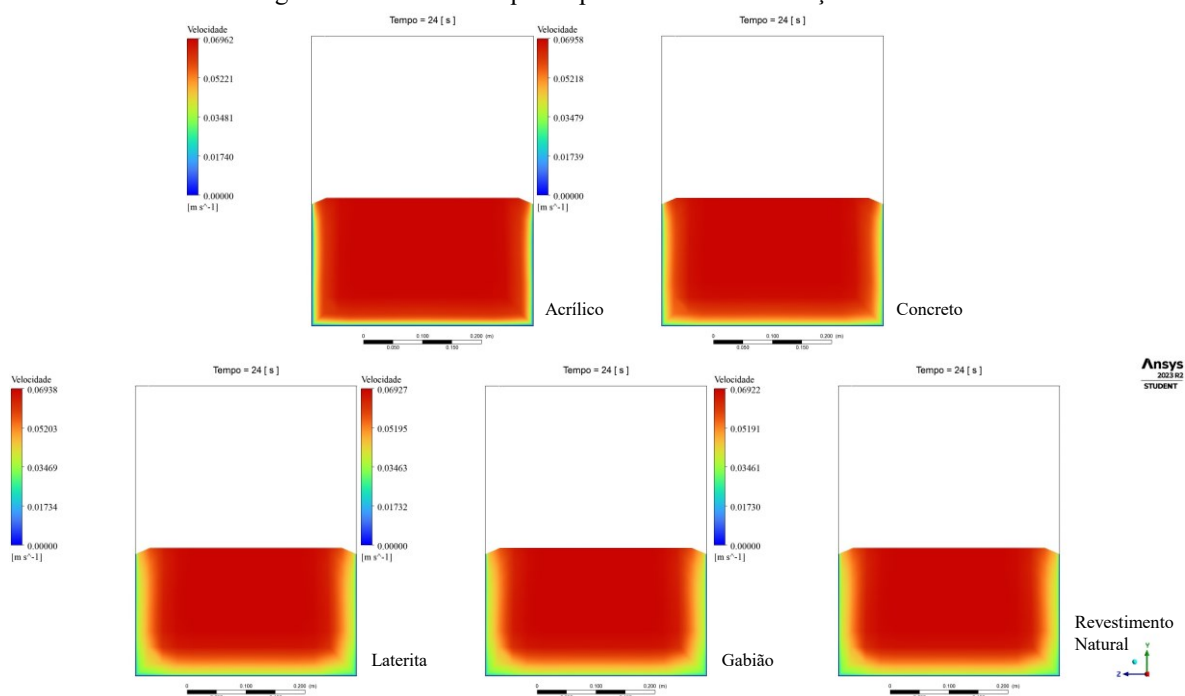
5.4 ANÁLISE QUANTI-QUALITATIVA PARA DIFERENTES RUGOSIDADES

Dada a verificação realizada na seção anterior, partiu-se para a análise dos escalares para diferentes rugosidades aplicadas às condições de paredes, conforme atribuído na Tabela 10. A Figura 80 apresenta os perfis isotáquicos de velocidade para o plano XY, de forma análoga às curvas isotáquicas apresentadas na Figura 1. Na respectiva Figura, são apresentados os gradientes de velocidade para os 5 diferentes tipos de revestimento. Observa-se que a distribuição da velocidade através do plano dos revestimentos em acrílico e em concreto são

mais próximos, diferente dos demais materiais, os quais apresentam um comportamento mais parecidos entre si. Tal fenômeno é coerente com o demonstrado pelo gráfico da Figura 43, em que a curva possui um caráter exponencial e comporta-se de forma semelhante à Figura 80. Para mais, observa-se, então, que a parte central do escoamento não sofre influência significativa das condições de parede, de forma que a diferença no escalar de velocidade se deu apenas na terceira casa decimal. Ressalta-se que todos os resultados desta seção são dados para $t = 24$ s.

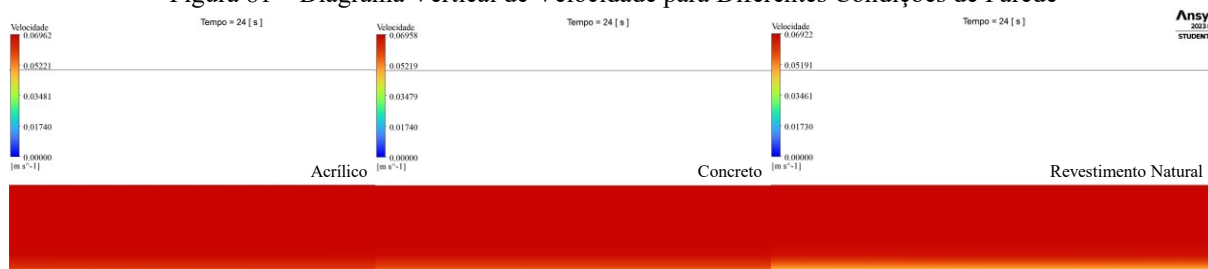
Objetivando sintetizar os resultados, devido às semelhanças apresentadas pelos revestimentos em gabião e laterita, as Figuras 81 e 82 demonstram os resultados apenas para os revestimentos de acrílico, concreto e solo natural, para os planos YZ e ZX. Verifica-se, então, o mesmo comportamento qualitativo da Figura 80.

Figura 80 – Perfis Isotáquicos para Diferentes Condições de Parede



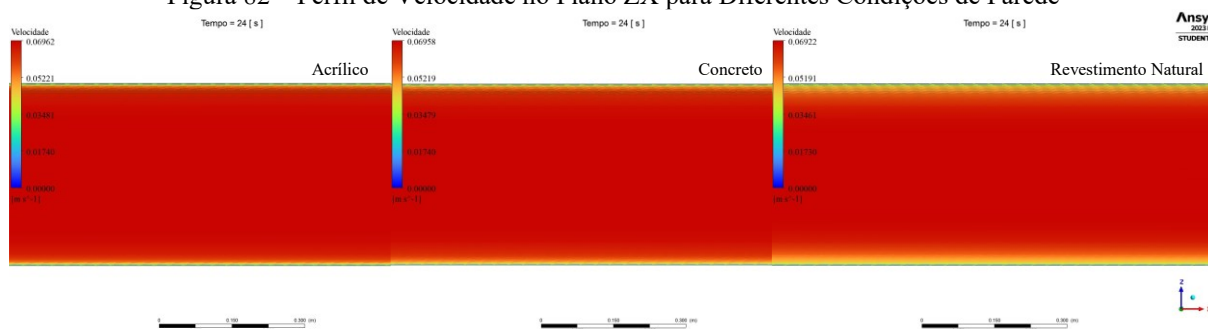
Fonte: O Autor (2024).

Figura 81 – Diagrama Vertical de Velocidade para Diferentes Condições de Parede



Fonte: O Autor (2024).

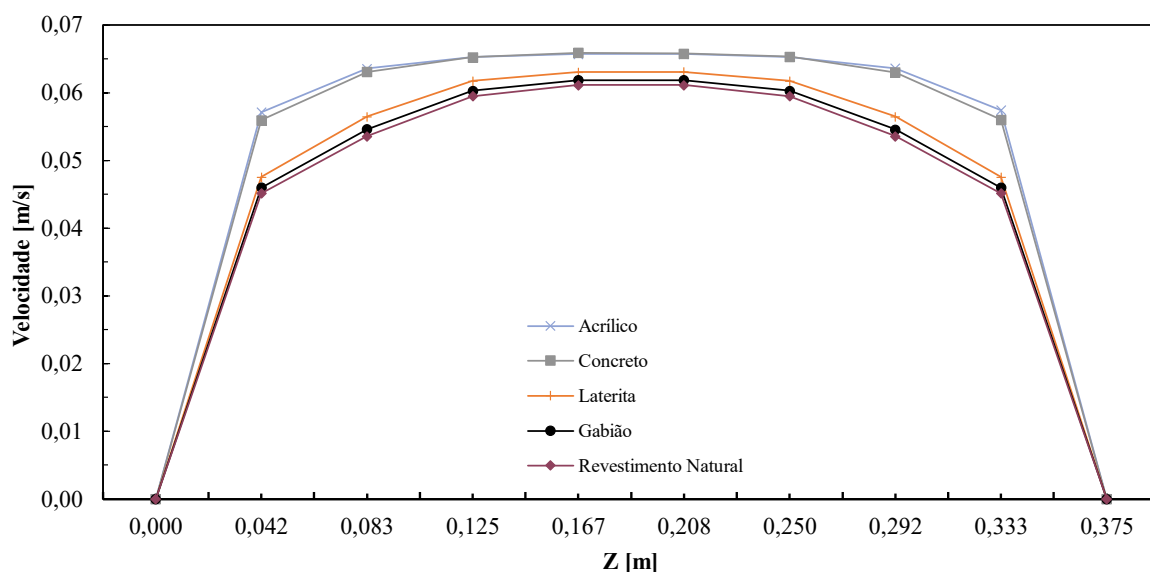
Figura 82 – Perfil de Velocidade no Plano ZX para Diferentes Condições de Parede



Fonte: O Autor (2024).

De forma a iniciar uma análise quantitativa dos resultados, as Figuras 83 e 85 apresentam o comportamento gráfico dos mesmos perfis apresentados nas Figuras 82 e 81, respectivamente. Na Figura 83 é possível observar que os revestimentos de acrílico e concreto demonstram um perfil extremamente parecido, apresentando sua maior diferença apenas no ponto $0,042 \text{ m}$ do eixo Z, com uma variação de $0,0012 \text{ m/s}$ na velocidade. Também se observa que os demais materiais realmente possuem um comportamento bem próximo, conforme já verificado na Figura 80. A Tabela 22 apresenta numericamente cada uma das velocidades encontradas para os pontos notáveis ao longo do eixo Z, definidos pelo próprio *software*, para os diferentes materiais de revestimento.

Figura 83 – Gráfico do Perfil de Velocidade para Diferentes Rugosidades no Plano ZX



Fonte: O Autor (2024).

Tabela 22 – Valores de Velocidade para Diferentes Rugosidades no Eixo Z

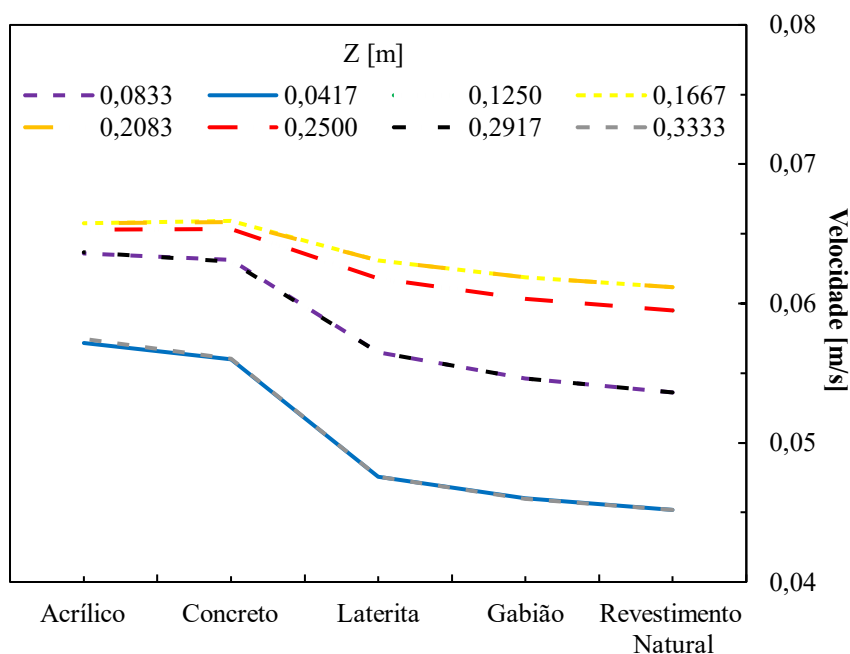
Z [m]	Velocidade Acrílico [m/s]	Velocidade Concreto [m/s]	Velocidade Laterita [m/s]	Velocidade Gabião [m/s]	Velocidade Revestimento Natural [m/s]
0,000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
0,042	0,0572	0,0560	0,0476	0,0460	0,0452
0,083	0,0636	0,0631	0,0565	0,0546	0,0536
0,125	0,0653	0,0653	0,0618	0,0603	0,0595
0,167	0,0657	0,0659	0,0631	0,0619	0,0612
0,208	0,0657	0,0658	0,0631	0,0619	0,0612
0,250	0,0653	0,0654	0,0618	0,0603	0,0595
0,292	0,0637	0,0630	0,0565	0,0546	0,0536
0,333	0,0575	0,0560	0,0476	0,0460	0,0452
0,375	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000

Fonte: O Autor (2024).

A Figura 84 apresenta as variações de velocidade para os diferentes pontos do eixo Z, para as diferentes rugosidades. Observa-se, inicialmente, uma sobreposição de pontos simétricos no eixo, como os pontos em 0,1250 m e 0,2500 m, demonstrando, novamente, uma boa leitura dos modelos equacionais. Além disso, observa-se que o escoamento é mais impactado até cerca de 0,0833 m das paredes, ou 8,33 cm, possuindo um perfil bem menor de variação nos demais pontos. O maior impacto se dá entre os materiais de concreto e laterita, consonante novamente com a Figura 43. Como já apontado ao decorrer do corpo do texto, as

pequenas variações, na casa de 10^{-3} , podem se dar também devido ao resíduos do cálculo numérico, não tendo influência necessariamente apenas das condições de parede.

Figura 84 – Variações de Velocidade para Diferentes Pontos e Rugosidades no Eixo Z



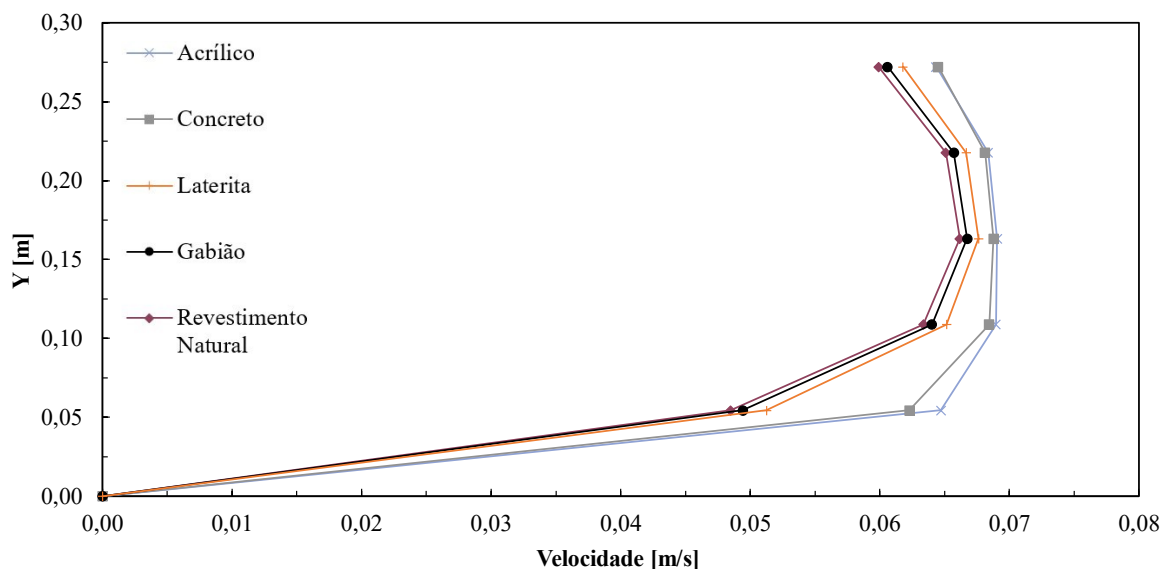
Fonte: O Autor (2024).

Na Figura 85 é possível observar que os revestimentos de acrílico e concreto também demonstram um perfil extremamente parecido, conforme também a Figura 83, apresentando sua maior diferença apenas no ponto 0,054 m do eixo Y, com uma variação de 0,0024 m/s na velocidade. Também se observa que os demais materiais realmente possuem um comportamento bem próximo, conforme já verificado na Figura 80. A Tabela 23 apresenta numericamente cada uma das velocidades encontradas para os pontos notáveis ao longo do eixo Y, definidos pelo próprio *software*, para os diferentes materiais de revestimento.

Observa-se, também, que a Figura 85 apresenta um comportamento muito parecido com o predito pela Figura 2. Entretanto, a partir do ponto 0,218 m do eixo Y, o gráfico apresenta um comportamento ligeiramente destoante do esperado. Tal fato se deve, principalmente, a mudança no perfil multifásico, já que, observando a fração volumétrica da água apresentada na Figura 64, no ponto 0,272 m do eixo Y, o escoamento já é majoritariamente composto por ar. Sendo assim, é necessário olhar para o perfil entendendo que se trata da velocidade global do modelo multifásico, não podendo ser analisada a velocidade da água de forma isolada, sendo uma limitação do modelo VoF, conforme já abordado na subseção 3.4.6, que diz que o campo

de velocidade encontrado é compartilhado entre todas as fases. Ainda assim, observa-se, de acordo com o trabalho de Bonakdari *et al.* (2014), que este comportamento já é previsto na literatura e que começa a ocorrer dentro dessa faixa do eixo Y.

Figura 85 – Gráfico do Diagrama de Velocidade para Diferentes Rugosidades no Plano XY



Fonte: O Autor (2024).

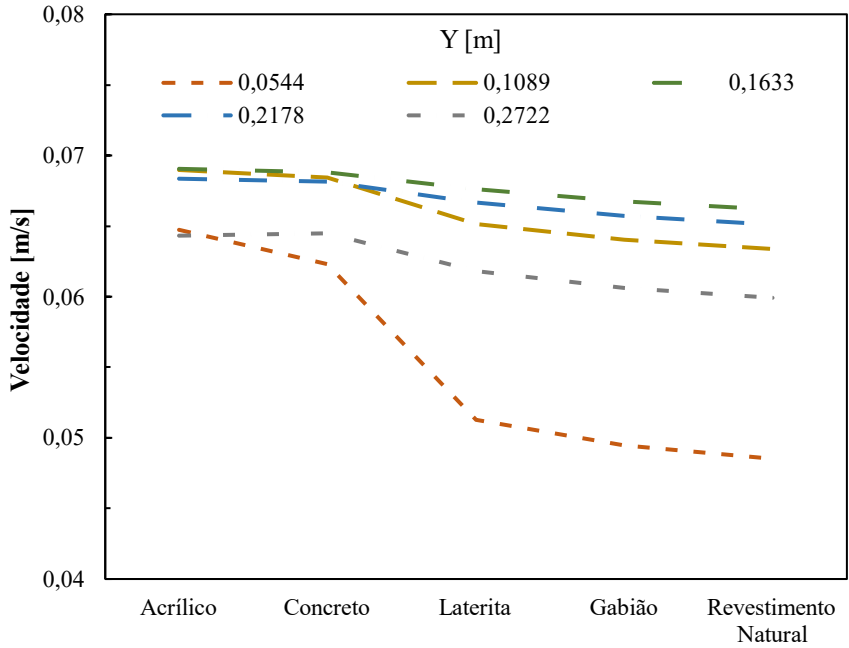
Tabela 23 – Valores de Velocidade para Diferentes Rugosidades no Eixo Y

Y [m]	Velocidade Acrílico [m/s]	Velocidade Concreto [m/s]	Velocidade Laterita [m/s]	Velocidade Gabião [m/s]	Velocidade Revestimento Natural [m/s]
0,000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
0,054	0,0647	0,0623	0,0513	0,0494	0,0485
0,109	0,0690	0,0685	0,0652	0,0640	0,0634
0,163	0,0691	0,0688	0,0676	0,0667	0,0662
0,218	0,0684	0,0681	0,0667	0,0657	0,0651
0,272	0,0643	0,0645	0,0618	0,0606	0,0599

Fonte: O Autor (2024).

A Figura 86 apresenta as variações de velocidade para os diferentes pontos do eixo Y, para as diferentes rugosidades. Observa-se que o escoamento é mais impactado até cerca de 0,0544 m das paredes, ou 5,44 cm, possuindo um perfil bem menor de variação nos demais pontos. O maior impacto se dá entre os materiais de concreto e laterita, consonante com a Figura 43 e sendo até maior que o demonstrado na Figura 84.

Figura 86 – Variações de Velocidade para Diferentes Pontos e Rugosidades no Eixo Y



Fonte: O Autor (2024).

Analisando-se percentualmente os resultados obtidos nas Tabelas 22 e 23, as Tabelas 24 e 25 apresentam as comparações entre os revestimentos em acrílico e solo natural. Para o eixo Z, obteve-se uma variação média de 13,19% e uma variação de 6,97% no centro do escoamento, na ordem de 0,0045 m/s. Para o eixo Y, obteve-se uma variação média de 9,81% e uma variação de 4,19% no centro do escoamento, na ordem de 0,0033 m/s.

Tabela 24 – Variação Percentual entre Rugosidade de Parede de Acrílico e em Revestimento Natural, no Eixo Z

Z [m]	Velocidade Acrílico [m/s]	Velocidade Revestimento Natural [m/s]	Variação [%]
0,000	0,0000	0,0000	0,00%
0,042	0,0572	0,0452	20,96%
0,083	0,0636	0,0536	15,67%
0,125	0,0653	0,0595	8,86%
0,167	0,0657	0,0612	6,97%
0,208	0,0657	0,0612	6,98%
0,250	0,0653	0,0595	8,88%
0,292	0,0637	0,0536	15,79%
0,333	0,0575	0,0452	21,37%
0,375	0,0000	0,0000	0,00%
Variação Média [%]			13,19%

Fonte: O Autor (2024).

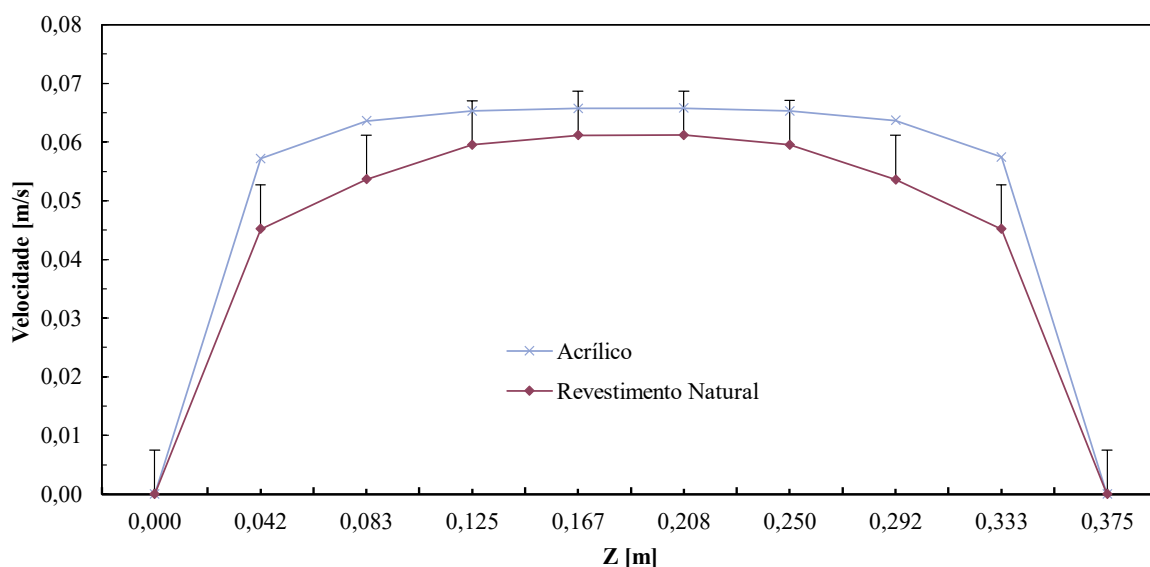
Tabela 25 – Variação Percentual entre Rugosidade de Parede de Acrílico e em Revestimento Natural, no Eixo Y

Y [m]	Velocidade Acrílico [m/s]	Velocidade Revestimento Natural [m/s]	Variação [%]
0,000	0,0000	0,0000	0,00%
0,054	0,0647	0,0485	25,08%
0,109	0,0690	0,0634	8,12%
0,163	0,0691	0,0662	4,19%
0,218	0,0684	0,0651	4,77%
0,272	0,0643	0,0599	6,89%
Variação Média [%]			9,81%

Fonte: O Autor (2024).

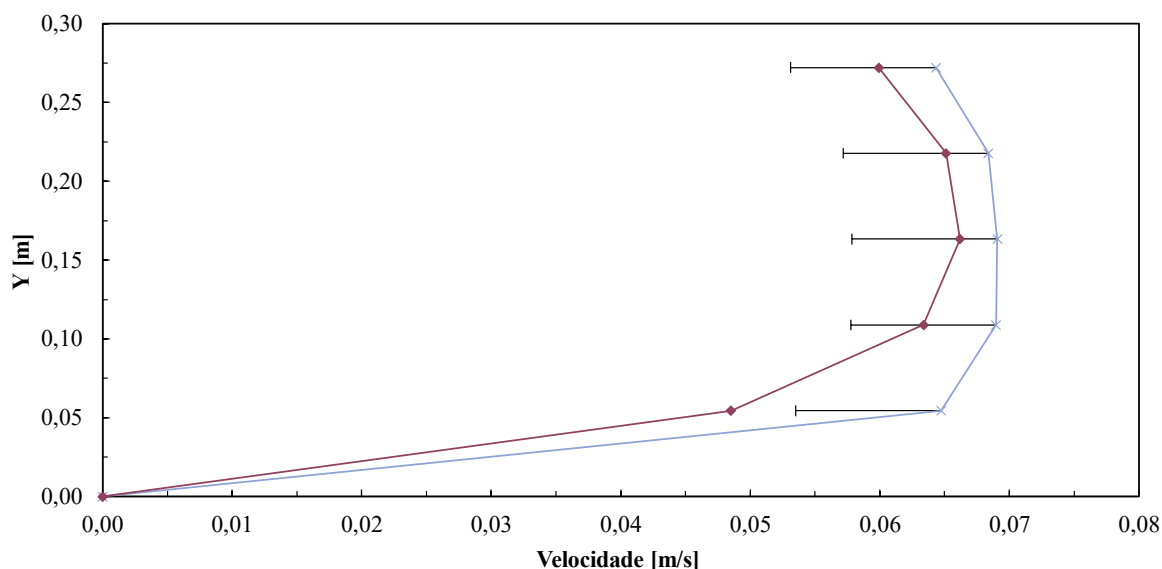
Por fim, ainda como resultados quantitativos, as Figuras 87 e 88 apresentam o erro padrão a partir do perfil de velocidade do revestimento natural em comparação ao acrílico para os plano ZX e XY, respectivamente. Observa-se que, a partir do ponto 0,0833 m do eixo Z e 0,0544 m do eixo Y, o erro padrão torna-se maior que a diferença de velocidade encontrada entre os dois tipos de condições de parede, ou seja, para as dimensões do canal estudado, a variação de velocidade no centro do escoamento tende a ser insignificante.

Figura 87 – Erro Padrão a partir do Perfil de Velocidade do Revestimento Natural em Comparação ao Acrílico no Plano ZX



Fonte: O Autor (2024).

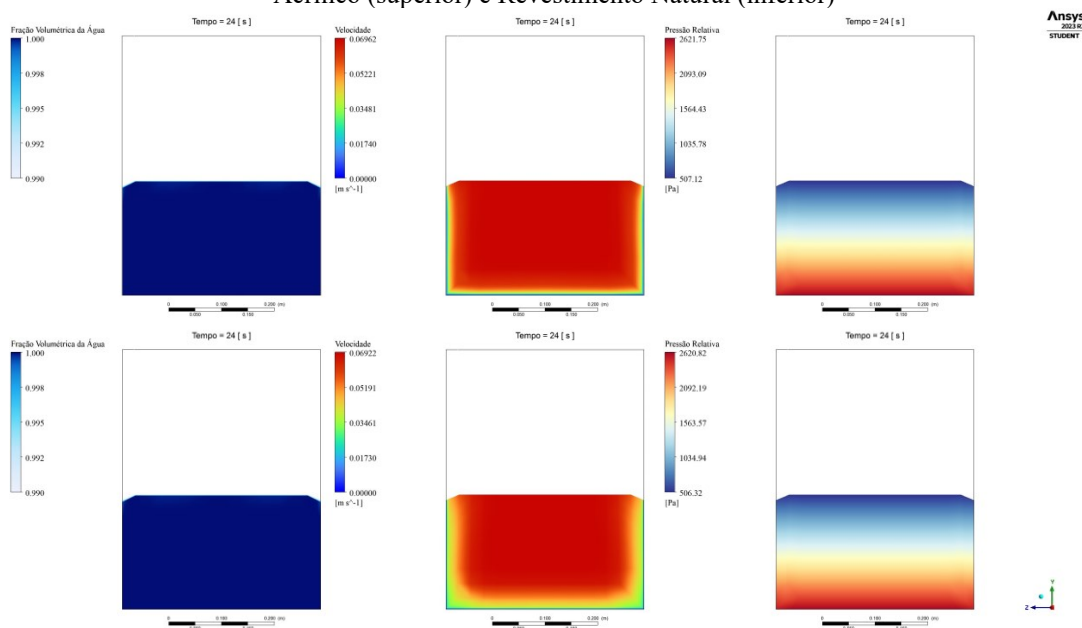
Figura 88 – Erro Padrão a partir do Diagrama Vertical de Velocidade do Revestimento Natural em Comparação ao Acrílico



Fonte: O Autor (2024).

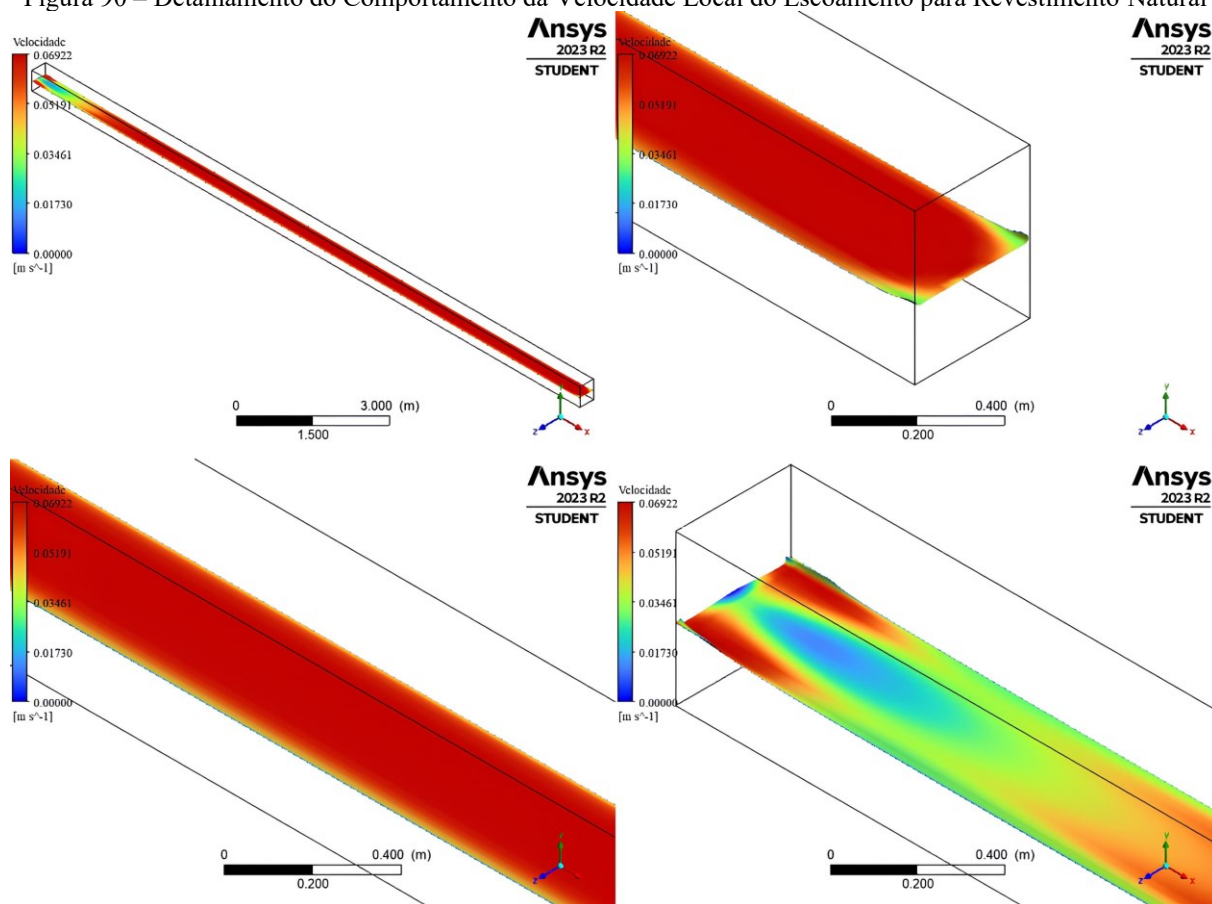
Ademais, qualitativamente, ainda é possível observar, na Figura 89, a comparação dos escalares de fração volumétrica, velocidade e pressão relativa, no plano YZ, para os revestimentos em acrílico e solo natural. Na Figura 90 é possível observar o detalhamento do comportamento da velocidade local do escoamento para revestimento natural e compará-lo com a Figura 76, de revestimento em acrílico, ocorrendo o fenômeno previsto por Li *et al.* (2020).

Figura 89 – Comparação dos Escalares de Fração Volumétrica - Velocidade - Pressão Relativa no Plano YZ para Acrílico (superior) e Revestimento Natural (inferior)



Fonte: O Autor (2024).

Figura 90 – Detalhamento do Comportamento da Velocidade Local do Escoamento para Revestimento Natural



Fonte: O Autor (2024).

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com o passar do último século, o conceito de drenagem urbana foi evoluindo, passando a não considerar a água apenas como um obstáculo a ser superado, mas também como membro integrante da sociedade urbana. Assim, os preceitos de canalização e retificação dos cursos d'água estão sendo superados, mas os projetos de canais ainda podem evoluir, principalmente no que tange ao entendimento sobre o impacto do coeficiente de rugosidade numa visão tridimensional do escoamento. Dito isto, neste Capítulo são detalhadas as principais conclusões desta dissertação. Além disso, apresenta-se as dificuldades encontradas, bem como propostas para futuros trabalhos.

6.1 CONCLUSÕES

Técnicas computacionais de cálculo numérico que envolvem a utilização CFD são muito comuns na literatura para análises de fenômenos de estruturas hidráulicas e de superfície livre. Entretanto, há espaço para maiores avanços no entendimento dos fenômenos que envolvam o impacto de diferentes rugosidades nas condições de parede de canais de macrodrenagem dentro de um aspecto mais tridimensional. Dessa forma, este trabalho buscou estudar o comportamento de diferentes escalares, e de forma especial a velocidade, em diferentes planos de um canal experimental existente no Laboratório de Hidráulica, Hidráulica Computacional e Hidrologia da UFPE. Neste sistema experimental, o canal possui paredes em acrílico e uma baixa declividade.

Dentre os resultados encontrados, destacam-se os seguintes pontos:

- I. Quanto à verificação, observou-se um excelente comportamento dos escalares no que se era esperado a partir dos modelos equacionais atribuídos. Para a pressão relativa, observou-se que os valores encontrados, a partir de um cálculo analítico com o uso da equação de Bernoulli, são bem correlacionados entre o valor da pressão relativa em pascal e a altura d'água de superfície livre observada experimentalmente, em metros. Além disso, os escalares de velocidade se comportaram dentro do esperado, tanto no plano YZ, comparando-se com o que a teoria aborda sobre as curvas isotáquicas, quanto no plano XY, comportando-se com o que a teoria aborda sobre o diagrama vertical de velocidades;

- II. Quanto aos resultados qualitativos, observa-se que os perfis isotáquicos se comportaram dentro do esperado, principalmente ao correlacionar os diferentes materiais com o gráfico que representa a relação entre o coeficiente de Manning (1891) e a rugosidade equivalente da areia de Nikuradse (1933). Verificou-se, então, que os revestimentos em acrílico e em concreto possuem comportamento semelhantes, os quais exponencialmente se diferenciam ao mudar para um revestimento laterítico, mas que volta a apresentar certa homogeneidade em comparação com os revestimentos em gabião ou em solo natural. A mesma observação é válida para os demais planos, seja XY ou ZX. Nestes resultados, é possível fazer um paralelo com o trabalho realizado por Ghani *et al.* (2014), que concluíram que as técnicas de CFD podem ser utilizadas como ferramentas eficazes para obtenção de bons resultados antes de realizar trabalhos experimentais em laboratório;
- III. Quanto aos resultados quantitativos, observa-se que a variação da velocidade só é significativa até o ponto 0,0833 m no eixo Z e 0,0544 m no eixo Y. Tal observação é ainda mais interessante com a observação do erro padrão, o qual demonstra que para as regiões centrais do escoamento, a variação da velocidade não é relevante. Ainda, analisando-se esses valores obtidos para a velocidade, verifica-se, para o eixo Z, uma variação de velocidade, no centro do escoamento, de apenas 0,0045 m/s. Para o eixo Y, verifica-se uma variação de velocidade, no centro do escoamento, de apenas 0,0033 m/s;
- IV. A partir dos dados quantitativos, observa-se que, mesmo em uma pequena calha fluvial, os valores no centro do escoamento tendem a valores muito pequenos. Assim, pode-se inferir que, em calhas com seções bem maiores, a influência das condições de parede tendem a ser ainda menores que as verificadas neste trabalho;
- V. Ambientalmente falando, pode-se entender que revestimentos naturais podem ser encarados de uma nova forma, já que se verifica que tendem a não ter tanta influência em situações de baixa declividade e com seções relevantes; assim, sugere-se que uma análise mais robusta na escolha do revestimento em projetos de canais seja realizada, não se limitando a respostas direcionadas apenas a velocidade do escoamento, já que este parâmetro não é mais tão relevante desde

a terceira fase da drenagem urbana, e a sintonia com a natureza é dada como o preceito mais relevante para a fase contemporânea;

- VI. Para mais, ressalta-se que este trabalho possui algumas limitações, não abrangendo aspectos de sedimentação, infiltração e escoamentos em alta declividade. Ainda, a utilização do modelo VoF impossibilita a análise da velocidade isolada da água, limitando-se a uma análise da velocidade para o somatório das fases. Muito embora, os resultados foram coerentes com as afirmativas encontradas pelo trabalho de Bonakdari *et al.* (2014).

Diante destas conclusões, a próxima seção trata das principais dificuldades encontradas durante a execução desta pesquisa.

6.2 DIFICULDADES ENCONTRADAS

Dentre as dificuldades encontradas para este projeto, destaca-se a falta de instrumentação para uma validação mais precisa. Apesar da boa verificação apresentada, uma validação seria determinante para corroborar com as conclusões encontradas. Dentre os instrumentos que possibilitariam uma boa validação, citam-se o *Acoustic Doppler Velocimeter* (ADV) e o *Acoustic Doppler Current Profiler* (ADCP).

O ADV é um instrumento que opera a partir de um sensor acústico intrusivo, em que se coleta os dados de velocidade local instantaneamente, situando-se a uma distância suficientemente grande da sonda, de forma que eventuais perturbações causadas sobre o escoamento no ponto de medição possam ser desprezadas (Rios *et al.*, 2011). Paralelamente, o ADCP trata-se de um aparelho empregado na medição de vazões d'água, utilizando-se de técnicas de sensoriamento remoto através do efeito Doppler (Rios *et al.*, 2011).

Apesar dos bons perfis e dos resultados que a utilização destes equipamentos poderiam agregar a esta dissertação, seu elevado custo e a não disponibilidade no laboratório impossibilitaram o seu uso.

6.3 PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS

Dentre as propostas para realização de futuros trabalhos, elencam-se:

- Análise do escoamento com a adição de processos de infiltração na base do canal para revestimentos que permitam tal fenômeno;

- Verificação da possibilidade de modelar uma dispersão de sedimentos para verificar sua influência em calhas fluviais de baixa declividade;
- Comparação dos resultados com outros softwares de modelagem hidrodinâmicas, como o HEC-RAS™, ou de fluidodinâmica, como o FLOW-3D™;
- Ensaios experimentais por meio de técnicas de flutuadores ou de medição com filmagem de celular e utilização de inteligência artificial;
- Estudo do impacto de diferentes equações de modelagem turbulenta no perfil de velocidades próximas a camada limite.

REFERÊNCIAS

- ABDULLAH, J. *et al.* Investigating the Relationship between the Manning Coefficients (n) of a Perforated Subsurface Stormwater Drainage Pipe and the Hydraulic Parameters. **Sustainability**, Basel, v. 15, n. 8, Apr. 2023.
- ALMEIDA, D. R. **Modelagem da distribuição de calor e temperatura, na fase transitória, para o processo de calcinação de gesso**. 2019. Dissertação (Mestrado em Tecnologia da Energia) – Escola Politécnica, Universidade de Pernambuco, Recife, 2017.
- ALMEIDA, P. V. P. *et al.* Análise Numérica e Experimental Aplicando CFD no Escoamento sobre Obstáculos em Microcanais. In: ENCONTRO INTERNACIONAL DE PRODUÇÃO CIENTÍFICA, 11., 2019, Maringá. **Anais [...]** Maringá: UNICESUMAR, 2019.
- ANDOH, R. Y. G.; DECLERCK, C. Source Control and Distributed Storage – A Cost Effective Approach to Urban Drainage for the New Millennium? In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON URBAN STORM DRAINAGE, 8., 1999, Sydney. **Proceedings [...]** Sydney: Stormwater Industry Association, 1999.
- ANJOS, F. A. **Análise da propagação de ressalto hidráulico num canal experimental a montante de um obstáculo**. 2020. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2020.
- ANSYS, Inc. **Ansys Fluent Theory Guide**. Canonsburg: ANSYS, 2021a.
- ANSYS, Inc. **Ansys Fluent Workbench Tutorial Guide**. Canonsburg: ANSYS, 2021b.
- ANSYS, Inc. **Ansys Meshing User's Guide**. Canonsburg: ANSYS, 2021c.
- ANSYS, Inc. **Module 05: Mesh quality & advanced topics**. Introduction to ANSYS Meshing. Canonsburg: ANSYS, 2016.
- ARASTOOPOUR, H.; GIDASPOW, D.; ABBASI, E. **Computational Transport Phenomena of Fluid-Particle Systems**. 1. ed. Cham Switzerland: Springer, 2007.
- AZEVEDO NETTO, J. M. *et al.* **Manual de hidráulica**. 9. ed. São Paulo: Blucher, 2018. 632 p.
- BAPTISTA, M.; NASCIMENTO, N.; BARRAUD, S. **Técnicas Compensatórias em Drenagem Urbana**. Porto Alegre: ABRH, 2005. 226p.
- BONAKDARI, H. *et al.* Turbulent velocity profile in fully-developed open channel flows. **Environmental Fluid Mechanics**, v. 8, n. 1, p. 1-17, Feb. 2008.
- BONAKDARI, H.; LIPEME-KOUYI, G.; ASAWA, G. L. Developing turbulent flows in rectangular channels: A parametric study. **Journal of Applied Research in Water and Wastewater**, Kermanshah, v. 1, n. 2, p. 51-56, June 2014.

CAMPOS, A. S. **A importância do coeficiente de rugosidade de Manning na avaliação numérica do assoreamento de reservatórios a fio d'água**. 2018. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2018.

CARDOSO, A. S. **Desenvolvimento de metodologia para avaliação de alternativas de intervenção em cursos de água em áreas urbanas**. 2008. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2008.

CARVALHO, A. T. F.; SILVA, O. G.; CABRAL, J. J. S. P. Efeitos do revestimento de canal e impermeabilização do solo à dinâmica de inundação do rio Arrombados – PE. **Geociências**, São Paulo, v. 36, n. 1, p. 76-88, mar. 2017.

CAVALCANTI, D. E. S. **Estudo fluidodinâmico computacional de um forno piloto rotativo contínuo a gás natural para produção de gesso beta**. 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2013.

CHRISTOFIDIS, D. *et al.* A evolução histórica da drenagem urbana: da drenagem tradicional à sintonia com a natureza. **Revista Engenharia Sanitária e Ambiental**, Rio de Janeiro, v. 43, n. 3, p. 94-108, dez. 2019.

CNBB. **Oração pela Abertura do Processo de Beatificação de Dom Henrique Soares da Costa, Bispo**. Caruaru: CNBB, 2020. Disponível em: <https://cnbbne2.org.br/wp-content/uploads/2020/09/Ora%C3%A7%C3%A3o-dom-Henrique.pdf>. Acesso em: 30 dez. 2023.

CORRÊA, T. H. P.; TEIXEIRA, B. A. N. A Resiliência como Fator de Gestão Urbana: Estudo de Caso do Plano Municipal de Drenagem Urbana de Porto Alegre, RS, Brasil. In: ENCONTRO LATINOAMERICANO E EUROPEU SOBRE EDIFICAÇÕES E COMUNIDADES SUSTENTÁVEIS, 3., 2019, Santa Fé. **Anais [...]** Porto Alegre: ANTAC, 2023.

COSTA, D. J. L. **Estudo da Influência de Macro-Rugosidades do Leito de um Canal Hidráulico sobre o Coeficiente de Reoxigenação Superficial**. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia Hidráulica e Saneamento) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2011.

COUTO, R. G. **Estudo Fluidodinâmico Computacional da Calcinação de Gipsita em um Forno Piloto**. 2019. Dissertação (Mestrado em Tecnologia da Energia) – Escola Politécnica, Universidade de Pernambuco, Recife, 2019.

DANIEL JÚNIOR, E. J. **Simulação da Drenagem Urbana de um Trecho do Bairro da Madalena, em Recife, utilizando Fluidodinâmica Computacional**. 2021. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica, Universidade de Pernambuco, Recife, 2021.

DIANAT, M. *et al.* Coupled level-set volume of fluid simulations of water flowing over a simplified drainage channel with and without air Coflow. **SAE International Journal of Passenger Cars-Mechanical Systems**, United States, v. 10, n. 1, p. 369-377, 2017.

EMLURB. AUTARQUIA DE MANUTENÇÃO E LIMPEZA URBANA DO RECIFE. **Elaboração dos estudos de concepção para gestão e manejo de águas pluviais e drenagem urbana do Recife**. Recife, 2013.

GARRIDO NETO, P. S. *et al.* Conceitos relacionados à abordagem sustentável para a drenagem urbana no mundo e no Brasil. In: ENCONTRO NACIONAL DE ÁGUAS URBANAS, 12., 2018, Maceió. **Anais [...]** Maceió: ABRH, 2018.

GHANI, U.; ALI, S.; ARIF, S. Numerical Investigation of Developing Velocity Distributions in Open Channel Flows. **Mehran University Research Journal of Engineering and Technology**, Jamshoro, v. 33, n. 2, p. 137-148, Apr. 2014.

HIRSCH, C. **Numerical Computation of Internal and External Flows: The Fundamentals of Computational Fluid Dynamics**. 2. ed. Burlington: Butterworth-Heinemann, 2007.

IBGE. **Malha municipal digital e áreas territoriais**: 2022. Rio de Janeiro: IBGE, 2023. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/organizacao-do-territorio/malhas-territoriais/15774-malhas.html>. Acesso em: 18 mar. 2024.

INFANTE, P. S.; SEGERER, C. D. **Guía de Estudio: Obras Hidráulicas I**. Mendoza: UNCuyo, 2010.

KOECH, R. *et al.* CFD study of the hydraulic performance of large-diameter gated fluming. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, Reston, v. 141, n. 2, 2015.

LENZ, A. T. Viscosity and Surface Tension Effects on V-Notch Weir Coefficients. **Transactions of the American Society of Civil Engineers**, Reston, v. 108, n. 1, p. 759-782, Jan. 1943.

LI, H.; LI, Y.; HUANG, B.; XU, T. Flow Characteristics of the Entrance Region with Roughness Effect within Rectangular Microchannels. **Micromachines**, Basel, v. 11, n. 1, Jan. 2020.

LIEN, K.; MONTY, J. P.; CHONG, M. S.; OOI, A. The Entrance Length for Fully Developed Turbulent Channel Flow. In: AUSTRALASIAN FLUID MECHANICS CONFERENCE, 15., 2004, Sydney. **Proceedings [...]** Sydney: The University of Sydney, 2004.

LÓPEZ, D. *et al.* Smoothed Particle Hydrodynamics Method for Three-Dimensional Open Channel Flow Simulations. **Journal of Applied Fluid Mechanics**, Isfahan, v. 11, n. 6, p. 1599-1611, Nov. 2018.

LUNA, H. A. **Manutenção em canais de irrigação revestidos em concreto**. 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2013.

MANNING, R. On the flow of water in open channels and pipes. In: INSTITUTION OF CIVIL ENGINEERS OF IRELAND, 20., 1889, Dublin. **Proceedings [...]** Dublin: ICEI, Dec. 1891.

- MARRIOTT, M. J.; JAYARATNE, R. Hydraulic Roughness - Links Between Manning's Coefficient, Nikuradse's Equivalent Sand Roughness and Bed Grain Size. In: *Advances in Computing and Technology*, 5., 2010, London. **Proceedings** [...] London: University of East London, School of Architecture Computing and Engineering., 1999.
- MENDES, V. **Condutos Livres**. Salvador: UNEB, 2013.
- MENTER, F. R. Review of the shear-stress transport turbulence model experience from an industrial perspective. **International Journal of Computational Fluid Dynamics**, United Kingdom, v. 23, n. 4, p. 305-316, May 2009.
- MENTER, F. R. Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications. **AIAA Journal**, Reston, v. 32, n. 8, p. 1598-1605, Aug. 1994.
- MORAIS, V. H. P. *et al.* Aplicação de modelagem CFD em estudos de extravasores de barragens. In: CONGRESSO TÉCNICO CIENTÍFICO DA ENGENHARIA E DA AGRONOMIA, 1., 2014, Teresina. **Anais** [...] Campina Grande: EPGRAF, 2016.
- MUNICÍPIO DE TOLEDO. **Manual de drenagem urbana**. Toledo, 2017. 37 p. Disponível em: https://www.toledo.pr.gov.br/sites/default/files/manual_de_drenagem_urbana_-_volume_i.pdf. Acesso em: 13 nov. 2021.
- NEZU, I.; NAKAGAWA, H. **Turbulence in open-channel flows**. Rotterdam: A. A. Balkema Publishers, 1993.
- NIKURADSE, J. **Strömungsgesetze in rauhen Rohren**. Berlin: VDI-Forschungsheft, 1933.
- NOVAK, L. **Apêndice A: Dados de Propriedades de Fluidos**. Curitiba: UFPR, 2020.
- REGUEIRO-PICALLO, M. *et al.* Experimental and Numerical Analysis of Egg-Shaped Sewer Pipes Flow Performance. **Water**, A Coruña, v. 8, n. 12, p. 587, 2016.
- RILEY, A. L. **Restoring Streams in Cities: A Guide for Planners, Policymakers, and Citizens**. Washington, D.C.: Island Press, 1998. 423p.
- RIOS, F. P. *et al.* Estudo Comparativo Entre Métodos de Medição de Vazão em Cursos D'água. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 19., 2011, Maceió. **Anais** [...] Maceió: ABRH, 2011.
- SÁNCHEZ-BELTRÁN, H. *et al.* Characterization of modular deposits for urban drainage networks using CFD techniques. **Procedia Engineering**, Cartagena, v. 186, p. 84-92, 2017.
- SIMONDS, E. A. *et al.* **Elaboração de Projetos de Irrigação**. 2. ed. Brasília: Secretaria de Recursos Hídricos, 2002.
- SILVA, A. C. **Simulação numérica de escoamento sob comportas usando técnicas de dinâmica dos fluidos computacional**. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2017.

SILVA, B. L. A.; OLIVEIRA, I. C. A.; BUENO, L. L. N.; SILVA, T. P. D.; RODRIGUES, J. C. S.; AMARANTE, M. S. Conjunto de drenagem urbana nas cidades e sua importância na redução de inundações e enchentes. **Revista Pesquisa e Ação**, Mogi das Cruzes, v. 5, n. 2, p. 205-227, jun. 2019.

SILVA, M. *et al.* Análise do Coeficiente de Transferência de Massa e o Uso da Fluidodinâmica Computacional (CFD) para Canal Hidráulico. In: CONGRESO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA, 28., 2018, Buenos Aires. **Anais [...]** Buenos Aires: INA, 2018.

SILVA, N. M.; TARQUI, J. L. Z.; VIANA, E. M. F. Critérios para Modelagem Fluidodinâmica Computacional (CFD) do Processo de Assoreamento do Modelo Físico de um Reservatório a Fio D'água. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 25., 2023, Aracaju. **Anais [...]** Aracaju: ABRH, 2023.

SILVA, P. O. **Análise de técnicas compensatórias de drenagem urbana para atenuação de inundações em uma sub-bacia do rio Jiquiá no Recife**. 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2010.

SILVEIRA, A. L. L. **Drenagem Urbana**. Aspectos de Gestão. 1. ed. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2002.

SOUTO, H. P. A. *et al.* Simulação numérica de escoamentos com superfícies livres empregando o método Weakly Compressible Smoothed Particle Hydrodynamics (WCSPH) e o processamento em paralelo com Unidades de Processamento Gráfico e a API CUDA. **Ciência e Natura**, Santa Maria, v. 39, n. 3, p. 569-594, set./dez. 2017.

TOMINAGA, A.; NEZU, I.; EZAKI, K.; NAKAGAWA, H. Three dimensional turbulent structure in straight open channel flows. **Journal of Hydraulic Research**, Hong Kong, v. 27, n. 1, p. 149-173, 1989.

TUCCI, C. E. M. Coeficiente de escoamento e vazão máxima de bacias urbanas. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 5, n. 1, p. 61-68, jan./mar. 2000.

TUCCI, C. E. M. Drenagem Urbana. **Ciência e Cultura**, São Paulo, v. 55, n. 4, p. 36-37, out./dez. 2003.

TUCCI, C. E. M. Urban Waters. **Estudos Avançados**, São Paulo, v. 22, n. 63, p. 97-112, 2008.

TUCCI, C. E. M. **Gestão da Drenagem Urbana**. Brasília, DF: CEPAL. Escritório no Brasil/IPEA, 2012. 50 p. (Texto para Discussão, n. 48).

UFOP. **Vertedores – Introdução**. Ouro Preto: DECIV - Escola de Minas - UFOP, 2014. Disponível em: <https://docplayer.com.br/12890412-Vertedoresintroducao.html>. Acesso em: 30 dez. 2021.

URBANEK, V. N. *et al.* Modelagem da transição entre escoamentos de superfície livre e condutos forçados. In: REUNIÃO ANUAL DA SOCIEDADE BRASILEIRA PARA PROGRESSO DA CIÊNCIA, 71., 2019, Campo Grande. **Anais [...]** São Paulo: SBPC, 2019.

URBONAS, B.; STAHR, P. **Stormwater: Best Management Practices and Detention for Water Quality, Drainage, and CSO Management**. 1. ed. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1993.

USDA. **Irrigation Guide**. 1. ed. Washington, D.C: USDA, 1997.

VERSTEEG, H. K.; MALALASEKERA, W. **An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method**. 2. ed. Harlow: Pearson Education, 2007.

VIEIRA, C. B. **Simulação computacional da convecção natural em cavidades contendo um fluido com geração interna de calor**. 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia Nuclear) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2010.

WILCOX, D. C. Formulation of the $k-\omega$ Turbulence Model Revisited. **AIAA Journal**, Reston, v. 46, n. 11, p. 2823-2838, Nov. 2008.

WILCOX, D. C. **Turbulence Modeling for CFD**. 2. ed. La Cañada Flintridge: DCW Industries, 1998.

YEN, B.C. **Channel Flow Resistance Centennial of Manning's Formula**. 2. ed. Highlands Ranch: WRP, 2004.