

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS-UFAL  
CAMPUS DE A.C SIMÕES  
BACHARELADO EM ENGENHARIA QUÍMICA**

**LUCAS DA SILVA CARVALHO**

**AVALIAÇÃO NUMÉRICA DA QUALIDADE DE MISTURA E IDENTIFICAÇÃO DE  
ZONAS DE ESTAGNAÇÃO E ESTRATIFICAÇÃO NO INTERIOR DE  
RESERVATÓRIOS DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA**

**MACEIÓ  
2025**

Lucas da Silva Carvalho

**AVALIAÇÃO NUMÉRICA DA QUALIDADE DE MISTURA E IDENTIFICAÇÃO DE  
ZONAS DE ESTAGNAÇÃO E ESTRATIFICAÇÃO NO INTERIOR DE RESERVATÓRIOS  
DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA**

Monografia apresentada como requisito parcial para  
obtenção do grau de Bacharel em BACHARELADO  
EM ENGENHARIA QUÍMICA da Universidade  
Federal de Alagoas - UFAL, Campus de A.C Simões.

Orientador: Prof. Me. Larissa Lima de Arruda Melo  
Prof. Dr. Rodolfo Junqueira Brandão

Maceió

2025

**Catalogação na Fonte  
Universidade Federal de Alagoas  
Biblioteca Central  
Divisão de Tratamento Técnico**

Bibliotecário: Marcelino de Carvalho Freitas Neto – CRB-4 – 1767

C331a Carvalho, Lucas da Silva.

Avaliação numérica da qualidade de mistura e identificação de zonas de estagnação e estratificação no interior de reservatórios de distribuição de água / Lucas da Silva Carvalho. – 2025.

86 f. il. : figs. ; tabs. color.

Orientador: Rodolfo Junqueira Brandão.

Co-orientadora: Larissa Lima de Arruda Melo.

Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Química).  
Universidade Federal de Alagoas. Centro de Tecnologia. Maceió, 2025.

Bibliografia: f. 84-86.

1. Cloro residual livre. 2. Fluidodinâmica computacional. 3. Reservatórios - Escoamento. 4. Ansys (*Software*). I. Título.

CDU: 627.81

## AGRADECIMENTOS

Gostaria de expressar minha mais profunda gratidão aos meus pais, Sandra e Ayrton, cujo amor incondicional e dedicação incansável sempre abriram caminhos para que eu pudesse sonhar alto e alcançar meus objetivos.

Ao meu primo Samuel, que é muito mais do que família para mim, oferecendo-me carinho, apoio e companheirismo em cada etapa da minha jornada;

À minha segunda família, Hélio, Karol e Rosa, por terem sido um suporte inestimável, acolhendo-me com tanto afeto e proporcionando um lar onde sempre me senti abraçado e feliz em Maceió;

Aos meus queridos e indispensáveis amigos Luz, Clarisse, Beatriz e Débora, com quem compartilhei incontáveis momentos de alegria e cuja amizade foi essencial para que eu seguisse em frente;

À Amanda e ao Filipe, por me inspirarem a sonhar mais alto e mostrarem que um lar pode surgir nos lugares mais inesperados;

À Alice, minha fiel companheira e grande dupla, cuja presença e lealdade trouxeram significado e apoio incondicional à minha caminhada;

Ao Marlos, amigo de graduação e da vida, com quem vivi tantas temporadas, roteiros e ansiedades, sempre aguardando juntos os próximos "plot twists" de nossas histórias;

Ao Vitor, com quem compartilhei momentos inesquecíveis, cheios de alegria e conexão, cuja energia me fascina;

Ao Diogo, um grande pilar de apoio e parceria ao longo dos anos, cuja amizade e cumplicidade me ajudaram a avançar;

À Aline, minha conexão instantânea e família nos momentos mais desafiadores, cuja presença foi uma âncora essencial em tempos turbulentos;

Aos meus eternos amigos Chagas, Pedro, Ciça e Carlos, que sempre trouxeram leveza, risadas e uma amizade genuína;

Ao professor Rodolfo e à Larissa, cujo apoio e incentivo foram fundamentais para minha trajetória acadêmica e profissional, impulsionando-me a crescer e explorar novos caminhos;

Ao Carlos, Gabriel, Guilherme, João, Juliana, Érika, Léa e Pablo, por toda a parceria, cumplicidade e apoio ao longo da minha jornada profissional.

La inteligencia sin ambición es como un pájaro sin sus alas.

Salvador Dalí

## RESUMO

A redução significativa da concentração de cloro residual livre (CRL) é um dos fatores de maior preocupação nos sistemas de distribuição de água, tendo em vista que é um aspecto determinante quanto à potabilidade da água. Fatores como tempo de residência prolongado e tipo de mistura líquida levam à geração de zonas de estratificação e estagnação que contribuem para o decaimento de CRL. A fim de mitigar a problemática de decaimento de CRL nos reservatórios e garantir adequação aos parâmetros de qualidade para a potabilidade da água, o presente trabalho teve como objetivo realizar a análise numérica da qualidade de mistura e identificação de zonas de estagnação no interior de reservatórios de água. O objeto de estudo em questão foi um reservatório retangular de configuração semienterrada de armazenamento de água. As metodologias abordadas consistiram em realizar alterações nas variáveis de operação e projeto, as quais têm papel fundamental na geração de zonas de estagnação e de estratificação. A técnica utilizada foi o uso de resolvidores numéricos como a de fluidodinâmica computacional (CFD), para modelagem do processo e dos fenômenos associados, além da avaliação de aspectos quantitativos e qualitativos do escoamento em questão dentro do reservatório. Para a construção da geometria, modelagem da malha, resolução numérica e pós-processamento dos dados, foram utilizados os softwares da linha Ansys. Os achados deste estudo corroboram a literatura, que aponta a razão entre área de entrada e saída como um fator determinante na homogeneização do fluxo e na minimização de zonas de recirculação e estagnação. Configurações com maior razão E/S favorecem uma saída mais homogênea, enquanto configurações com menor razão podem gerar gradientes de pressão mais acentuados e favorecer a estratificação térmica. Além disso, a análise indicou que abordagens transientes poderiam fornecer uma representação mais precisa da dinâmica do escoamento, uma vez que o modelo estacionário pode limitar a captura de efeitos como oscilações turbulentas e instabilidades. Dessa forma, os resultados deste estudo contribuem para o entendimento da influência dos parâmetros geométricos e operacionais no comportamento do escoamento dentro de reservatórios, demonstrando que a otimização desses fatores pode maximizar a eficiência da mistura e minimizar efeitos indesejáveis, como estratificação e zonas de estagnação. A aplicação da fluidodinâmica computacional (CFD) mostrou-se uma ferramenta poderosa para essa análise, permitindo ajustes estratégicos na configuração do sistema

**Palavras-chave:** Cloro Residual Livre; Fluidodinâmica Computacional; Zonas de Estagnação e Estratificação; Ansys

## ABSTRACT

A significant reduction in the concentration of free residual chlorine (FRC) is one of the main concerns in water distribution systems, as it is a key factor in determining water potability. Factors such as prolonged residence time and the type of liquid mixing lead to the formation of stratification and stagnation zones, which contribute to FRC decay. To mitigate the issue of FRC decay in reservoirs and ensure compliance with water potability quality standards, this study aims to conduct a numerical analysis of mixing quality and the identification of stagnation zones within water reservoirs. The subject of this study is a semi-buried rectangular water storage reservoir. The methodologies employed involved modifying operational and design variables, which play a fundamental role in the formation of stagnation and stratification zones. An evaluation of the residence time for the liquid mixture was conducted, considering convective and diffusive aspects, as its determination is essential for validating the proposed modifications. The approach used numerical solvers, specifically computational fluid dynamics (CFD) techniques, to model the process and assess both quantitative and qualitative aspects of the flow inside the reservoir. For geometry construction, mesh modeling, numerical resolution, and post-processing of data, Ansys software was utilized. The findings of this study align with the literature, which highlights the ratio between the inlet and outlet areas as a determining factor in flow homogenization and in minimizing recirculation and stagnation zones. Configurations with a higher inlet-to-outlet (I/O) ratio promote a more uniform outflow, while configurations with a lower ratio can generate steeper pressure gradients and favor thermal stratification. Additionally, the analysis indicated that transient approaches could provide a more accurate representation of flow dynamics, as the steady-state model may limit the capture of effects such as turbulent oscillations and instabilities. Thus, the results of this study contribute to understanding the influence of geometric and operational parameters on flow behavior within reservoirs, demonstrating that optimizing these factors can enhance mixing efficiency and minimize undesirable effects such as stratification and stagnation zones. The application of computational fluid dynamics (CFD) proved to be a powerful tool for this analysis, enabling strategic adjustments to the system configuration.

**Palavras-chave:** Free Residual Chlorine; Computational Fluid Dynamics; Stagnation and Stratification Zones; Ansys

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Configuração do reservatório de água. . . . .	35
Figura 2 – Fluxo de trabalho de uma simulação em CFD . . . . .	36
Figura 3 – Geometria criada em formato CAD para o reservatório de água . . . . .	41
Figura 4 – Construção da malha computacional . . . . .	41
Figura 5 – Configurações de malha utilizadas para o estudo de independência de malha . . . . .	42
Figura 6 – Configuração de planos criados para o pós-processamento dos resultados . . . . .	47
Figura 7 – Configuração C0 em sua vista lateral para o plano X0 para as diferentes velocidades . . . . .	52
Figura 8 – Configuração C0 em sua vista lateral para o plano X1 para as diferentes velocidades . . . . .	54
Figura 9 – Configuração C0 em sua vista superior para o plano Z0 para as diferentes velocidades . . . . .	56
Figura 10 – Configuração C2 em sua vista lateral para o plano X0 para as diferentes velocidades . . . . .	58
Figura 11 – Configuração C2 em sua vista lateral para o plano X1 para as diferentes velocidades . . . . .	60
Figura 12 – Configuração C2 em sua vista superior para o plano Z0 para as diferentes velocidades . . . . .	62
Figura 13 – Configuração C3 em sua vista lateral para o plano X0 para as diferentes velocidades . . . . .	64
Figura 14 – Configuração C3 em sua vista lateral para o plano X1 para as diferentes velocidades . . . . .	66
Figura 15 – Configuração C3 em sua vista superior para o plano Z0 para as diferentes velocidades . . . . .	68
Figura 16 – Configuração C4 em sua vista lateral para o plano X0 para as diferentes velocidades . . . . .	70
Figura 17 – Configuração C4 em sua vista lateral para o plano X1 para as diferentes velocidades . . . . .	72
Figura 18 – Configuração C4 em sua vista superior para o plano Z0 para as diferentes velocidades . . . . .	74
Figura 19 – Superfície de resposta da magnitude da velocidade em X0. . . . .	79
Figura 20 – Superfície de resposta da magnitude da velocidade em X1. . . . .	80
Figura 21 – Superfície de resposta da magnitude da velocidade em Z0. . . . .	81

## **LISTA DE TABELAS**

Tabela 1 – Condições de projeto atual . . . . .	36
Tabela 2 – Condições de operação atual . . . . .	36
Tabela 3 – Configurações geométricas das entradas e saídas do reservatório. . . . .	38
Tabela 4 – Configurações propostas para as condições de operação . . . . .	39
Tabela 5 – Planejamento Composto Central para a simulação numérica do reservatório	40
Tabela 6 – Condições de simulação no Ansys Fluent . . . . .	43
Tabela 7 – Pontos experimentais do Planejamento Composto Central (PCC). . . . .	77
Tabela 8 – Coeficientes da regressão múltipla para as variáveis estudadas. . . . .	78

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\Gamma$	Difusividade do material
$V$	Volume total do sistema
$Q$	Vazão volumétrica do fluido
$E(t)$	Fração do fluido que deixa o sistema com um determinado tempo de residiência $t$
$F(t)$	Fração cumulativa do fluido que saiu até o instante $t$
$C$	Concentração em relação ao tempo $t$
$k$	Constante
$e$	Exponencial
$Re$	Número de Reynolds
$\rho$	Massa específica do fluido
$L$	Comprimento característico
$\mu$	Viscosidade dinâmica
$\nu$	Viscosidade cinemática
$\omega$	Vetor vorticidade
$\mathbf{u}$	Vetor velocidade
$\eta$	Comprimento de Kolmogorov
$\epsilon$	Taxa de dissipação de energia turbulenta
$\nabla \cdot$	Operador divergente
$\nabla^2$	Operador laplaciano
$p$	Pressão do fluido
$\mathbf{g}$	Vetor da aceleração
$\mathbf{F}$	Fluxo da grandeza conservada
$V_p$	Volume de controle
$\phi$	Grandeza escalar

$F_f$  Fluxo pela face  $f$

$\Delta$  Variação

$\tau$  Tensor

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO . . . . .</b>	<b>14</b>
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS . . . . .</b>	<b>15</b>
2.1	Geral . . . . .	15
2.2	Específico . . . . .	15
<b>3</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA . . . . .</b>	<b>16</b>
3.1	Reservatórios . . . . .	16
3.1.1	Modificações de projeto . . . . .	16
3.1.2	Qualidade de mistura de água . . . . .	16
3.1.3	Zonas de estagnação . . . . .	17
3.1.4	Zonas de estratificação . . . . .	17
3.2	Tempo de residência . . . . .	18
3.2.1	Distribuição de Tempos de Residência (RTD) . . . . .	19
3.3	Cloro Residual Livre . . . . .	19
3.4	Mecânica dos fluidos . . . . .	20
3.4.1	Classificação dos escoamentos . . . . .	20
3.4.1.1	Escoamentos Laminares e Turbulentos . . . . .	20
3.4.1.2	Escoamentos Incompressíveis e Compressíveis . . . . .	20
3.4.1.3	Escoamentos Estacionários e Transientes . . . . .	20
3.4.1.4	Escoamentos Internos e Externos . . . . .	20
3.4.1.5	Escoamentos Monofásicos e Multifásicos . . . . .	21
3.4.2	Condição de não-deslizamento . . . . .	21
3.4.2.1	Impacto em Estudos de CFD . . . . .	21
3.4.3	Viscosidade . . . . .	22
3.4.4	Vórtices e a Aleatoriedade dos Escoamentos Turbulentos . . . . .	22
3.4.4.1	Geração e Dissipação de Vórtices . . . . .	23
3.4.4.2	Aleatoriedade e Estruturas Coerentes . . . . .	23
3.5	Fluidodinâmica Computacional . . . . .	24
3.6	O Método dos Volumes Finitos . . . . .	25
3.6.1	Etapas de um estudo de simulação computacional e utilização de ferramentas CAE . . . . .	27
3.6.1.1	Definição do Problema . . . . .	27
3.6.1.2	Modelagem Geométrica . . . . .	27

3.6.1.3	Geração da Malha . . . . .	27
3.6.1.3.1	Classificação das Malhas . . . . .	28
3.6.1.3.2	Qualidade de malha . . . . .	28
3.6.1.3.3	Índice Convergência de Malha . . . . .	29
3.6.1.4	Definição dos Modelos Físicos e Condições de Contorno . . . . .	29
3.6.1.5	Configuração da Simulação . . . . .	29
3.6.1.6	Execução da Simulação . . . . .	29
3.6.1.7	Análise dos Resultados . . . . .	30
3.6.1.8	Validação e Conclusões . . . . .	30
3.6.2	Modelagem da turbulência . . . . .	30
3.6.2.1	RANS ( <i>Reynolds Averaged Navier-Stokes</i> ) . . . . .	31
3.6.2.1.1	Modelos $k-\omega$ e $k-\epsilon$ . . . . .	32
3.6.2.2	DNS ( <i>Direct Numerical Simulation</i> ) . . . . .	33
3.6.2.3	LES ( <i>Large Eddy Simulation</i> ) . . . . .	33
3.7	Planejamento Composto Central (PCC) . . . . .	33
<b>4</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS . . . . .</b>	<b>35</b>
4.1	Objeto de estudo . . . . .	35
4.2	Simulação numérica . . . . .	35
4.3	Interpretação física do problema . . . . .	37
4.4	Planejamento experimental . . . . .	38
4.5	Pré-processamento . . . . .	39
4.5.1	Geometria . . . . .	40
4.5.2	Malha . . . . .	40
4.5.3	<i>Setup</i> . . . . .	43
4.5.3.1	Regime . . . . .	43
4.5.3.2	Condições de contorno . . . . .	44
4.5.3.3	Modelo de turbulência . . . . .	45
4.6	Processamento . . . . .	45
4.6.1	Processamento da Simulação . . . . .	45
4.6.2	Ansys Fluent . . . . .	46
4.7	Pós-processamento . . . . .	46
4.7.1	Tratamento e extração dos dados . . . . .	48
4.7.2	Ajuste do modelo de regressão múltipla . . . . .	48

4.7.3	Construção das superfícies de resposta . . . . .	49
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES . . . . .</b>	<b>50</b>
5.1	Avaliação Preliminar . . . . .	50
5.2	Análise Qualitativa . . . . .	50
5.2.1	Avaliação de C0/X0 . . . . .	50
5.2.2	Avaliação de C0/X1 . . . . .	52
5.2.3	Avaliação de C0/Z0 . . . . .	54
5.2.4	Avaliação de C2/X0 . . . . .	56
5.2.5	Avaliação de C2/X1 . . . . .	58
5.2.6	Avaliação de C2/Z0 . . . . .	60
5.2.7	Avaliação de C3/X0 . . . . .	62
5.2.8	Avaliação de C3/X1 . . . . .	64
5.2.9	Avaliação de C3/Z0 . . . . .	66
5.2.10	Avaliação de C4/X0 . . . . .	68
5.2.11	Avaliação de C4/X1 . . . . .	70
5.2.12	Avaliação de C4/Z0 . . . . .	72
5.2.13	Síntese do observado . . . . .	74
5.2.14	Discussão Geral . . . . .	75
5.3	Análise Estatística do Planejamento Composto Central . . . . .	77
5.3.1	Análise da Velocidade em X0 . . . . .	78
5.3.2	Análise da Velocidade em X1 . . . . .	79
5.3.3	Análise da Velocidade em Z0 . . . . .	80
5.3.4	Discussão Geral . . . . .	81
<b>6</b>	<b>CONCLUSÃO . . . . .</b>	<b>82</b>
<b>7</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS E TRABALHOS FUTUROS . . . . .</b>	<b>83</b>
<b>REFERÊNCIAS . . . . .</b>		<b>84</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O Brasil enfrenta desafios significativos no saneamento básico, com 32 milhões de pessoas sem acesso à água potável e 90 milhões sem acesso à coleta de esgoto, segundo o Ranking do Saneamento 2024 do Instituto Trata Brasil (BRASIL, 2024). Além disso, apenas 62,5% dos domicílios brasileiros possuem acesso à rede de coleta de esgoto, conforme o Censo Demográfico de 2022 do IBGE (??). Esses números evidenciam uma realidade distante do ideal, impactando diretamente a saúde pública e a qualidade de vida da população.

Nesse contexto, é fundamental que centrais de tratamento e distribuição de água assegurem a potabilidade da água fornecida à população, considerando os critérios estabelecidos pela Portaria GM/MS nº 888/2021 do Ministério da Saúde, que determina os parâmetros de qualidade da água para consumo humano. Assim, garantir altos níveis de desempenho e eficiência em cada etapa do processo de tratamento e distribuição é essencial para manter a conformidade com as normas vigentes e assegurar condições adequadas de saneamento (BÁSICO, 2024).

Nesse viés, os reservatórios de água possuem um papel chave nessa configuração, uma vez que constituem a última etapa de um sistema de distribuição e tratamento de água antes de chegar à população e existe uma alta possibilidade de alterações significativas nos níveis de Cloro Residual Livre (CRL), proporcionando a perda do agente desinfetante e dando espaço para a presença de microrganismos. (AKUFFO et al., 2013; WALSKI et al., 2004).

Com isso, surge a necessidade de um estudo assertivo que possa sanar problemáticas atuais quanto aos reservatórios de água, como a presença de zonas de estagnação, estratificação térmica e ausência de uma mistura uniforme em todo o reservatório (RIBEIRO, 2018; SILVA, 2014).

A simulação computacional se insere como uma ferramenta substancial para essa avaliação, fornecendo um estudo completo sobre as mais diferentes configurações de reservatórios e garantindo uma alta precisão e assertividade nos resultados, replicando e modelando condições idênticas à realidade e fornecendo soluções eficazes, além de ser extremamente econômico por não necessitar de nenhum outro recurso além do computador.

A proposta do presente trabalho tem um alto impacto social, abarcando o objetivo de desenvolvimento sustentável, “água potável e saneamento”, promovendo melhores condições para a população a partir da otimização do uso dos reservatórios de água que possuem uso abrangente na sociedade e número altos de irregularidades

## 2 OBJETIVOS

### 2.1 GERAL

Mitigar as problemáticas de zonas de estagnação e estratificação presentes no reservatório de água através da técnica de resolução numérica computacional de problemas fluidodinâmicos, a fim de assegurar alto grau de potabilidade da água.

### 2.2 ESPECÍFICO

- Identificar a ocorrência de zonas de estagnação e estratificação no reservatório por meio da análise de contornos de velocidade, avaliando padrões de escoamento e regiões de baixa circulação.
- Propor modificações no projeto e na operação do reservatório, ajustando a razão entre áreas de entrada e saída e as velocidades de entrada da água, com o objetivo de mitigar o decaimento do Cloro Residual Livre (CRL).
- Realizar um estudo de independência de malha para selecionar a discretização mais adequada, garantindo equilíbrio entre precisão dos resultados e eficiência computacional.
- Desenvolver um planejamento composto central e aplicar análise estatística para quantificar a influência das variáveis operacionais e geométricas no comportamento do escoamento e na preservação da qualidade da água

### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1 RESERVATÓRIOS

A fim de se manter regular a distribuição constante de água em função da alta demanda social de consumo, os centros de distribuição de água contam com um mecanismo muito importante que é a presença de reservatórios para o armazenamento de água. Esses são imprescindíveis para a manutenção constante da distribuição de água e melhoram a eficiência e flexibilidade de operação do sistema. Desse modo, é de fundamental importância garantir a qualidade da água armazenada, conservando seus atributos fundamentais para assegurar a potabilidade da água, uma vez que essa água será destinada à população. Isso só é possível conferindo às configurações do reservatório as melhores condições possíveis para garantir fluxo adequado e renovação constante da mistura ali presente e evitando problemáticas evidentes como sedimentação constante e suspensão de sólidos, águas com tempo de residência prolongado, zonas de estagnação e estratificação (PIZARRO, 2011).

##### 3.1.1 Modificações de projeto

As modificações de projeto podem ter diferentes impactos no escoamento dentro do reservatório: a reconfiguração das entradas e saídas de água pode influenciar a distribuição de velocidades e a formação de zonas de mistura; a instalação de dispositivos de controle pode afetar a taxa de escoamento e a capacidade de armazenamento do reservatório; alterações na geometria podem resultar em mudanças na hidrodinâmica global, incluindo a redução de áreas de estagnação e a melhoria da qualidade da água armazenada. (COLTRE; JANZEN, 2019).

##### 3.1.2 Qualidade de mistura de água

A circulação da água dentro do reservatório é um fator crucial que influencia a formação das indesejáveis zonas de estagnação, podendo afetar negativamente a qualidade da água armazenada. A geometria e a localização das entradas e saídas de água desempenham um papel significativo na busca por uma mistura eficaz. Quando a entrada de água é estrategicamente posicionada na parte mais alta do reservatório, a corrente resultante provoca uma movimentação vigorosa na água armazenada, favorecendo a mistura com o cloro, produto utilizado em seu tratamento. Esse processo de recirculação, impulsionado pelo jato de água, desempenha um papel crucial na preservação da qualidade da água, uma vez que rompe a inércia da água armazenada, impedindo a formação de áreas estagnadas e garantindo uma distribuição mais

homogênea do cloro ao longo do reservatório. Dessa forma, o correto posicionamento da entrada de água torna-se um fator primordial para manter a circulação e a qualidade da água durante o armazenamento (PIZARRO, 2011).

### 3.1.3 Zonas de estagnação

As zonas de estagnação correspondem a regiões onde a renovação contínua da água é prejudicada durante as variações de volume no reservatório. Essa situação pode resultar no surgimento de coloração na água devido à formação de subprodutos indesejados e, se não forem tomadas medidas corretivas, até mesmo à corrosão dentro do reservatório (PIZARRO, 2011).

Um planejamento cuidadoso do reservatório é fundamental, especialmente no que diz respeito à localização estratégica das entradas e saídas, bem como ao diâmetro adequado dessas aberturas para promover uma circulação eficiente em relação à quantidade de água armazenada. Reservatórios com entradas e saídas em faces opostas tendem a reter a água por mais tempo, seguindo o princípio conhecido como "primeiro a chegar, primeiro a sair" (HELLER; PÁDUA, 2010).

Estudos mostram que é preferível posicionar os jatos de água o mais alto possível dentro do reservatório, a fim de movimentar uma maior quantidade de água. Isso se torna crucial, uma vez que nas zonas de estagnação, a mistura da água com os produtos de tratamento fica comprometida devido à falta de circulação. Para superar ou minimizar esse problema, alternativas como aumentar a altura, vazão e tempo de duração do jato de água têm sido consideradas. Essas medidas visam garantir a efetiva mistura e distribuição homogênea dos produtos de tratamento em toda a extensão do reservatório (OLSON e DEBOER, 2011; COLTRE; JANZEN, 2019).

### 3.1.4 Zonas de estratificação

A estratificação térmica em reservatórios pode ser influenciada por vários fatores, como radiação solar, ventos, fluxo de entrada e saída de água, geometria e profundidade do reservatório, assim como as condições meteorológicas e climáticas da região. Durante períodos de alta incidência solar e pouca ação dos ventos, a estratificação térmica tende a se intensificar, agravando a diferenciação de temperatura entre as camadas (FERREIRA; CUNHA, 2013; SILVA; GOBBI, 2014).

A estratificação térmica pode ter consequências significativas na qualidade da água armazenada. O isolamento das camadas superficiais pode dificultar a troca de gases com a atmosfera, levando à redução dos níveis de oxigênio dissolvido na água mais profunda. Isso pode

criar condições anaeróbias, favorecendo a decomposição de matéria orgânica e a liberação de compostos indesejados, como gases de efeito estufa e substâncias tóxicas (FERREIRA; CUNHA, 2013; SILVA; GOBBI, 2014)

Para mitigar os impactos da estratificação térmica, podem ser adotadas diversas estratégias, como a introdução de dispositivos de aeração ou mistura mecânica no reservatório. A utilização de modelos numéricos de circulação e de simulações computacionais também pode auxiliar na identificação de zonas de estratificação e na avaliação da eficácia das medidas de controle propostas, propondo modificações de projeto e de operação (SILVA; GOBBI, 2014).

Desse modo, é de fundamental importância investigar a presença e o impacto de zonas de estratificação térmica nos reservatórios de água para a compreensão de como a sua presença pode afetar a qualidade da água e, consequentemente, na potabilidade do recurso. A partir daí, avaliar as estratégias de controle e assegurar a qualidade da água fornecida à população, bem como otimizar a gestão dos reservatórios.

### 3.2 TEMPO DE RESIDÊNCIA

O tempo de residência é uma métrica importante, sendo esse o período médio que um elemento de fluido permanece em um determinado sistema, volume ou região. Em reservatórios de água, o tempo de residência refere-se ao tempo que a água leva para circular ou permanecer antes de ser liberada para consumo ou distribuição. Essa métrica determina a eficiência do sistema de distribuição de água: tempos de residência muito curtos podem resultar em um tratamento insuficiente, enquanto tempos de residência muito longos podem levar à degradação da qualidade da água devido a processos de estagnação e estratificação (HELWEG, 1999).

Matematicamente, o tempo médio de residência ( $t_r$ ) é definido como a razão entre o volume do sistema ( $V$ ) e a vazão volumétrica ( $Q$ ) de entrada ou saída do fluido:

$$t_r = \frac{V}{Q} \quad (1)$$

onde:

- $V$  é o volume total do sistema;
- $Q$  é a vazão volumétrica do fluido.

Essa expressão representa um valor médio, mas, em muitos sistemas, há uma distribuição de tempos de residência (*RTD - Residence Time Distribution*), que descreve como diferentes porções do fluido experimentam tempos de permanência distintos dentro do domínio.

### 3.2.1 Distribuição de Tempos de Residência (RTD)

A análise da RTD é essencial para compreender a eficiência de processos químicos e físicos. A função  $E(t)$ , que representa a fração do fluido que deixa o sistema com um determinado tempo de residência  $t$ , é frequentemente utilizada para caracterizar padrões de escoamento:

$$E(t) = \frac{dF}{dt} \quad (2)$$

onde  $F(t)$  é a fração cumulativa do fluido que saiu até o instante  $t$ .

A RTD pode indicar se o escoamento dentro do sistema se aproxima de um comportamento ideal, como um reator perfeitamente misturado (*CSTR - Continuous Stirred Tank Reactor*) ou um escoamento em pistão (*Plug Flow Reactor*). Na prática, a presença de recirculações, curtos-circuitos ou zonas mortas pode alterar significativamente a distribuição real dos tempos de residência (HELWEG, 1999).

A técnica de simulação numérica, a partir da construção de um domínio computacional realizado pelo método de CFD, é uma medida efetiva para realizar o estudo do tempo de residência, sendo possível, através dessa modelagem computacional, estimar de forma precisa essa métrica, bem como considerar diferentes cenários operacionais e de geometria do reservatório que levariam à mitigação da problemática.

## 3.3 CLORO RESIDUAL LIVRE

Os sistemas de distribuição de água da atualidade lidam com uma problemática muito evidente encontrada nos reservatórios de água, o cloro residual livre (CRL) da água – sendo esse um parâmetro de potabilidade importante de acordo com a Portaria GM/MS N° 888/202. Esse decaimento acontece por conta das reações com substâncias inorgânicas e orgânicas que se dão em paralelo nos reservatórios, além do consumo pelos processos de corrosão, principalmente nas tubulações de ferro (SALGADO, 2008). Fatores como tempo de residência prolongado, tipo de mistura líquida, entre outros que estão intimamente ligados às condições do reservatório e da água - geometria, perfil de escoamento e propriedades físicas da água – levam à geração de zonas de estratificação e estagnação que também contribuem para o decaimento de CRL (SILVA et al., 2019; XAVIER; JANZEN, 2017).

## 3.4 MECÂNICA DOS FLUIDOS

### 3.4.1 Classificação dos escoamentos

Na mecânica dos fluidos, a classificação dos escoamentos é essencial para compreender e modelar os fenômenos físicos associados (ÇENGEL; CIMBALA, 2017). Os escoamentos podem ser classificados com base em diferentes critérios, como segue:

#### 3.4.1.1 Escoamentos Laminares e Turbulentos

Os escoamentos podem ser classificados em laminares ou turbulentos, dependendo do comportamento do fluido. No regime laminar, as partículas de fluido seguem trajetórias bem definidas, paralelas e ordenadas. Já no regime turbulento, as partículas apresentam movimento caótico e tridimensional. Essa distinção é comumente avaliada pelo número de Reynolds ( $Re$ ):

$$Re = \frac{\rho U L}{\mu} \quad (3)$$

onde  $\rho$  é a densidade do fluido,  $U$  é a velocidade característica,  $L$  é o comprimento característico e  $\mu$  é a viscosidade dinâmica. Para  $Re < 2300$ , o escoamento é geralmente laminar, enquanto para  $Re > 4000$ , é turbulento (ÇENGEL; CIMBALA, 2017).

#### 3.4.1.2 Escoamentos Incompressíveis e Compressíveis

A compressibilidade do fluido é outro critério importante. Um escoamento é considerado incompressível quando as variações de densidade são desprezíveis, como em líquidos ou em gases a baixas velocidades ( $Ma < 0.3$ , onde  $Ma$  é o número de Mach). Escoamentos compressíveis, por outro lado, ocorrem em altas velocidades ou em fluidos altamente compressíveis, como no caso de escoamentos supersônicos.

#### 3.4.1.3 Escoamentos Estacionários e Transientes

Os escoamentos podem ser classificados em estacionários (ou permanentes) e transientes (ou não permanentes) com base na variação das propriedades do fluido ao longo do tempo. Em escoamentos estacionários, as propriedades como velocidade, pressão e densidade são independentes do tempo. Já em escoamentos transientes, essas propriedades variam temporalmente.

#### 3.4.1.4 Escoamentos Internos e Externos

Outra classificação importante distingue os escoamentos internos e externos. Escoamentos internos ocorrem em canais ou dutos confinados, como em tubulações. Escoamentos externos,

por sua vez, ocorrem ao redor de corpos sólidos imersos em um fluido, como o escoamento em torno de um carro ou uma asa.

#### 3.4.1.5 Escoamentos Monofásicos e Multifásicos

Finalmente, os escoamentos podem ser classificados em monofásicos ou multifásicos, dependendo do número de fases presentes. Escoamentos monofásicos envolvem apenas uma fase, como um líquido ou gás puro, enquanto os escoamentos multifásicos envolvem mais de uma fase, como misturas gás-líquido, gás-sólido ou líquido-sólido.

Essas classificações são fundamentais para a análise e modelagem dos escoamentos, orientando a escolha de modelos matemáticos e ferramentas numéricas adequadas para descrever o comportamento do fluido em diferentes contextos.

#### 3.4.2 Condição de não-deslizamento

A condição de não-deslizamento (*no-slip condition*) é um princípio fundamental na mecânica dos fluidos e desempenha um papel crucial em estudos de dinâmica dos fluidos computacional (CFD). Essa condição estabelece que, na interface entre uma superfície sólida e um fluido em contato com ela, a velocidade do fluido deve coincidir com a velocidade da superfície sólida. Em superfícies estacionárias, isso implica que a velocidade do fluido na parede é zero, enquanto em superfícies em movimento, a velocidade do fluido iguala a da superfície.

Matematicamente, a condição de não-deslizamento é expressa como:

$$\mathbf{u} = \mathbf{u}_{\text{parede}} \quad \text{em} \quad \mathbf{x}_{\text{parede}},$$

onde  $\mathbf{u}$  é o vetor velocidade do fluido na parede e  $\mathbf{u}_{\text{parede}}$  é a velocidade da superfície sólida (CENGEL; CIMBALA, 2017).

#### 3.4.2.1 Impacto em Estudos de CFD

A imposição da condição de não-deslizamento é essencial para capturar adequadamente o comportamento do fluido próximo a superfícies sólidas, especialmente na camada limite. Em simulações de CFD, essa condição tem os seguintes impactos:

- A condição de não-deslizamento resulta em um gradiente de velocidade próximo à superfície, dando origem à camada limite viscosa. Esse fenômeno é crítico para prever perdas por atrito, separação de escoamento e outros efeitos relacionados à interação fluido-estrutura.

- Em escoamentos turbulentos, a condição de não-deslizamento influencia significativamente as flutuações próximas à parede, exigindo modelos de turbulência ou malhas suficientemente refinadas para resolver essas regiões com precisão.
- Para capturar adequadamente os gradientes de velocidade próximos à parede, é necessário o refinamento da malha no sentido normal à superfície, frequentemente guiado pelo parâmetro  $y^+$ , que avalia a resolução da camada limite. Valores adequados de  $y^+$  são essenciais para garantir resultados precisos.
- A condição de não-deslizamento é particularmente relevante em fluidos de alta viscosidade, onde o atrito próximo à superfície desempenha um papel predominante no comportamento do escoamento.

Embora amplamente válida, a condição de não-deslizamento pode ser ajustada em simulações específicas, como no caso de superfícies hidrofóbicas ou texturizadas, onde ocorre deslizamento parcial. No entanto, para a maioria das aplicações práticas, como projetos aerodinâmicos, engenharia de dutos e turbomáquinas, a condição de não-deslizamento é uma suposição indispensável (ÇENGEL; CIMBALA, 2017).

#### 3.4.3 Viscosidade

A viscosidade é uma propriedade fundamental dos fluidos que caracteriza sua resistência ao escoamento. Em termos físicos, está associada à dissipaçāo de energia mecânica devido ao atrito interno entre camadas adjacentes de fluido em movimento. Essa propriedade desempenha um papel essencial na formulação das equações governantes da mecânica dos fluidos e na análise de escoamentos em CFD (FOX et al., 2015).

#### 3.4.4 Vórtices e a Aleatoriedade dos Escoamentos Turbulentos

Os vórtices são estruturas rotacionais formadas em escoamentos fluidos devido a variações espaciais da velocidade. Em escoamentos turbulentos, essas estruturas desempenham um papel fundamental na dinâmica da mistura e no transporte de quantidade de movimento, energia e escalares como calor e massa. A formação e evolução dos vórtices estão diretamente ligadas à complexidade e imprevisibilidade dos escoamentos turbulentos.

#### 3.4.4.1 Geração e Dissipação de Vórtices

A formação de vórtices ocorre devido à interação entre gradientes de velocidade e forças viscosas, resultando em regiões de intensa rotação do fluido. Esse fenômeno pode ser descrito matematicamente pelo vetor vorticidade  $\omega$ , definido como o rotacional do campo de velocidade:

$$\omega = \nabla \times \mathbf{u} \quad (4)$$

onde  $\mathbf{u}$  é o vetor velocidade. A equação da vorticidade mostra que os vórtices são transportados, esticados e dissipados ao longo do escoamento (FOX et al., 2015).

Nos escoamentos turbulentos, os vórtices se organizam em uma cascata de energia, conforme descrito por Kolmogorov:

- Em grandes escalas, a energia cinética é inserida no fluido através de instabilidades e interações com obstáculos ou gradientes de pressão.
- Essa energia é transferida para estruturas menores por meio da interação entre vórtices, em um processo conhecido como *cascata turbulenta*.
- Em escalas suficientemente pequenas, a energia é dissipada pela viscosidade em forma de calor.

A escala mais fina da turbulência é determinada pelo comprimento de Kolmogorov ( $\eta$ ), abaixo do qual a dissipação viscosa domina completamente:

$$\eta = \left( \frac{\nu^3}{\epsilon} \right)^{1/4} \quad (5)$$

onde  $\nu$  é a viscosidade cinemática e  $\epsilon$  é a taxa de dissipação de energia turbulenta (ANSYS Inc., 2024).

#### 3.4.4.2 Aleatoriedade e Estruturas Coerentes

Embora os escoamentos turbulentos sejam caracterizados por sua natureza caótica e aparentemente aleatória, muitas vezes apresentam estruturas coerentes, como vórtices alongados, rolos turbulentos e zonas de recirculação. Essas estruturas podem ser observadas em diversos fenômenos naturais, como redemoinhos atmosféricos, escoamento ao redor de corpos imersos e instabilidades em jatos e camadas de cisalhamento.

A complexidade da interação entre os vórtices e a dependência sensível das condições iniciais são fatores que tornam a previsão exata da turbulência um desafio. No entanto, a

compreensão dessas estruturas permite a formulação de modelos estatísticos que descrevem o comportamento médio dos escoamentos turbulentos.

### 3.5 FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL

A fluidodinâmica computacional (CFD – *computational fluid dynamics*) se insere na engenharia como uma área de estudos dedicada a abordagem de soluções de equações do escoamento de fluidos a partir da aplicação de resolvidores numéricos, sendo uma aliada às análises experimentais para a resolução de problemas de mecânica dos fluidos, os quais não podem ser solucionados analiticamente. Desse modo, são utilizados métodos de discretização os quais aproximam as equações diferenciais por um sistema de equações algébricas, bem como obtém detalhes sobre o campo de escoamento como as tensões de cisalhamento, perfis de velocidade e pressão, linhas de corrente etc. (CENGEL; CIMBALA, 2017).

Essa técnica lida com o entendimento dos escoamentos laminares com facilidade; no entanto, necessita fazer uso dos modelos de turbulência para solucionar escoamentos turbulentos, adequando o modelo correto à problemática para que se obtenha uma solução aplicável e prática em um contexto de engenharia.

A fluidodinâmica computacional faz uso da equação da continuidade e das equações Navier-Stokes, de acordo com as Equações 5 e 6, aplicadas sob condições específicas de escoamento incompressível e newtoniano para que se obtenha soluções numéricas aplicadas aos diversos volumes de controle gerados no domínio computacional criado. Esses domínios são divididos em elementos muito pequenos denominados células nos quais as versões discretizadas das equações supracitadas são resolvidas, criando, então, uma malha sobre o domínio, sendo essa extremamente importante para determinar a qualidade de solução de um problema sob a ótica da fluidodinâmica computacional.

A equação da continuidade para um fluido incompressível é dada por:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U) = 0 \quad (6)$$

onde:

- $\rho$  é a densidade do fluido.
- $U$  é o vetor velocidade do fluido.
- $\nabla \cdot$  representa o operador divergente, indicando a variação espacial do fluxo de massa.

- $t$  representa o tempo.

A equação de Navier-Stokes para um fluido Newtoniano é expressa como:

$$\frac{\partial(\rho U)}{\partial t} + (U \cdot \nabla)(\rho U) = -\nabla p + \mu \nabla^2 U + \rho g \quad (7)$$

onde:

- $p$  é a pressão do fluido.
- $\mu$  é a viscosidade dinâmica do fluido.
- $\nabla^2$  é o operador laplaciano, que representa a difusão viscosa da velocidade.
- $g$  é o vetor da aceleração gravitacional.

Nesse sentido, são necessárias, então, a aplicação de condições de contorno e condições iniciais, além de parâmetros numéricos e algoritmos de solução específicos de cada código de CFD para que se dê início a um processo de iteração, realizando a solução numérica das equações discretizadas do escoamento envolvido, gerando, então, resíduos. Esses últimos são responsáveis pela determinação de convergência de uma solução (ÇENGEL; CIMBALA, 2017).

Os métodos mais importantes para a discretização das equações diferenciais na tentativa de realizar aproximações e de resolver um problema físico são: método das diferenças finitas, método de volumes finitos, método dos elementos finitos e os métodos espetrais (SILVA; GOBBI, 2014)(ANDERSON, 1995).

### 3.6 O MÉTODO DOS VOLUMES FINITOS

O Método dos Volumes Finitos (MVF) é amplamente utilizado para a solução numérica de equações diferenciais parciais (EDPs) em diversas áreas da engenharia e ciências, especialmente em problemas de transferência de calor e dinâmica de fluidos. Esse método baseia-se na discretização do domínio de solução em pequenos volumes de controle, garantindo que os princípios de conservação sejam satisfeitos de maneira integral em cada volume. Tal abordagem confere ao MVF a característica de conservação exata, essencial para garantir resultados fisicamente coerentes.

A formulação matemática do MVF parte das EDPs que descrevem fenômenos físicos, como a equação de conservação de uma grandeza escalar  $\phi$ , expressa genericamente como:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V \phi \, dV + \int_S \mathbf{F} \cdot \mathbf{n} \, dS = \int_V Q \, dV, \quad (8)$$

onde  $V$  representa o volume de controle,  $S$  sua superfície,  $\mathbf{F}$  é o fluxo da grandeza conservada,  $\mathbf{n}$  é o vetor normal à superfície e  $Q$  é uma fonte volumétrica. A integração da equação diferencial sobre cada volume de controle garante que as quantidades sejam conservadas localmente (FERZIGER; PERIĆ, 2002).

Para discretizar o domínio, o espaço é dividido em volumes finitos de forma que o centro de cada volume é associado a um nó ou ponto de cálculo. A integral do fluxo  $\mathbf{F} \cdot \mathbf{n}$  é substituída por somatórios nos contornos dos volumes, enquanto as fontes volumétricas são aproximadas por funções interpoladas. Assim, para uma malha com volumes adjacentes, a equação de conservação discreta assume a forma:

$$\frac{\partial \phi_P}{\partial t} V_P + \sum_f F_f = Q_P V_P, \quad (9)$$

onde  $\phi_P$  é o valor da grandeza conservada no centro do volume  $P$ ,  $V_P$  é o volume de controle,  $F_f$  é o fluxo pela face  $f$  e  $Q_P$  é o termo fonte correspondente ao volume  $P$ .

Os fluxos  $F_f$  são calculados com base em esquemas de interpolação para estimar os valores nas faces, como os esquemas de diferenças centradas, upwind ou híbrido. Por exemplo, no caso do fluxo difusivo, a aproximação discreta utiliza a lei de Fourier para condução de calor ou a lei de Fick para difusão de massa, que no domínio discreto pode ser escrita como:

$$F_f = -\Gamma \frac{\phi_E - \phi_P}{\Delta x}, \quad (10)$$

onde  $\Gamma$  é a difusividade do material,  $\phi_E$  e  $\phi_P$  são os valores nos nós adjacentes e  $\Delta x$  é a distância entre os centros dos volumes.

O resultado desse processo de discretização é um sistema de equações algébricas que relaciona os valores da grandeza conservada  $\phi$  em cada volume de controle. Esse sistema é então resolvido numericamente, utilizando métodos iterativos, como Gauss-Seidel ou o método dos gradientes conjugados, ou métodos diretos, dependendo da aplicação.

Embora o método dos elementos finitos também seja aplicado em CFD, o método dos volumes finitos apresenta algumas vantagens específicas. Uma delas é a sua formulação natural para lidar com conservação de massa e quantidade de movimento, o que é fundamental em problemas de escoamento de fluidos. Além disso, o método dos volumes finitos é particularmente

eficiente para escoamentos com geometrias complexas e malhas não estruturadas, onde a geração de malhas pode ser menos custosa computacionalmente (ANDERSON, 1995).

### 3.6.1 Etapas de um estudo de simulação computacional e utilização de ferramentas CAE

O uso de ferramentas de engenharia assistida por computador (CAE - *Computer-Aided Engineering*) tornou-se indispensável em diversos campos da engenharia devido à sua capacidade de simular fenômenos físicos complexos, reduzindo a necessidade de experimentos físicos e otimizando o processo de desenvolvimento de projetos. Um estudo utilizando ferramentas CAE e simulação computacional geralmente segue um conjunto de etapas bem definidas, que visam garantir a confiabilidade e a precisão dos resultados obtidos.

#### 3.6.1.1 Definição do Problema

A primeira etapa consiste na definição clara do problema a ser investigado, o que inclui identificar os fenômenos físicos envolvidos, as variáveis de interesse e os objetivos da simulação. Nessa fase, são especificados os parâmetros de entrada, como propriedades dos materiais, condições de contorno e de inicialização, além das variáveis a serem monitoradas. Uma compreensão profunda do problema físico é essencial para selecionar o modelo matemático e as ferramentas CAE adequadas.

#### 3.6.1.2 Modelagem Geométrica

Com o problema definido e com a interpretação física do processo, procede-se à criação do modelo geométrico. Essa etapa utiliza softwares de CAD (*Computer-Aided Design*), como SolidWorks, AutoCAD ou Fusion 360, para representar geometricamente o domínio físico. A geometria pode variar desde formas simples até modelos complexos, dependendo do problema em estudo. É importante garantir que o modelo geométrico seja compatível com o software CAE que será utilizado para a simulação.

#### 3.6.1.3 Geração da Malha

Na sequência, o domínio geométrico é discretizado em uma malha composta por elementos finitos ou volumes finitos, dependendo do método numérico a ser aplicado. A qualidade da malha é crucial, pois afeta diretamente a precisão e a eficiência computacional da simulação. Elementos menores em regiões de alta variação de gradientes (como contornos ou pontos de

singularidade) são frequentemente utilizados para melhorar a resolução local. Ferramentas como ANSYS Meshing, Gambit ou ICEM-CFD são comumente empregadas para essa tarefa.

### 3.6.1.3.1 Classificação das Malhas

As malhas computacionais podem ser classificadas com base na sua estrutura e no formato dos elementos utilizados (FERZIGER; PERIĆ, 2002):

- **Malha Estruturada:** Caracteriza-se por uma disposição ordenada e regular dos elementos, geralmente compostos por quadriláteros (2D) ou hexaedros (3D). Possui vantagens como menor consumo de memória e maior eficiência na solução numérica, mas pode apresentar dificuldades na adaptação a geometrias complexas.
- **Malha Não Estruturada:** Formada por elementos distribuídos de maneira irregular, utilizando tipicamente triângulos (2D) ou tetraedros (3D). Essa flexibilidade permite a adaptação a geometrias complexas, embora o custo computacional seja maior devido à necessidade de armazenar informações adicionais sobre a conectividade dos elementos.
- **Malha Híbrida:** Combina diferentes tipos de elementos no mesmo domínio. Um exemplo comum é o uso de hexaedros em regiões de escoamento predominantemente unidimensional e tetraedros em áreas com geometria mais complexa. Essa abordagem busca equilibrar precisão e custo computacional.

### 3.6.1.3.2 Qualidade de malha

A qualidade da malha influencia diretamente a convergência e precisão da solução numérica e a avaliação desse fator pode ser realizada por meio de diversas métricas (KNUPP, 2001):

- *Aspect Ratio:* Relação entre os comprimentos dos lados do elemento. Valores muito altos podem introduzir erros numéricos.
- *Skewness:* Mede o desvio de um elemento em relação à sua forma ideal (quadrado ou triângulo equilátero). Malhas com alta *skewness* podem comprometer a estabilidade da simulação.
- *Orthogonality:* Mede o alinhamento das normais dos elementos em relação às direções preferenciais do escoamento. Baixos valores indicam possíveis erros na discretização.

- *Refinamento Local:* Áreas de interesse, como camadas limite e regiões de alta curvatura, devem ter maior refinamento para capturar adequadamente os fenômenos fluidodinâmicos.

### 3.6.1.3.3 Índice Convergência de Malha

O índice de convergência de malha é uma métrica utilizada para avaliar a convergência numérica em simulações computacionais, como na fluidodinâmica computacional, sendo uma medida da precisão dos resultados em relação à resolução da malha e é uma ferramenta importante para determinar a confiabilidade dos resultados obtidos (ROACHE, 1994).

### 3.6.1.4 Definição dos Modelos Físicos e Condições de Contorno

Após a geração da malha, os modelos físicos relevantes são definidos. Isso inclui especificar as equações governantes, como as de Navier-Stokes para problemas de dinâmica dos fluidos ou a equação de calor para transferência térmica, além de selecionar modelos adicionais, como turbulência ou transferência de radiação, se aplicável. As condições de contorno e iniciais também são impostas, como velocidades, temperaturas, fluxos ou forças externas, que refletem as interações do sistema com seu ambiente.

### 3.6.1.5 Configuração da Simulação

Com a malha e os modelos definidos, a simulação é configurada no software CAE. Isso envolve a escolha de métodos numéricos (como volumes finitos, elementos finitos ou diferenças finitas), definição de esquemas de discretização espacial e temporal, e a seleção de algoritmos de solução, como métodos iterativos ou diretos. Parâmetros computacionais, como critérios de convergência e tolerâncias, também são ajustados nessa etapa.

### 3.6.1.6 Execução da Simulação

A simulação é então executada, durante a qual o solver do software processa o sistema de equações discretizadas e calcula as variáveis de interesse em cada passo de tempo ou iteração. Ferramentas como ANSYS Fluent, COMSOL Multiphysics ou OpenFOAM são amplamente utilizadas para essa etapa. Dependendo da complexidade do problema e da capacidade computacional disponível, a execução pode demandar desde minutos até várias horas ou dias.

### 3.6.1.7 Análise dos Resultados

Após a conclusão da simulação, os resultados são analisados para avaliar o comportamento do sistema simulado. Técnicas de pós-processamento, utilizando softwares como Paraview, Tecplot ou o próprio módulo de análise do software CAE, permitem visualizar variáveis como campos de pressão, temperatura, velocidades ou tensões. É essencial verificar se os resultados satisfazem os critérios de convergência e se são fisicamente consistentes.

### 3.6.1.8 Validação e Conclusões

Finalmente, os resultados da simulação são comparados com dados experimentais ou soluções analíticas, quando disponíveis, para validar a precisão do modelo. Essa etapa assegura que os resultados obtidos são confiáveis e podem ser utilizados para tomadas de decisão ou otimização do projeto. Conclusões são então elaboradas com base nos resultados, destacando-se as contribuições do estudo para o entendimento do problema ou a solução proposta.

O uso de ferramentas CAE e simulação computacional representa um avanço significativo para a engenharia, permitindo explorar cenários complexos com maior eficiência, segurança e menor custo. A aplicação meticulosa dessas etapas garante a obtenção de resultados precisos e robustos, promovendo a inovação em projetos e análises de engenharia.

## 3.6.2 Modelagem da turbulência

Os modelos de turbulência são usados para lidar com a natureza complexa e caótica do escoamento turbulento. Os modelos de turbulência são amplamente aplicados em problemas de engenharia, como a análise do arrasto aerodinâmico, a mistura de fluidos e a previsão de escoamentos em torno de objetos complexos. Existem várias abordagens para modelar a turbulência, incluindo os modelos de RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes) e LES (Large Eddy Simulation). A escolha entre os modelos de turbulência (RANS, DNS e LES) depende das necessidades específicas de cada problema. O modelo RANS é preferido para aplicações de engenharia devido à sua eficiência computacional, mas pode não ser adequado para simulações que exigem uma alta resolução das escalas turbulentas. O modelo DNS é mais preciso, mas seu custo computacional limita sua aplicação a problemas acadêmicos e de pequena escala. O LES é uma opção intermediária, oferecendo uma boa relação entre precisão e eficiência, sendo a escolha preferida para estudos de escoamentos turbulentos mais detalhados, onde as estruturas coerentes são relevantes (ANSYS, Inc., 2017).

### 3.6.2.1 RANS (*Reynolds Averaged Navier-Stokes*)

O modelo RANS é amplamente utilizado na simulação de escoamentos turbulentos em problemas de engenharia. Nesse modelo, as equações de Navier-Stokes são decompostas em termos médios e flutuantes (turbulentos). As grandezas médias são resolvidas numericamente, enquanto as flutuações turbulentas são tratadas através de modelos de turbulência. Os modelos RANS são mais eficientes computacionalmente em relação aos métodos DNS e LES, tornando-os adequados para simular uma ampla gama de aplicações práticas, como escoamentos em torno de carros, aeronaves e estruturas civis (ANSYS, Inc., 2017).

As equações do modelo RANS são dadas por:

$$\rho \left( \frac{\partial \bar{U}_i}{\partial t} + \bar{U}_j \frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_j} \right) = - \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \mu \frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_j} + \rho \bar{u}_i \bar{u}_j \right) \quad (11)$$

As novas equações são idênticas às originais, exceto por:

- As variáveis transportadas, como  $\bar{U}_i$ ,  $\bar{p}$ , etc., agora representam as quantidades médias do escoamento.
- Termos adicionais aparecem:

$$\tau_{ij} = -\rho \bar{u}_i \bar{u}_j \quad (12)$$

–  $\tau_{ij}$  são chamados de Tensores de Reynolds.

– São efetivamente um termo de tensão:

$$\frac{\partial}{\partial x_j} \left( \mu \frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_j} - \rho \bar{u}_i \bar{u}_j \right) \quad (13)$$

–  $\tau_{ij}$  representam a influência da turbulência no escoamento médio e são os termos a serem modelados.

–  $\tau_{ij}$  representa um tensor simétrico, o que adiciona 6 incógnitas adicionais ao sistema.

Entre os modelos de turbulência RANS amplamente utilizados estão os modelos  $k-\varepsilon$  e  $k-\omega$ , que pertencem à classe de modelos de duas equações, resolvendo variáveis adicionais para descrever as características da turbulência.

### 3.6.2.1.1 Modelos $k-\omega$ e $k-\epsilon$

O modelo  $k-\epsilon$  é baseado em duas equações de transporte: uma para a energia cinética turbulenta ( $k$ ) e outra para a taxa de dissipação da energia cinética turbulenta ( $\epsilon$ ). As equações de transporte são dadas por:

$$\frac{\partial k}{\partial t} + U_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \nu + \frac{\nu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + P_k - \epsilon, \quad (14)$$

$$\frac{\partial \epsilon}{\partial t} + U_j \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \nu + \frac{\nu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + C_{\epsilon 1} \frac{\epsilon}{k} P_k - C_{\epsilon 2} \frac{\epsilon^2}{k}, \quad (15)$$

onde:

$$\nu_t = C_\mu \frac{k^2}{\epsilon}, \quad P_k = \nu_t \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \frac{\partial U_j}{\partial x_i},$$

e  $C_\mu$ ,  $\sigma_k$ ,  $\sigma_\epsilon$ ,  $C_{\epsilon 1}$  e  $C_{\epsilon 2}$  são constantes do modelo.

Este modelo é amplamente utilizado devido à sua simplicidade e aplicabilidade em escoamentos totalmente desenvolvidos e homogêneos. Ele é particularmente eficiente para simulações de engenharia em que o comportamento da camada limite e regiões de escoamento com gradientes suaves de pressão são de interesse (WILCOX, 2008).

O modelo  $k-\omega$  também utiliza duas equações de transporte: uma para a energia cinética turbulenta ( $k$ ) e outra para a taxa específica de dissipação ( $\omega$ ), definida como  $\omega = \epsilon/k$ . Suas equações de transporte são descritas como:

$$\frac{\partial k}{\partial t} + U_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \nu + \frac{\nu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + P_k - \beta^* k \omega, \quad (16)$$

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} + U_j \frac{\partial \omega}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \nu + \frac{\nu_t}{\sigma_\omega} \right) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + \alpha \frac{\omega}{k} P_k - \beta \omega^2, \quad (17)$$

onde:

$$\nu_t = \frac{k}{\omega}, \quad P_k = \nu_t \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \frac{\partial U_j}{\partial x_i},$$

e  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\beta^*$ ,  $\sigma_k$  e  $\sigma_\omega$  são constantes do modelo.

O modelo  $k-\omega$  é mais preciso em simulações de escoamentos com gradientes acentuados de pressão, como aqueles encontrados próximo a superfícies sólidas ou em regiões de separação de camada limite. Sua formulação fornece melhor resolução na região da camada limite em comparação ao modelo  $k-\epsilon$ .

O modelo  $k-\epsilon$  é ideal para escoamentos isotrópicos e homogêneos, como em dutos ou turbinas, onde a precisão na camada limite próxima à parede não é uma prioridade crítica.

Em contrapartida, o modelo  $k-\omega$  é mais apropriado para escoamentos com forte influência de paredes e em situações em que uma descrição precisa da camada limite é necessária, como em aerodinâmica de asas ou turbomáquinas (POPE, 2000).

Uma abordagem híbrida, como o modelo  $k-\omega$  SST (Shear Stress Transport), combina as vantagens de ambos os modelos, utilizando  $k-\omega$  próximo às paredes e  $k-\varepsilon$  em regiões afastadas. Isso proporciona uma solução robusta para uma ampla gama de aplicações de engenharia (MENTER, 1994).

Ambos os modelos são amplamente utilizados devido à sua eficiência computacional e capacidade de capturar os principais aspectos dos escoamentos turbulentos em simulações de engenharia. A escolha do modelo depende das características do problema e da região de interesse no escoamento.

### 3.6.2.2 DNS (*Direct Numerical Simulation*)

O modelo DNS é uma abordagem completa para resolver as equações de Navier-Stokes sem simplificações. Nesse método, todas as escalas de turbulência são resolvidas diretamente, sem a necessidade de modelos de sub-grade. Isso permite uma representação precisa de todos os fenômenos turbulentos, tornando o modelo DNS altamente preciso. No entanto, a alta resolução necessária para simular todas as escalas de turbulência resulta em um custo computacional extremamente elevado. Como resultado, o modelo DNS é geralmente aplicado apenas em estudos acadêmicos ou em problemas de pesquisa de menor escala (MOIN; MAHESH, 1998).

### 3.6.2.3 LES (*Large Eddy Simulation*)

O modelo LES é uma técnica intermediária entre o modelo RANS e o modelo DNS. Nessa abordagem, as grandes escalas de turbulência são resolvidas diretamente, enquanto as escalas menores são modeladas (subgrade). Isso permite que o LES capture os efeitos mais importantes da turbulência, como as estruturas coerentes e os redemoinhos, enquanto ainda mantém uma vantagem computacional em relação ao modelo DNS. O LES é frequentemente aplicado em estudos de escoamentos complexos, como escoamentos em aerodinâmica, engenharia de turbinas e dispersão de poluentes na atmosfera (ANSYS, Inc., 2017).

## 3.7 PLANEJAMENTO COMPOSTO CENTRAL (PCC)

O Planejamento Composto Central (PCC) é uma técnica estatística amplamente utilizada para otimização e modelagem de processos, especialmente em experimentos que envolvem múltiplas variáveis.

tiplas variáveis independentes (MONTGOMERY, 2019). Essa metodologia permite a construção de modelos matemáticos que descrevem a relação entre as variáveis de entrada e a resposta do sistema, possibilitando a identificação de tendências e interações entre os fatores estudados.

O PCC é derivado do Planejamento Fatorial Completo, mas adiciona pontos axiais e centrais para capturar efeitos quadráticos, tornando-o uma abordagem robusta para a construção de superfícies de resposta (MYERS et al., 2016). Os experimentos conduzidos a partir desse planejamento são classificados em três categorias: (i) pontos fatoriais, que definem os extremos do espaço experimental; (ii) pontos axiais, utilizados para expandir o intervalo das variáveis e avaliar curvaturas na resposta; e (iii) pontos centrais, que possibilitam a estimativa do erro experimental e a detecção de efeitos não-lineares (BOX et al., 1978).

A principal vantagem do PCC é sua capacidade de gerar um modelo matemático preditivo, geralmente representado por uma equação de segundo grau, permitindo a otimização do sistema estudado (SOUZA; LIMA, 2018). Essa abordagem é especialmente útil em estudos de simulação numérica, como os conduzidos no *Anssys Fluent*, pois possibilita a análise de múltiplas combinações de variáveis operacionais, reduzindo o número total de experimentos necessários para obter resultados confiáveis.

Dessa forma, o PCC tem sido amplamente aplicado em diversas áreas da engenharia e da ciência, incluindo processos químicos, fenômenos de transporte e análise de escoamentos fluido-dinâmicos (BEZERRA et al., 2008). Sua implementação contribui para uma melhor compreensão dos fatores que influenciam a resposta do sistema, permitindo a tomada de decisões mais assertivas com base em modelos matemáticos validados.

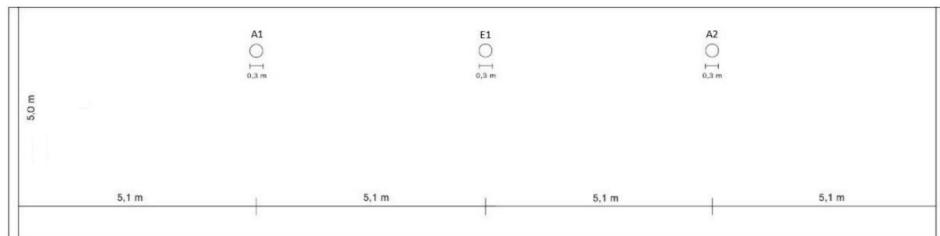
## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

### 4.1 OBJETO DE ESTUDO

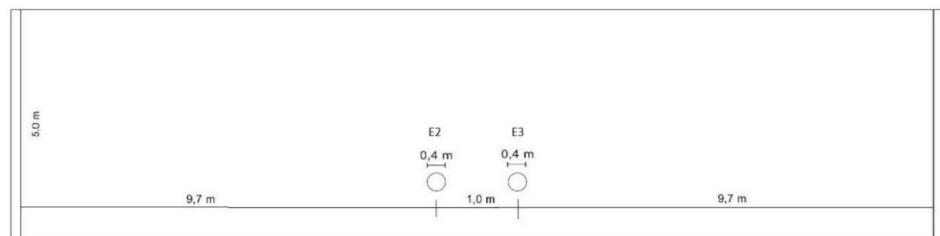
O estudo em pauta foi desenvolvido tomando por base um reservatório semi-enterrado de formato retangular, possuindo duas entradas e duas saídas. A configuração do reservatório pode ser observada nas Figuras 1) (a) e (b). Os dados de projeto, bem como os de operação junto às condições de contorno estabelecidas para o problema, estão situados na base de dados do estudo de caso de um reservatório de água integrante de uma central de distribuição de água para a realização do estudo, tal como mostrado nas Tabelas 1 e 2.

Figura 1 – Configuração do reservatório de água.

(a) Vista frontal do reservatório



(b) Vista traseira do reservatório



Fonte: Autor, 2025.

### 4.2 SIMULAÇÃO NUMÉRICA

O software utilizado será o resovedor numérico Ansys Fluent para o problema de CFD em questão da linha de softwares Ansys, líder mundial no tópico de simulação computacional há 50 anos.

O fluxo de trabalho desenvolvido no presente trabalho pode ser visualizado na Figura 2 para uma simulação de CFD.

Tabela 1 – Condições de projeto atual

Dimensões do reservatório (m)	Valor
Largura (X)	20,4
Comprimento (Y)	14,6
Altura (Z)	5,0
Entrada 1 (E1)	0,3
Entrada 2 (E2)	0,3
Saída 1 (S1)	0,4
Saída 2 (S2)	0,4
Extravasor	0,3

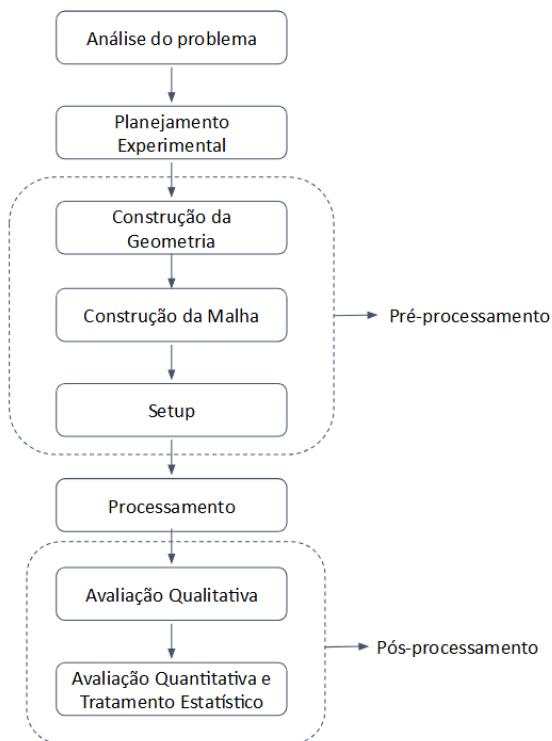
Fonte: Autor, 2025.

Tabela 2 – Condições de operação atual

Parâmetro	Valor
Velocidade de entrada 1 (m/s)	0,33
Velocidade de entrada 2 (m/s)	0,33
Gravidade (m/s <sup>2</sup> )	9,81
Massa específica da água (25°C) (kg/m <sup>3</sup> )	998,2
Massa específica do ar (25°C) (kg/m <sup>3</sup> )	1,225
Pressão de saída (manométrica) (kPa)	0

Fonte: Autor, 2025.

Figura 2 – Fluxo de trabalho de uma simulação em CFD



Fonte: Autor, 2025.

Em um primeiro momento, serão analisadas as configurações predefinidas do reservatório de água, para entender seu comportamento atual e a existência de zonas de estratificação e estagnação, para entender como as condições atuais de projeto e operação influenciam na geração ou mitigação dessas problemáticas.

Em um segundo momento, serão construídas diferentes configurações geométricas do reservatório, propondo alterações nos diâmetros de entradas e saídas, e modificações das condições de operação através da velocidade de entrada de água, avaliando os impactos gerados à potabilidade da água e se é possível assegurar a constância dos níveis de CRL.

#### 4.3 INTERPRETAÇÃO FÍSICA DO PROBLEMA

A interpretação física foi uma etapa fundamental na metodologia de simulações CFD, pois antecedeu o pré-processamento e garante que o modelo numérico represente adequadamente o fenômeno estudado.

Nessa fase, foi essencial compreender as condições de operação e de projeto, analisando a geometria e os domínios de interesse para definir a região de simulação e avaliar possíveis simplificações que reduzam o custo computacional sem comprometer a precisão dos resultados.

Além disso, foram identificadas as condições de contorno, como entradas, saídas e interações do fluido com superfícies sólidas, bem como as propriedades do fluido, incluindo viscosidade, densidade e compressibilidade, que afetam diretamente o comportamento do escoamento. A saída do extravasor foi removida para fins de praticidade de cálculo, dado que poderia gerar uma problemática para casos em regime permanente, sendo melhor captado através de um estudo transitente.

O regime de escoamento ser caracterizado foi imprescindível, para que se considere o número de Reynolds a fim de classificar o escoamento como laminar, turbulento ou transitório, o que impacta a escolha de modelos numéricos adequados.

Outro aspecto relevante é a definição de hipóteses e simplificações, como a possibilidade de assumir escoamento incompressível, simetria geométrica ou condições estacionárias, visando otimizar a simulação sem perda significativa de fidelidade.

Além disso, avaliou-se a necessidade de incluir efeitos físicos adicionais, como transferência de calor, cavitação, forças externas ou análise multifásica considerando elementos discretos, garantindo que todos os fenômenos relevantes sejam considerados. A maioria desses fatores foi desconsiderada, principalmente os termos de energia (tendo em conta a possibilidade de avaliação das zonas de estratificação a partir da estratificação térmica), para que houvesse

uma simplificação do cálculo.

#### 4.4 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

A construção de um planejamento experimental permitiu a investigação sistemática da influência de diferentes variáveis sobre o comportamento do escoamento no reservatório estudado. Para isso, foram implementadas modificações tanto no projeto geométrico quanto nas condições operacionais, de modo a compreender os efeitos das variáveis-chave na formação de zonas de estagnação e estratificação, conforme discutido na revisão bibliográfica.

No que se refere ao projeto geométrico, foram construídas diferentes configurações para as dimensões das entradas e saídas do reservatório, identificadas como C0, C1, C2, C3 e C4, conforme apresentado na Tabela 3. Cada uma dessas configurações representou uma variação nos diâmetros dos *inlets* e *outlets*, alterando, consequentemente, a área disponível para a passagem do fluido e influenciando diretamente o comportamento hidrodinâmico dentro do reservatório. Já no que diz respeito às condições operacionais, foram analisadas variações na velocidade de entrada do fluido e na razão entre a área de entrada e saída, cujos valores testados encontram-se detalhados na Tabela 4. Esses parâmetros influíram significativamente na distribuição de velocidades internas e na formação de regiões de recirculação. A velocidade de entrada controlou a intensidade da mistura e a formação de camadas de escoamento preferenciais, enquanto a razão entre entrada e saída determinou o balanço de fluxos e favoreceu ou minimizou a presença de estagnação e estratificação.

Tabela 3 – Configurações geométricas das entradas e saídas do reservatório.

Config.	Diâm. Entrada (m)	Área de Entrada (m <sup>2</sup> )	Diâm. Saída (m)	Área de Saída (m <sup>2</sup> )	Razão E/S
C0	0,2	0,0314	0,4	0,1257	0,5
C1	0,3	0,0707	0,4	0,1257	0,75
C2	0,3	0,0707	0,3	0,0707	1
C3	0,5	0,1963	0,4	0,1257	1,25
C4	0,3	0,0707	0,2	0,0314	1,5

Fonte: Autor, 2025.

Para organizar de forma eficiente a variação desses fatores e garantir uma análise sistemática, foi utilizado um planejamento composto central (PCC), como descrito na Tabela 5. Essa abordagem permitiu a exploração do espaço de variáveis de forma estruturada, combinando pontos fatoriais, axiais e centrais, possibilitando a construção de um modelo matemático que descrevesse a relação entre os fatores estudados e as respostas do sistema.

Tabela 4 – Configurações propostas para as condições de operação

<b>Config.</b>	<b>Velocidade Inlet (m/s)</b>	<b>Reynolds</b>	<b>Velocidade Outlet (m/s)</b>	<b>Mass Flow Outlet (kg/s)</b>
C0	0,10	20.000	0,03	3,14
C0	0,33	66.000	0,08	10,35
C0	1,00	200.000	0,25	31,36
C0	3,00	600.000	0,75	94,08
C0	5,00	1.000.000	1,25	156,80
C0	5,83	1.166.000	1,46	182,83
C1	0,10	30.000	0,56	7,06
C1	0,33	99.000	0,19	23,28
C1	1,00	300.000	0,56	70,56
C1	3,00	900.000	1,69	211,68
C1	5,00	1.500.000	2,81	352,79
C1	5,83	1.749.000	3,28	411,36
C2	0,10	30.000	0,10	7,06
C2	0,33	99.000	0,33	23,28
C2	1,00	300.000	1,00	70,56
C2	3,00	900.000	3,00	211,68
C2	5,00	1.500.000	5,00	352,79
C2	5,83	1.749.000	5,83	411,36
C3	0,10	50.000	0,16	19,60
C3	0,33	165.000	0,52	64,68
C3	1,00	500.000	1,56	195,99
C3	3,00	1.500.000	4,69	587,99
C3	5,00	2.500.000	7,81	987,99
C3	5,83	2.915.000	9,11	1.142,66
C4	0,10	30.000	0,23	7,06
C4	0,33	99.000	0,74	23,28
C4	1,00	300.000	2,25	70,56
C4	3,00	900.000	6,75	211,68
C4	5,00	1.500.000	11,25	352,79
C4	5,83	1.749.000	13,12	411,36

Fonte: Autor, 2025.

Dessa forma, a implementação do PCC possibilitou avaliar tanto os efeitos individuais de cada variável quanto possíveis interações entre elas, assegurando uma compreensão mais abrangente dos fenômenos presentes no escoamento do reservatório.

#### 4.5 PRÉ-PROCESSAMENTO

O pré-processamento foi a etapa inicial da simulação computacional que consistiu na construção do entorno computacional no qual foi realizado o estudo. Essa fase envolveu a defini-

Tabela 5 – Planejamento Composto Central para a simulação numérica do reservatório

#	Razão entre entradas e saídas	Velocidade (m/s)	Tipo de Ponto
1	0,50	1,01	Fatorial (-1, -1)
2	0,50	5,00	Fatorial (-1, +1)
3	1,50	1,01	Fatorial (+1, -1)
4	1,50	5,00	Fatorial (+1, +1)
5	0,25	3,00	Axial (- $\alpha$ , 0)
6	1,75	3,00	Axial (+ $\alpha$ , 0)
7	1,00	0,18	Axial (0, - $\alpha$ )
8	1,00	5,83	Axial (0, + $\alpha$ )
9	1,00	3,00	Central (0, 0)
10	1,00	3,00	Central (0, 0)
11	1,00	3,00	Central (0, 0)
12	1,00	3,00	Central (0, 0)
13	1,00	3,00	Central (0, 0)

Fonte: Autor, 2025.

ção da geometria do domínio computacional, a geração das malhas numéricas e a especificação das condições de contorno e de operação do problema.

#### 4.5.1 Geometria

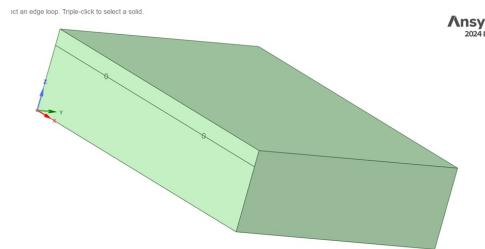
As geometrias do estudo de caso em questão foram construídas com base nas características do objeto de estudo e nas variações impostas pelas mudanças nas condições de projeto dadas no planejamento experimental. O modelo geométrico foi desenvolvido para captar os principais aspectos físicos do sistema, garantindo que suas simplificações não comprometam a precisão dos resultados.

As configurações geradas da geometria, tal como visto na Figura 3, constituem um reservatório retangular simplificado com entradas e saídas circulares de acordo com as razões propostas pelo planejamento experimental e com a remoção do extravasor, construídas no ambiente do software de CAD do portfólio Ansys chamado Ansys SpaceClaim.

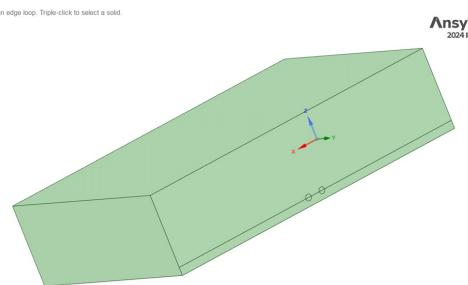
#### 4.5.2 Malha

A construção da malha computacional, vista na Figura 4, foi realizada com base no Índice de Convergência de Malha (GCI), garantindo que a resolução espacial adotada permitisse um equilíbrio adequado entre custo computacional e precisão dos resultados. Para isso, foram geradas e analisadas quatro malhas distintas: uma refinada, uma super refinada, uma intermediária e uma grosseira. Cada uma dessas malhas foi submetida a avaliações criteriosas de qualidade, levando

Figura 3 – Geometria criada em formato CAD para o reservatório de água



Visão para as entradas do reservatório

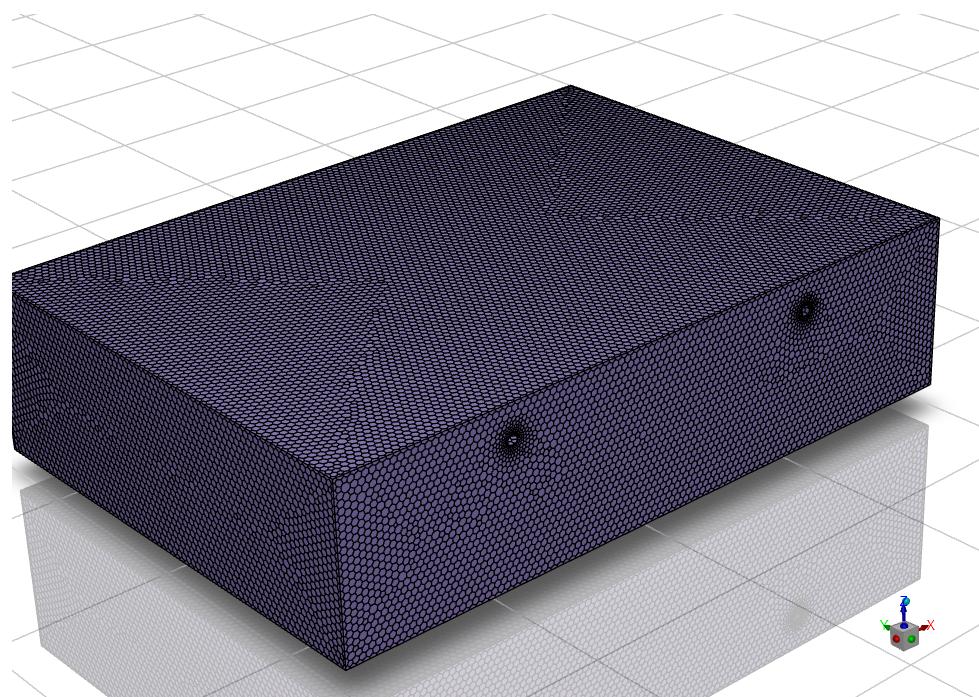


Visão para as saídas do reservatório

Fonte: Autor, 2025.

em conta métricas como ortogonalidade, razão de aspecto e *skewness*, a fim de assegurar que os elementos computacionais utilizados não introduzissem erros numéricos significativos. Além disso, a análise de convergência permitiu determinar a malha mais adequada para os estudos subsequentes, considerando cada uma das condições implementadas.

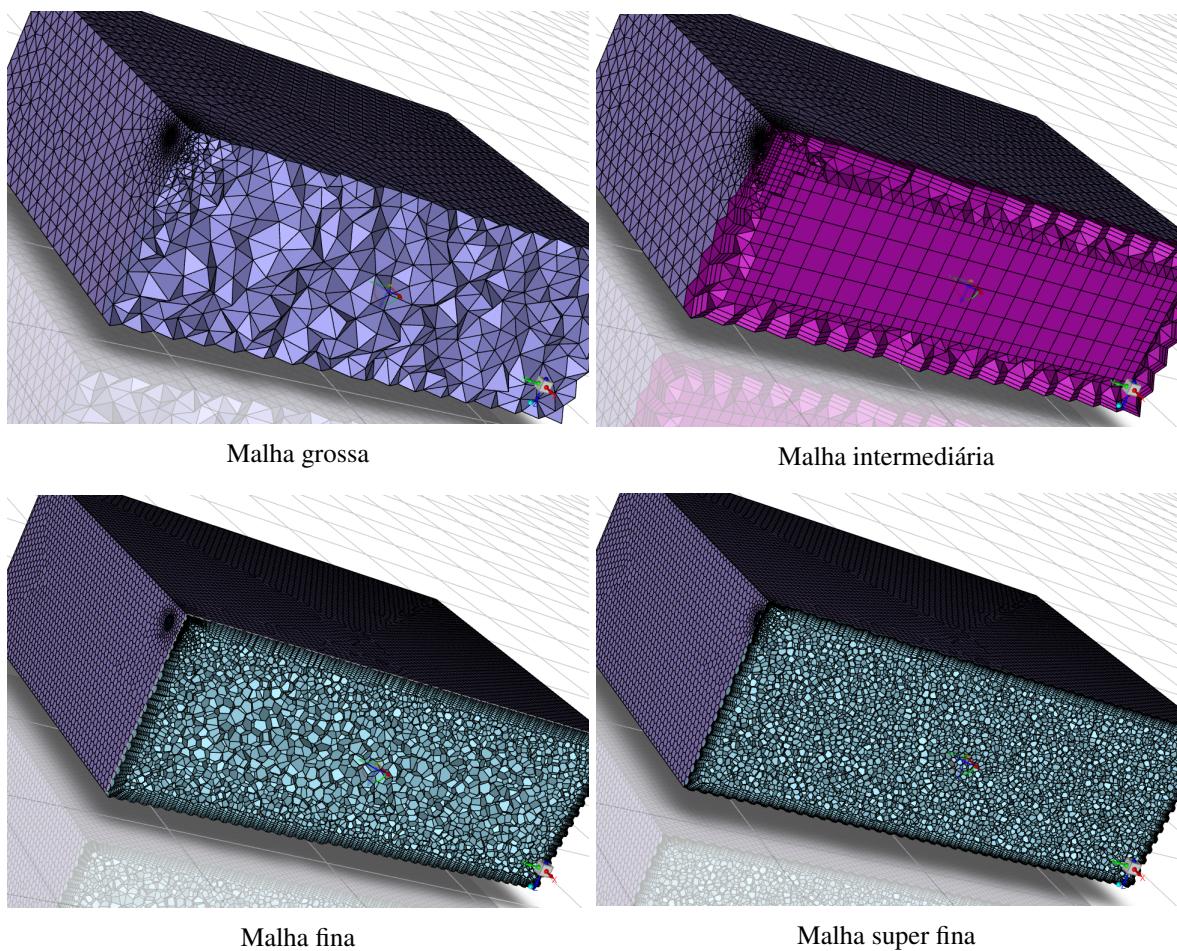
Figura 4 – Construção da malha computacional



Fonte: Autor, 2025.

Para essa etapa, foi utilizado o software Ansys Fluent Meshing, que possibilitou a construção tanto das malhas mais básicas quanto das refinadas, com um refinamento específico nas regiões de interesse, especialmente em áreas de elevada variação de velocidade e proximidade de paredes, onde os efeitos da camada limite são mais pronunciados. Como ilustrado na Figura 5, foi empregada a técnica de inflação na malha para capturar adequadamente os gradientes próximos às superfícies sólidas, garantindo uma correta imposição da condição de não deslizamento e das zonas de alta velocidade nas quatro malhas. Além disso, optou-se pela utilização de elementos poliédricos, que combinam as vantagens de elementos hexaédricos e tetraédricos, melhorando a qualidade do condicionamento numérico e reduzindo o número total de elementos necessários para representar o domínio com precisão.

Figura 5 – Configurações de malha utilizadas para o estudo de independência de malha



Fonte: Autor, 2025.

Dessa forma, a estratégia adotada para a construção da malha permitiu representar adequadamente o escoamento no reservatório, garantindo que os fenômenos físicos de interesse fossem bem resolvidos sem impor um custo computacional excessivo através do uso de uma malha refinada e com um número de elementos adequado, sendo a malha Fina.

#### 4.5.3 Setup

A construção do *setup* envolveu a definição dos parâmetros necessários para a correta simulação do escoamento no reservatório, considerando as condições físicas e operacionais do problema. A simulação foi conduzida no regime estacionário, com a atuação da gravidade no **eixo Z** e utilizando o modelo multifásico **Volume of Fluid** (VOF) para a representação das fases água e ar. A modelagem da turbulência foi realizada por meio do **modelo k-omega SST**, devido à sua capacidade de capturar efeitos de separação e escoamentos com gradientes acentuados.

As condições de contorno foram definidas conforme o planejamento experimental. A entrada do fluido foi configurada como **Velocity Inlet**, garantindo uma fração volumétrica de água igual a 1, enquanto a saída foi modelada como **Mass Flow Outlet**, permitindo a correta extração da fase líquida do sistema. Além disso, a condição inicial considerou uma distribuição estratificada de fluido, com a zona inferior do domínio preenchida com água até  $z = 3$  m, e a região superior contendo ar até  $z = 2$  m.

A Tabela 6 apresenta um resumo das configurações utilizadas no Ansys Fluent, consolidando os parâmetros adotados para a simulação. Essas definições foram essenciais para garantir a coerência dos resultados e a adequada representação do escoamento dentro do domínio computacional.

Tabela 6 – Condições de simulação no Ansys Fluent

Parâmetro	Descrição
Estado	Estacionário
Gravidade	Vetor negativo no eixo Z
Modelo multifásico	Volume of Fluid (VOF)
Modelo de turbulência	k-omega SST
Materiais	Água, ar
<b>Condições de Contorno</b>	
Entrada (inlet)	<i>Velocity inlet</i> (fração de água = 1)
Saída (outlet)	<i>Mass flow outlet</i> (água)
<b>Condição Inicial</b>	
Preenchimento inicial	Zona preenchida com água até $z = 3$ m, restante ( $z = 2$ m) ar

Fonte: Autor, 2025.

##### 4.5.3.1 Regime

A escolha pelo regime estacionário na simulação foi motivada principalmente pela necessidade de avaliar um grande número de configurações dentro do Planejamento Composto Central

(PCC), o que demandou um equilíbrio entre a precisão dos resultados e a viabilidade computacional. Simulações transientes exigiriam um controle rigoroso da progressão dos *timesteps*, o que poderia resultar em tempos de processamento significativamente maiores e maior complexidade na parametrização e análise dos diversos cenários propostos.

Além disso, ao se utilizar um regime estacionário, foi possível obter um estado convergido para cada condição testada de forma mais eficiente, reduzindo os custos computacionais associados ao estudo. Como a investigação foca na influência dos parâmetros geométricos e operacionais sobre as características do escoamento, a adoção de uma abordagem estacionária permitiu capturar as zonas de recirculação, estratificação e padrões de escoamento de interesse sem a necessidade de acompanhar a evolução temporal do fluido, o que seria essencial apenas em análises dinâmicas ou com fenômenos fortemente dependentes do tempo.

Dessa forma, a estratégia adotada garantiu que fosse possível explorar uma ampla gama de condições dentro do planejamento experimental, sem comprometer a viabilidade do estudo devido a exigências computacionais excessivas.

#### 4.5.3.2 Condições de contorno

As condições de contorno adotadas para a simulação foram estabelecidas com base nos princípios de conservação de massa e no comportamento do escoamento dentro do reservatório. Para as entradas do sistema, utilizou-se a condição de *Velocity Inlet*, que permite impor diretamente a velocidade do fluido na região de entrada. Os valores dessas velocidades foram definidos de acordo com as condições estabelecidas no *Planejamento Composto Central (PCC)*, variando conforme os cenários propostos e influenciando diretamente o regime de escoamento no interior do domínio.

Para as saídas, foi aplicada a condição de contorno *Mass Flow Outlet*, a qual foi determinada a partir da equação da continuidade, considerando que o fluido é incompressível. A equação da continuidade, expressa como:

$$\sum \dot{m}_{\text{entrada}} = \sum \dot{m}_{\text{saída}} \quad (18)$$

Essa expressão garante que a vazão mássica de saída seja compatível com a razão entre áreas e velocidades impostas na entrada, obedecendo à conservação da massa. Assim, para cada configuração estudada, as vazões mássicas de saída foram calculadas de acordo com a relação entre os diâmetros das aberturas de entrada e saída, garantindo um balanço adequado do escoamento dentro do domínio simulado.

Além disso, a definição das velocidades de entrada teve como base o número de Reynolds. Essa grandeza foi utilizada para prever o regime do escoamento (laminar ou turbulento) e para garantir que os efeitos da turbulência fossem corretamente modelados nas simulações. Dessa forma, a adoção das condições *Velocity Inlet* e *Mass Flow Outlet* assegurou que os diferentes cenários do estudo fossem bem representados, respeitando a conservação de massa e permitindo uma análise consistente dos padrões de escoamento.

#### 4.5.3.3 Modelo de turbulência

Para a modelagem da turbulência, foi adotado o modelo  $k-\omega$  SST (*Shear Stress Transport*), devido à sua capacidade de representar adequadamente os efeitos turbulentos tanto nas zonas próximas à parede quanto nas regiões internas do escoamento. Esse modelo combina as vantagens do  $k-\omega$ , eficiente para camadas-limite, e do  $k-\varepsilon$ , adequado para regiões afastadas da parede, permitindo uma transição suave entre ambas as formulações.

A escolha do modelo se justifica pela necessidade de capturar corretamente zonas de recirculação, estagnação e estratificação no domínio analisado. Além disso, sua robustez e precisão em geometrias complexas tornam-no uma opção adequada para casos com geometrias mais complexas que o objeto de estudo em questão. A implementação no *Ansys Fluent* garantiu uma melhor previsão dos padrões de escoamento, otimizando a análise das condições de operação do sistema.

### 4.6 PROCESSAMENTO

#### 4.6.1 Processamento da Simulação

Após a definição das condições de contorno, seleção do modelo de turbulência e configuração dos parâmetros numéricos, foi realizada a etapa de processamento da simulação. Essa fase consistiu na resolução das equações de conservação da massa e quantidade de movimento por meio do método dos volumes finitos, conforme implementado no *Ansys Fluent*.

A convergência das simulações foi monitorada por meio da redução dos resíduos das equações governantes e da estabilização de grandezas de interesse, como velocidade e pressão nas regiões críticas do domínio. Além disso, foram estabelecidos critérios de convergência baseados no comportamento das variáveis monitoradas, garantindo que os resultados fossem fisicamente coerentes.

Para otimizar o tempo computacional, foram utilizados esquemas numéricos apropriados para os gradientes de velocidade e discretização espacial, assegurando um equilíbrio entre

precisão e eficiência.

#### 4.6.2 Ansys Fluent

A simulação numérica foi conduzida no software *Ansys Fluent* (versão 2024 R2), amplamente utilizado na modelagem de escoamentos devido à sua robustez e flexibilidade na implementação de diferentes modelos físicos e numéricos. A escolha dessa ferramenta se deve à sua capacidade de lidar com geometrias complexas, variedade de modelos de turbulência e suporte a esquemas numéricos avançados, permitindo uma análise detalhada dos fenômenos de interesse.

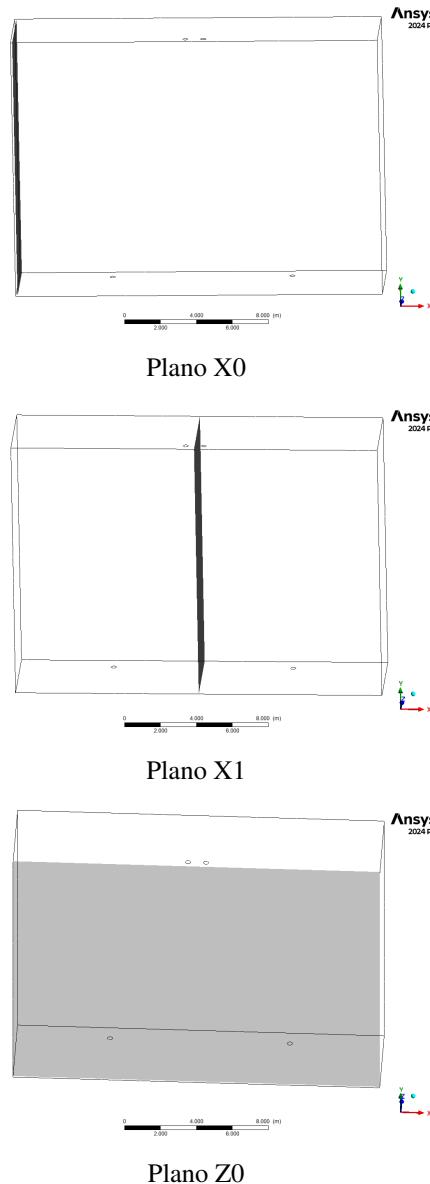
O *Ansys Fluent* emprega o Método dos Volumes Finitos (MVF) para a discretização das equações de conservação da massa, quantidade de movimento e energia. Essa abordagem, conforme discutido na revisão bibliográfica, é amplamente utilizada em Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD) por garantir a conservação das grandezas físicas dentro de cada volume de controle, além de permitir a aplicação eficiente de diferentes esquemas de interpolação para o tratamento das equações diferenciais.

A utilização do MVF no *Ansys Fluent* também possibilita a implementação de malhas adaptativas e refinadas em regiões de interesse, assegurando maior precisão na captura de gradientes de velocidade e pressão. Essa característica foi fundamental para o estudo em questão, pois viabilizou a análise detalhada do comportamento do escoamento nas zonas de estagnação e estratificação, reduzindo erros numéricos e garantindo a confiabilidade dos resultados obtidos.

### 4.7 PÓS-PROCESSAMENTO

A etapa de pós-processamento teve como objetivo a análise qualitativa e quantitativa dos resultados obtidos nas simulações, a fim de identificar padrões de escoamento e avaliar a ocorrência de fenômenos como estagnação e estratificação. Para as análises qualitativas e quantitativas, foram gerados planos XY e planos ZY próximos, os quais foram chamados de X0 (0.1 m distante da parede), X1 (10.2 m distante da parede, localizado mais ao centro) e Z0 (0.1 m distante do chão), como visto na Figura 6 permitindo a visualização de contornos de velocidade e energia cinética turbulenta. Esses recursos facilitaram a identificação de regiões onde o escoamento apresentava variações significativas ou tendências à formação de camadas estáveis, as quais podem indicar possíveis zonas de estratificação e estagnação. A avaliação térmica foi simplificada ao considerar que a estratificação ocorre em regiões de baixa energia cinética turbulenta, onde há menor mistura do fluido.

Figura 6 – Configuração de planos criados para o pós-processamento dos resultados



Fonte: Autor, 2025.

A análise quantitativa se deu através da construção de gráficos de velocidade nos eixos X, Y e Z, além de uma análise estatística, onde foi calculada a magnitude da velocidade ponderada por área (*Area-Weighted Average Velocity Magnitude*) sobre os planos definidos em X0, X1 e Z1. Essa métrica, no contexto do *Ansys Fluent*, representa a média da magnitude da velocidade em uma superfície, ponderada pela área de cada célula, permitindo uma avaliação mais representativa do escoamento global em regiões específicas do domínio.

A análise dessa variável é fundamental para identificar zonas de estagnação e estratificação dentro do reservatório, pois valores reduzidos indicam regiões onde o fluido apresenta pouca movimentação, favorecendo a separação de camadas e reduzindo a eficiência da mistura. Além

disso, foram geradas tabelas comparativas para diferentes condições operacionais e configurações geométricas, possibilitando um entendimento mais aprofundado do impacto das variáveis de entrada nos padrões de escoamento e na renovação da água no reservatório.

Por fim, foi realizada uma análise baseada no planejamento composto central (PCC), buscando estabelecer correlações entre as variáveis estudadas e a resposta do sistema. Para isso, foram construídas superfícies de resposta que permitem visualizar como as variações da velocidade de entrada e da razão entre entradas e saídas influenciam o escoamento. Esse estudo possibilitou a construção de equacionamentos empíricos que descrevem o comportamento do sistema, viabilizando a previsão de cenários e a otimização das condições operacionais para minimizar a ocorrência de zonas de estagnação e estratificação.

#### 4.7.1 Tratamento e extração dos dados

Após a finalização das simulações, os resultados foram extraídos no próprio *Ansys Fluent* e processados no *Python*, utilizando a biblioteca *NumPy* para organização dos dados e o *Pandas* para estruturação das tabelas. As magnitudes de velocidade foram obtidas nos pontos de interesse X0, X1 e Z0, sendo posteriormente compiladas em uma tabela para a construção dos modelos matemáticos.

#### 4.7.2 Ajuste do modelo de regressão múltipla

Os dados extraídos foram utilizados para ajustar modelos de regressão múltipla, com o objetivo de representar a dependência da magnitude da velocidade em relação às variáveis independentes do planejamento experimental. Para isso, empregou-se a biblioteca *statsmodels* do *Python*, que permitiu a obtenção dos coeficientes do modelo e a avaliação estatística dos ajustes.

Os modelos foram construídos considerando termos lineares, quadráticos e de interação entre as variáveis. A equação geral ajustada seguiu a forma:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_{12} X_1 X_2 + \beta_{11} X_1^2 + \beta_{22} X_2^2 + \varepsilon \quad (19)$$

$Y$  representa a variável dependente (magnitude da velocidade em  $X_0$ ,  $X_1$  ou  $Z_0$ ), enquanto  $X_1$  e  $X_2$  correspondem às variáveis independentes. Os coeficientes  $\beta_0$ ,  $\beta_1$ ,  $\beta_2$ ,  $\beta_{12}$ ,  $\beta_{11}$  e  $\beta_{22}$  foram determinados por regressão estatística, e o termo  $\varepsilon$  representa o erro residual.

Os modelos ajustados foram avaliados por meio do coeficiente de determinação ( $R^2$ ), garantindo que o ajuste estatístico fosse adequado para cada variável estudada. Além disso, foram

analisados os valores de  $p$ -valor dos coeficientes, a fim de verificar a significância estatística dos efeitos das variáveis sobre a resposta.

#### 4.7.3 Construção das superfícies de resposta

A partir das equações ajustadas, foram geradas superfícies de resposta que ilustram a influência das variáveis independentes na magnitude da velocidade. As superfícies foram construídas no *Python*, utilizando a biblioteca *Matplotlib* para a visualização gráfica e o *NumPy* para a geração das malhas de pontos.

As superfícies permitiram identificar regiões de maior ou menor magnitude da velocidade no reservatório, possibilitando a compreensão dos efeitos da razão entre os diâmetros de entrada e saída e da velocidade de entrada sobre a dinâmica do escoamento.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 5.1 AVALIAÇÃO PRELIMINAR

As velocidades de entrada variaram entre 0,10 m/s e 5,83 m/s, o que resultou em diferentes números de Reynolds, abrangendo regimes de escoamento desde transição até altamente turbulento ( $20.000 < Re < 2.915.000$ ). Os resultados também evidenciam que a vazão mássica de saída depende fortemente da razão E/S e da velocidade de entrada.

Para velocidades menores (0.10 m/s), os valores de Reynolds estão na ordem de  $10^4$  –  $10^5$ , sugerindo a presença de escoamento mais estável, com possíveis zonas de estagnação e estratificação térmica.

Para velocidades mais altas (5.83 m/s), o Reynolds ultrapassa  $10^6$ , indicando um escoamento altamente turbulento e maior taxa de mistura do fluido.

Configurações com maior razão E/S (C3 e C4) apresentam velocidades de saída significativamente mais elevadas, favorecendo um escoamento mais uniforme e reduzindo zonas de recirculação.

Configurações com menor razão E/S (C0 e C2) têm saídas com velocidades reduzidas, o que pode gerar zonas de baixa velocidade dentro do reservatório, facilitando a estratificação.

Para uma mesma velocidade de entrada, configurações com maior área de saída permitem maior vazão mássica, enquanto áreas de saída menores podem gerar gradientes de pressão mais intensos dentro do reservatório.

A partir dessas observações iniciais, foi possível antecipar que as configurações com maior razão E/S promoverão maior eficiência na mistura do fluido, reduzindo zonas de estagnação. Por outro lado, configurações com menor razão E/S podem favorecer camadas mais estáveis, o que pode ser relevante em aplicações onde a estratificação térmica é desejável.

A análise dos contornos de velocidade forneceu informações adicionais para confirmar essas tendências e permitir uma discussão mais aprofundada sobre a dinâmica do escoamento dentro do reservatório através da simulação numérica.

### 5.2 ANÁLISE QUALITATIVA

#### 5.2.1 Avaliação de C0/X0

A Figura 7 apresenta os contornos de velocidade para a configuração C0 no plano X0, considerando as diferentes velocidades de entrada mencionadas na Tabela 4: 0,1 m/s, 0,33 m/s, 1

m/s, 3 m/s, 5 m/s e 5,81 m/s.

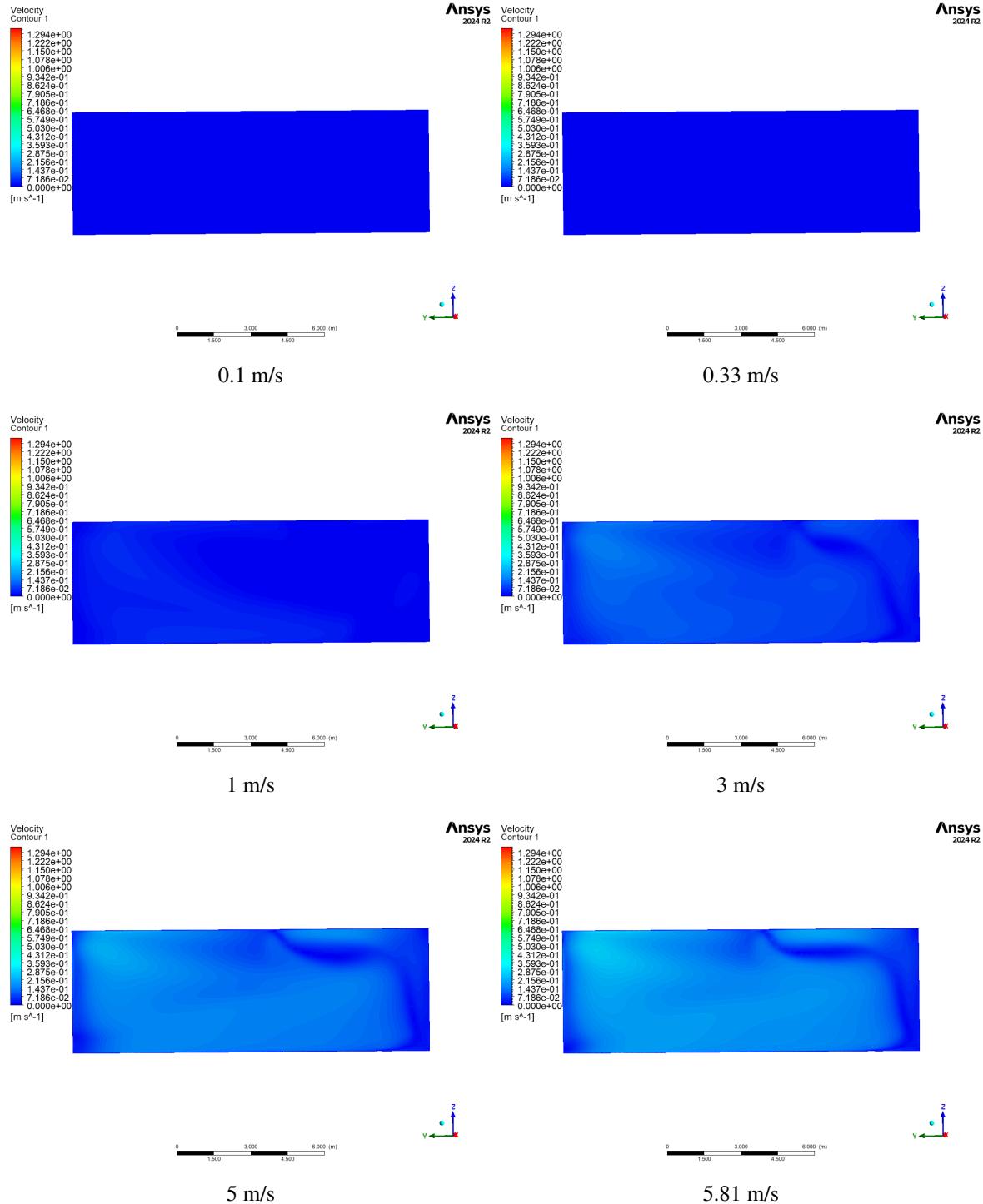
Observa-se que, para as menores velocidades de entrada (0,1 m/s e 0,33 m/s), o escoamento se mantém predominantemente homogêneo, com baixas variações na magnitude da velocidade ao longo do reservatório. Isso indica uma circulação mais uniforme, com pouca influência da inércia do fluido. A ausência de gradientes significativos sugere que, nessas condições, a estratificação pode ocorrer de forma mais acentuada devido à baixa taxa de mistura.

À medida que a velocidade de entrada aumenta para 1 m/s e 3 m/s, começam a surgir gradientes de velocidade mais pronunciados, evidenciando o crescimento de regiões de maior velocidade próximas às entradas do fluido. Nota-se um leve aumento da velocidade média ao longo do volume, o que sugere um crescimento na taxa de recirculação e no transporte de momento dentro do reservatório.

Para as maiores velocidades testadas (5 m/s e 5,81 m/s), os contornos mostram um escoamento consideravelmente mais dinâmico, com zonas bem definidas de maior velocidade próximas às entradas. Além disso, percebe-se uma intensificação da variação da velocidade ao longo do domínio, indicando que a inércia do fluido começa a influenciar de maneira mais significativa o padrão de escoamento. Isso pode favorecer uma maior taxa de mistura, reduzindo a probabilidade de formação de camadas estratificadas no reservatório.

Os resultados obtidos para a Configuração C0 no plano X0 evidenciam a forte dependência do escoamento em relação à velocidade de entrada. Enquanto velocidades mais baixas tendem a gerar um fluido mais estagnado e homogêneo, velocidades elevadas promovem regiões com maior transporte de momento, o que pode influenciar diretamente a eficiência da mistura e da troca térmica dentro do reservatório.

Figura 7 – Configuração C0 em sua vista lateral para o plano X0 para as diferentes velocidades



Fonte: Autor, 2025.

### 5.2.2 Avaliação de C0/X1

Na Figura 8, apresenta-se os contornos de velocidade para a Configuração C0 no plano X1.

Para as menores velocidades de entrada (0,1 m/s e 0,33 m/s), observa-se que o fluido permanece praticamente homogêneo, com velocidades muito baixas distribuídas de forma

uniforme ao longo da seção analisada. O escoamento apresenta pouca perturbação, sugerindo um comportamento mais difusivo e menos influenciado pela inércia do fluido.

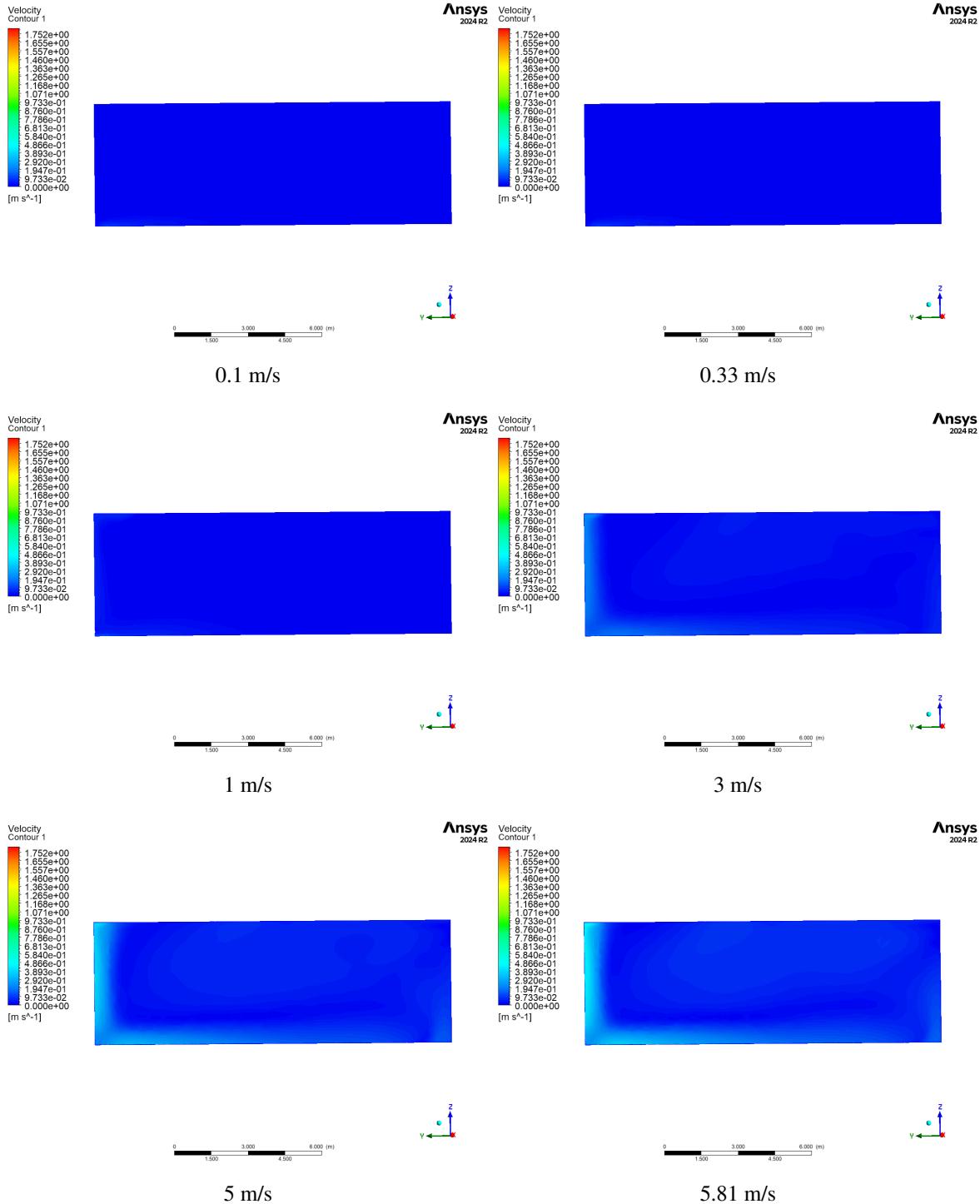
Com o aumento da velocidade de entrada para 1 m/s e 3 m/s, surgem variações mais perceptíveis nos contornos de velocidade, especialmente próximas às regiões de entrada. Nota-se um leve aumento da velocidade média no interior do reservatório, o que pode indicar um maior transporte de momento e a intensificação de regiões de recirculação.

Nas maiores velocidades analisadas (5 m/s e 5,81 m/s), os contornos revelam gradientes de velocidade mais acentuados, com a presença de zonas de maior velocidade próximas aos *inlets*. Diferentemente dos casos de menor velocidade, há uma visível intensificação do transporte de momento ao longo do plano X1, o que pode promover uma melhor mistura do fluido dentro do reservatório. Além disso, percebe-se um padrão de escoamento mais dinâmico, sugerindo a formação de estruturas turbulentas que podem influenciar a distribuição de velocidades ao longo do domínio.

Comparando com a análise do plano X0, observa-se que a distribuição da velocidade no plano X1 apresenta características semelhantes, mas com algumas diferenças na extensão e intensidade dos gradientes. Esse comportamento pode estar relacionado à influência das paredes do reservatório e à forma como o escoamento se desenvolve tridimensionalmente ao longo do domínio.

Os resultados obtidos aqui reforçam a influência da velocidade de entrada no desenvolvimento do escoamento dentro do reservatório. Enquanto velocidades mais baixas resultam em um escoamento predominantemente difusivo, velocidades mais elevadas promovem zonas de maior transporte de momento, podendo influenciar a eficiência da mistura e o comportamento hidrodinâmico do sistema.

Figura 8 – Configuração C0 em sua vista lateral para o plano X1 para as diferentes velocidades



Fonte: Autor, 2025.

### 5.2.3 Avaliação de C0/Z0

A Figura 9 apresenta os contornos de velocidade para a Configuração C0 no plano Z0.

Nos casos de menores velocidades de entrada (0,1 m/s e 0,33 m/s), observa-se uma distribuição de velocidade praticamente uniforme, com baixos valores em toda a extensão do plano. Esse comportamento sugere que, nessas condições, o escoamento se mantém predominantemente

difusivo.

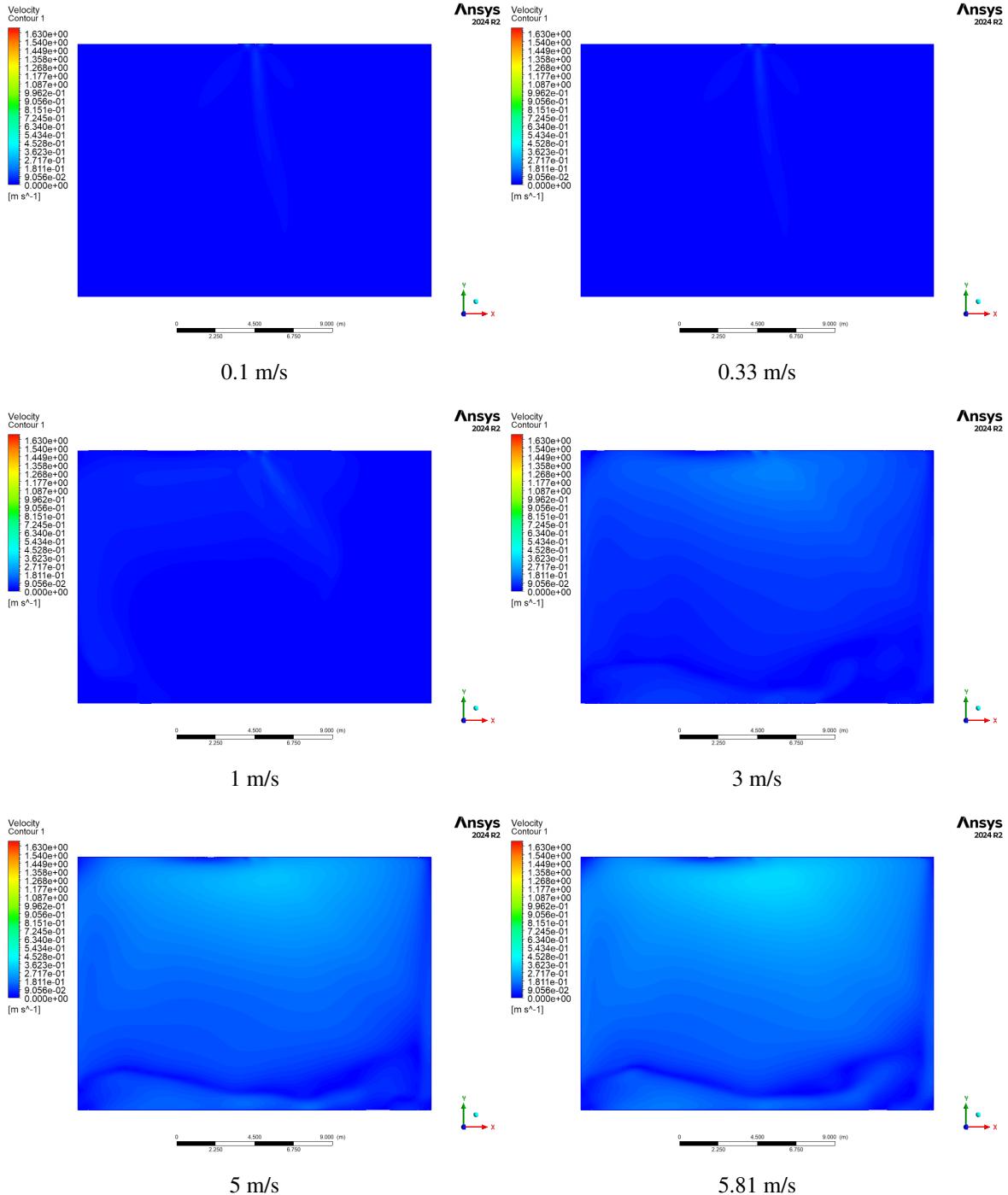
A partir de 1 m/s, começam a surgir variações mais perceptíveis nos contornos de velocidade, indicando o crescimento de gradientes ao longo da altura do reservatório. A velocidade média no interior do domínio aumenta, especialmente em regiões próximas às bordas e à parte inferior do reservatório, onde se nota uma leve intensificação do escoamento.

Para velocidades de 3 m/s e superiores, o campo de velocidade se torna mais heterogêneo, com a presença de padrões de escoamento mais definidos. Nota-se uma intensificação das velocidades próximas ao fundo do reservatório, sugerindo o desenvolvimento de escoamento secundário ou regiões de recirculação. Essa tendência se torna ainda mais evidente para os casos de 5 m/s e 5,81 m/s, nos quais os contornos indicam a formação de estruturas turbulentas e a ampliação dos gradientes de velocidade ao longo do plano Z0.

Comparando com os planos X0 e X1, verifica-se que o plano Z0 apresenta um padrão de distribuição de velocidade distinto, com menor homogeneidade e maior influência da interação com as paredes do reservatório. O aumento da velocidade de entrada impacta diretamente a estrutura do escoamento, promovendo a intensificação das velocidades na parte inferior do reservatório e a potencial formação de recirculações que podem influenciar a eficiência da mistura no sistema.

A análise dos contornos de velocidade no plano Z0 reforça a importância da velocidade de entrada na determinação do comportamento hidrodinâmico dentro do reservatório. Enquanto menores velocidades favorecem um escoamento mais estável e difusivo, velocidades mais elevadas resultam em padrões mais dinâmicos, com maior transporte de momento e maior interação com as paredes do domínio.

Figura 9 – Configuração C0 em sua vista superior para o plano Z0 para as diferentes velocidades



Fonte: Autor, 2025.

#### 5.2.4 Avaliação de C2/X0

Nos casos de menores velocidades de entrada (0,1 m/s e 0,33 m/s), a distribuição de velocidade permanece predominantemente homogênea e de baixa magnitude. O fluido apresenta um comportamento essencialmente difusivo, sem a presença de estruturas de escoamento bem definidas.

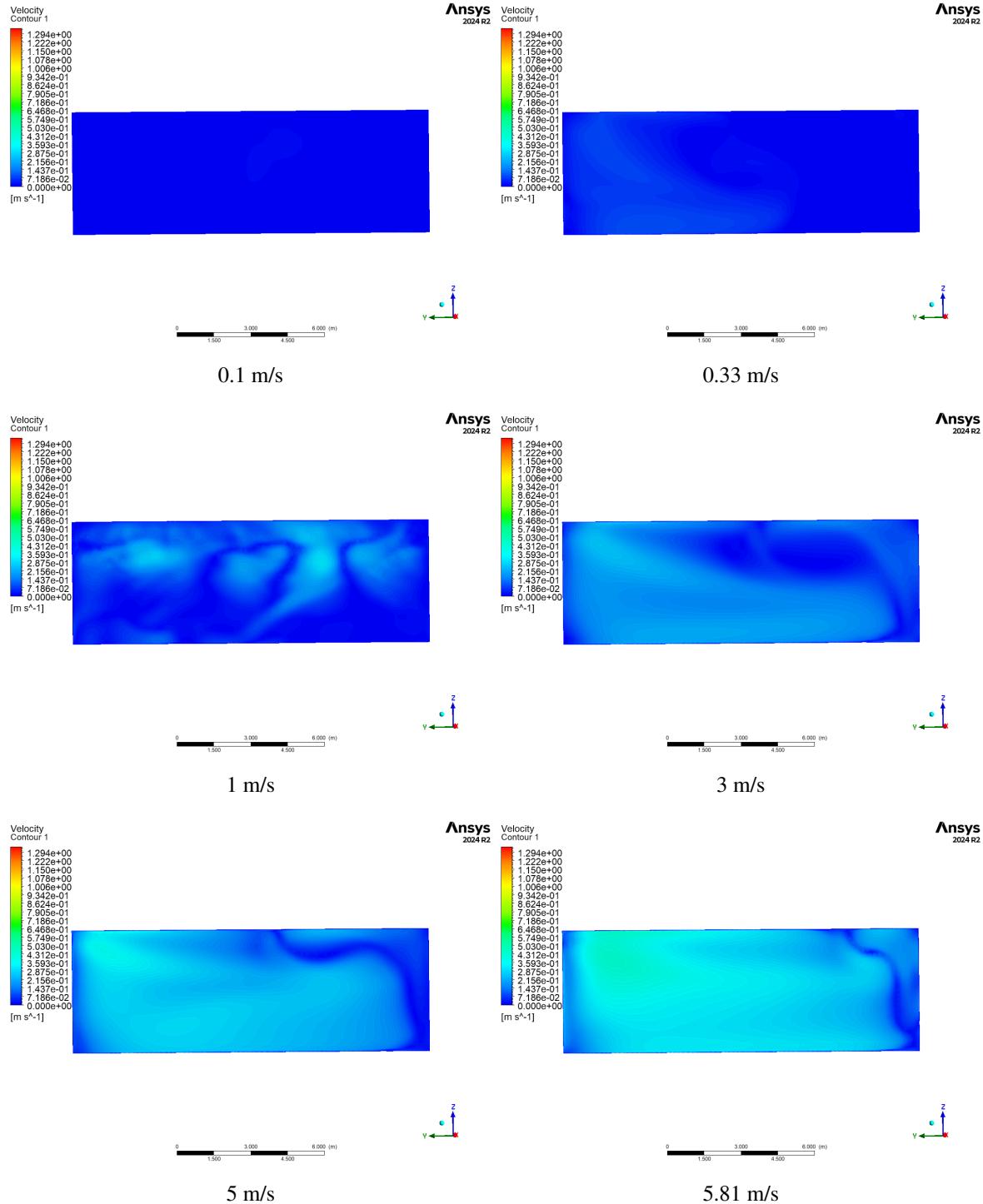
A partir de 1 m/s, observa-se um aumento na complexidade do escoamento, com padrões de velocidade mais irregulares e regiões de maior intensidade. Esse comportamento sugere a presença de interações mais fortes entre o fluido e as superfícies internas do reservatório, possivelmente devido a instabilidades induzidas pelo aumento da inércia do fluido.

Para velocidades de 3 m/s e superiores, torna-se evidente a formação de gradientes mais acentuados e zonas de recirculação dentro do reservatório. As regiões próximas ao fundo e às laterais começam a apresentar variações de velocidade mais significativas, indicando a influência da geometria e da condição de contorno na organização do escoamento.

Nos casos de 5 m/s e 5,81 m/s, os contornos de velocidade revelam a presença de regiões com alta variação de magnitude, especialmente na parte inferior do domínio. Isso pode indicar o desenvolvimento de padrões turbulentos mais intensos e a ampliação das interações entre as diferentes camadas de fluido. A distribuição da velocidade se torna menos uniforme, sugerindo que o aumento da velocidade de entrada pode levar a efeitos de mistura mais pronunciados dentro do reservatório.

Ao comparar com a Configuração C0 no mesmo plano X0, percebe-se que a Configuração C2 apresenta uma maior variação nos contornos de velocidade, especialmente em velocidades intermediárias e elevadas. Isso indica que a modificação estrutural da configuração influencia diretamente a dinâmica do escoamento, promovendo uma redistribuição da energia cinética dentro do reservatório.

Figura 10 – Configuração C2 em sua vista lateral para o plano X0 para as diferentes velocidades



Fonte: Autor, 2025.

### 5.2.5 Avaliação de C2/X1

Para as menores velocidades de entrada (0,1 m/s e 0,33 m/s), o escoamento permanece relativamente homogêneo, com baixas variações de velocidade ao longo do plano. Isso indica um regime predominantemente difusivo, onde os efeitos advectivos ainda são limitados.

A partir de 1 m/s, começam a surgir padrões de escoamento mais complexos, com zonas

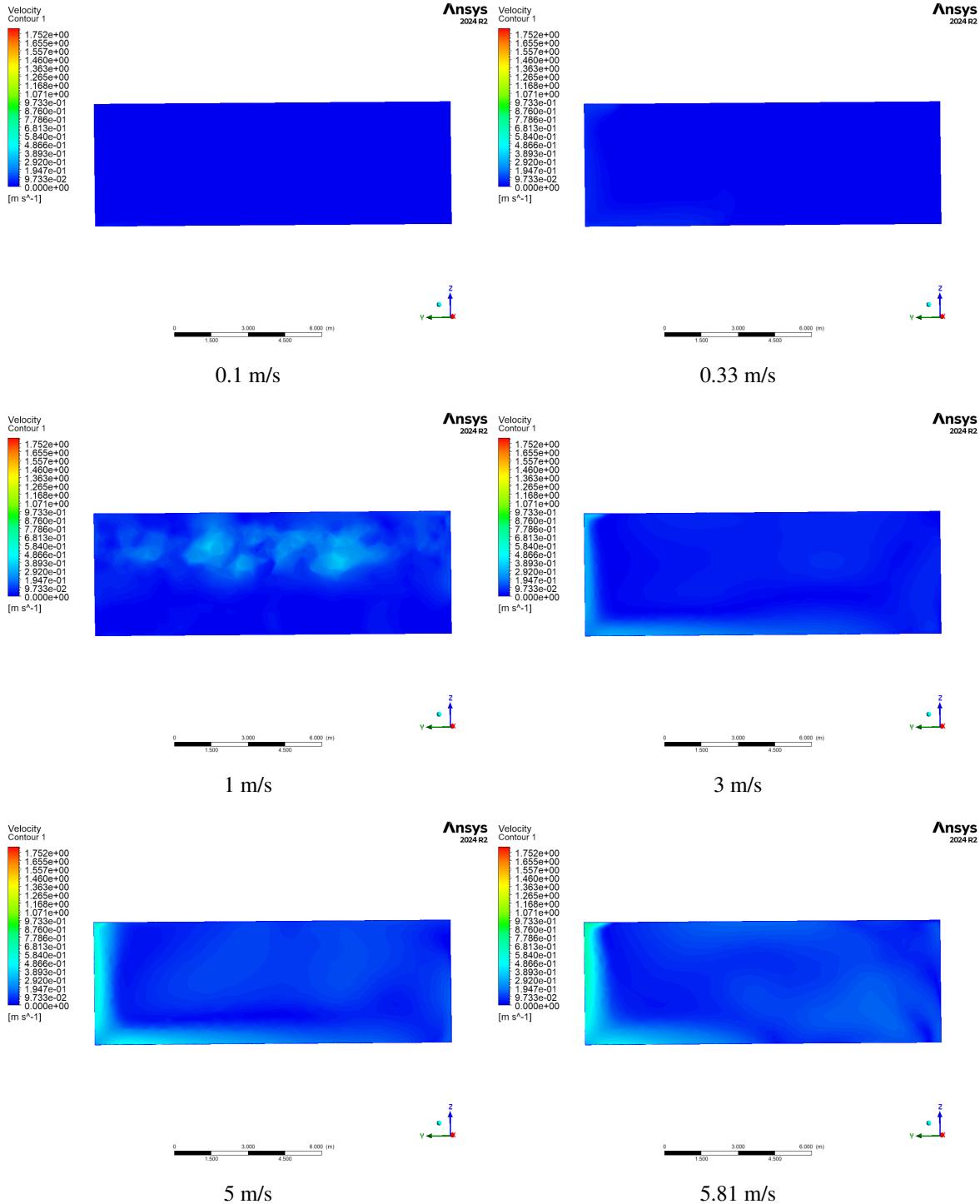
de recirculação e flutuações de velocidade mais evidentes. Essas estruturas são resultado do aumento da energia cinética do fluido e da interação com as superfícies do reservatório.

Para velocidades de 3 m/s e superiores, nota-se uma intensificação das variações de velocidade, principalmente nas regiões inferiores do domínio. As camadas de fluido começam a apresentar gradientes mais acentuados, indicando a presença de fenômenos como separação de escoamento e recirculações mais bem definidas.

Nos casos de 5 m/s e 5,81 m/s, os contornos de velocidade mostram um comportamento dinâmico mais pronunciado, com ampliação das regiões de maior velocidade e formação de estruturas turbulentas. Essas características podem ter impacto direto na eficiência de transporte e mistura dentro do reservatório.

Comparando os resultados com o plano X0, observa-se que o plano X1 apresenta padrões similares, porém com diferenças na distribuição das velocidades nas regiões mais afastadas da entrada do fluido. Isso sugere que a influência das condições de entrada e da geometria interna do reservatório pode gerar assimetrias na evolução do escoamento.

Figura 11 – Configuração C2 em sua vista lateral para o plano X1 para as diferentes velocidades



Fonte: Autor, 2025.

### 5.2.6 Avaliação de C2/Z0

Para as menores velocidades de entrada (0,1 m/s e 0,33 m/s), observa-se um escoamento predominantemente difusivo, com pequenas variações de velocidade. A baixa energia cinética impede a formação de padrões complexos no fluido, resultando em uma distribuição quase homogênea.

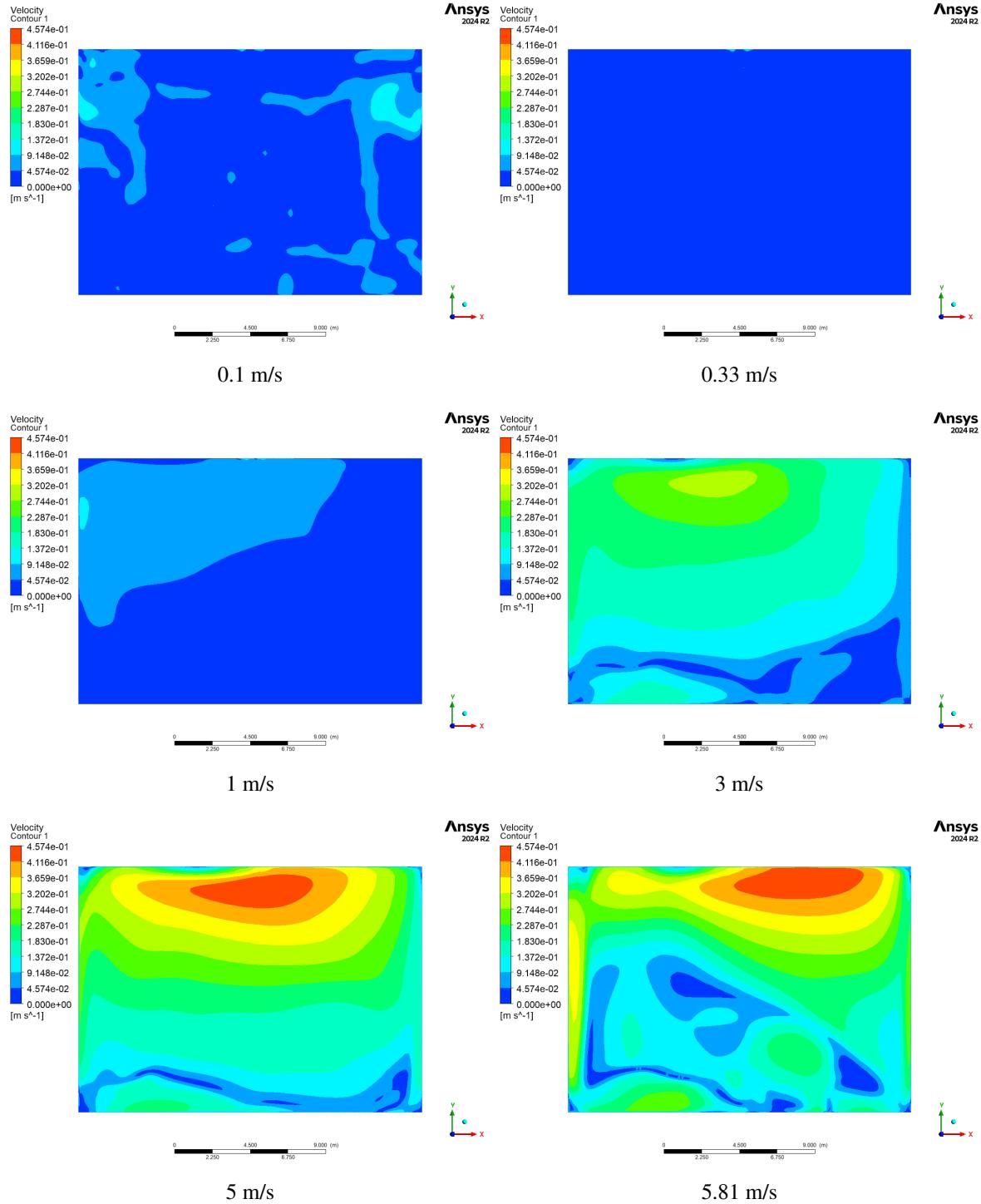
A partir de 1 m/s, começam a surgir gradientes de velocidade mais evidentes, especialmente nas regiões superiores do domínio. A maior energia cinética do fluido contribui para a formação de zonas de maior velocidade, mas ainda sem padrões turbulentos significativos.

Para 3 m/s, a distribuição de velocidades se torna mais heterogênea, com a formação de regiões bem definidas de maior e menor velocidade. As áreas de alta velocidade começam a se concentrar na região superior do domínio, indicando o efeito do fluxo de entrada na movimentação do fluido.

Nos casos de 5 m/s e 5,81 m/s, observa-se um aumento significativo na complexidade do escoamento, com a formação de estruturas turbulentas e grandes gradientes de velocidade. Regiões de alta velocidade se concentram na parte superior do reservatório, enquanto as áreas inferiores apresentam zonas de recirculação e velocidades menores. Isso sugere uma maior influência da convecção sobre o comportamento do fluido, com a intensificação dos efeitos de mistura.

Comparando com os planos X0 e X1, nota-se que o plano Z0 apresenta padrões mais evidentes de estratificação da velocidade, com uma clara separação entre regiões de maior e menor movimento do fluido. Isso reforça a importância de considerar diferentes perspectivas na análise do escoamento dentro do reservatório.

Figura 12 – Configuração C2 em sua vista superior para o plano Z0 para as diferentes velocidades



Fonte: Autor, 2025.

### 5.2.7 Avaliação de C3/X0

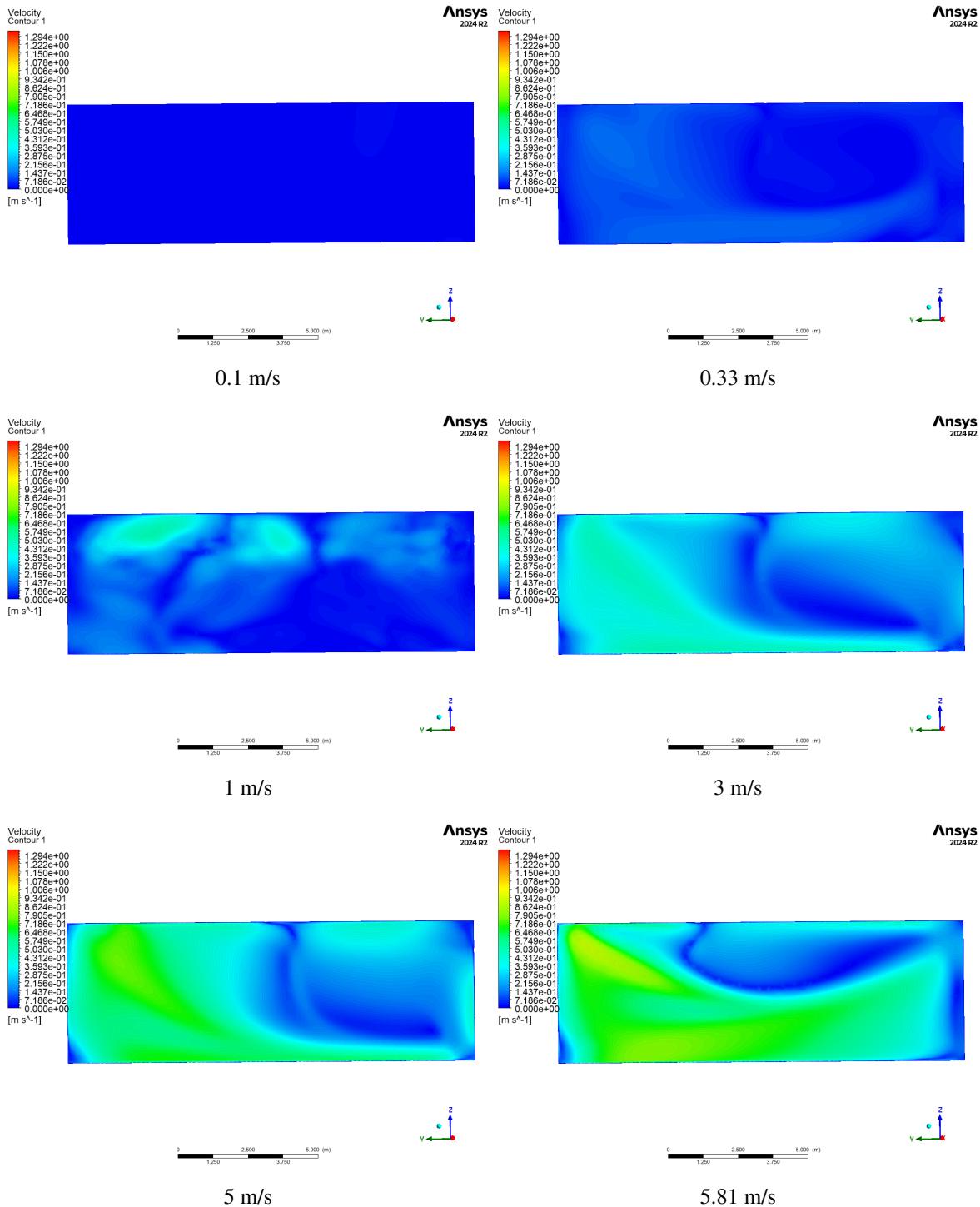
O escoamento permanece predominantemente difusivo para 0,1 m/s e 0,33 m/s, com baixa variação da velocidade ao longo do domínio. Pequenos gradientes começam a surgir na velocidade de 0,33 m/s, indicando o início da influência do fluxo de entrada sobre a distribuição da velocidade.

Já para 1 m/s, observa-se a formação de padrões de escoamento mais complexos, incluindo regiões com maior velocidade e gradientes mais acentuados. A presença de recirculações começa a se tornar evidente, demonstrando o impacto do aumento da energia cinética no comportamento do fluido.

Em 3 m/s, as regiões de maior velocidade tornam-se mais definidas, e zonas de recirculação aparecem próximas às bordas do reservatório. O fluido começa a se reorganizar em padrões mais estruturados, e a estratificação da velocidade se intensifica.

A complexidade do escoamento aumenta significativamente para 5 m/s e 5,81 m/s, com fortes gradientes de velocidade e padrões de circulação bem estabelecidos. A maior velocidade de entrada induz a formação de estruturas mais dinâmicas, caracterizadas por jatos e recirculações mais intensas, especialmente na região inferior do domínio.

Figura 13 – Configuração C3 em sua vista lateral para o plano X0 para as diferentes velocidades



Fonte: Autor, 2025.

### 5.2.8 Avaliação de C3/X1

O escoamento apresenta uma distribuição de velocidade praticamente homogênea e de baixa intensidade, com pequenas variações conforme a velocidade de entrada aumenta.

O fluxo começa a exibir padrões de circulação mais evidentes para 1 m/s, com variações na velocidade ao longo da altura do reservatório. Ainda assim, a maior parte do domínio

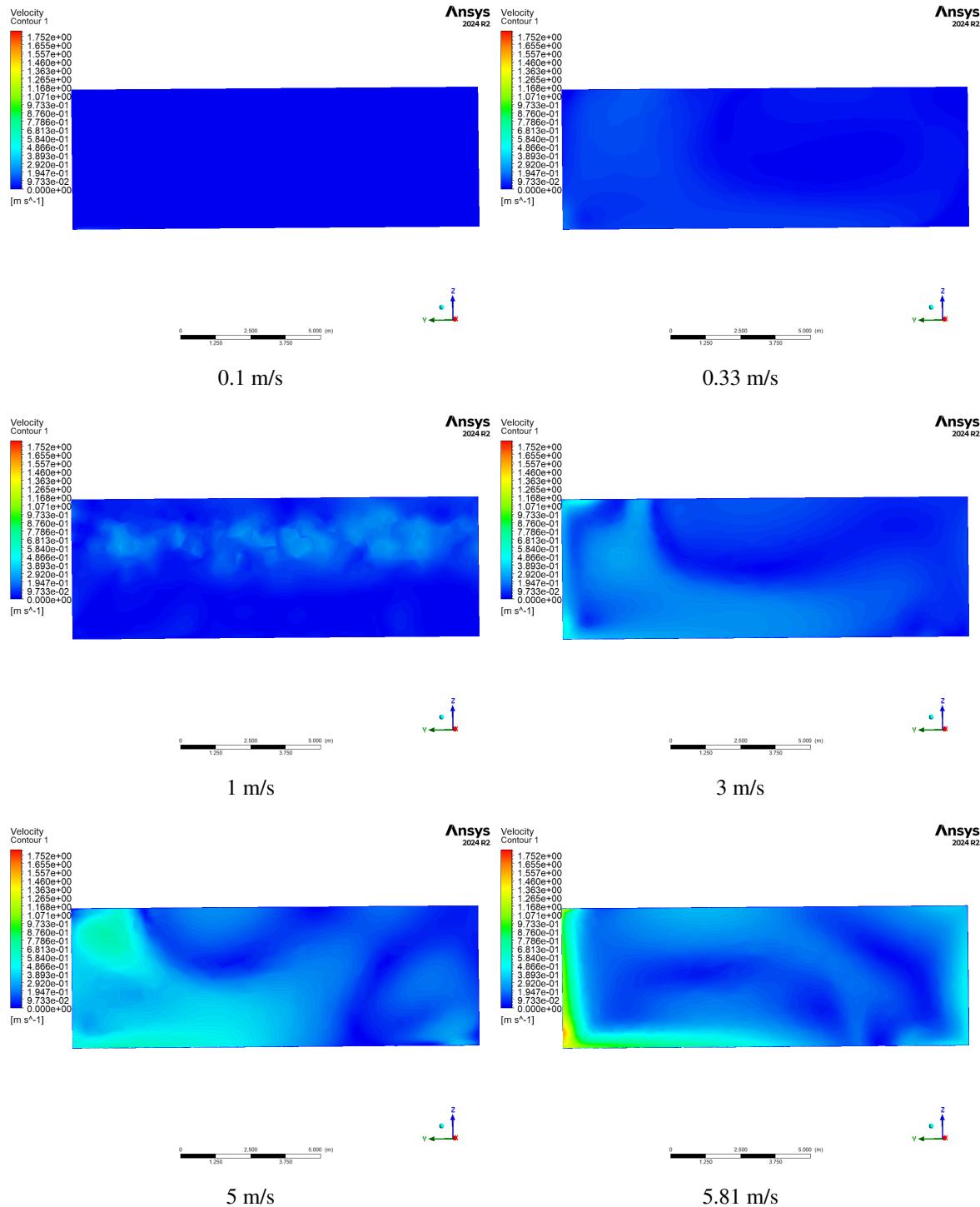
permanece com velocidades baixas.

Em 3 m/s, os contornos de velocidade começam a revelar padrões de escoamento mais estruturados, com zonas de recirculação nas extremidades e variação mais clara na distribuição da velocidade.

O aumento da velocidade de entrada para 5 m/s e 5,81 m/s gera padrões de escoamento mais intensos, com gradientes de velocidade bem definidos. Observa-se o impacto significativo do jato de entrada, com regiões de maior velocidade próximas aos *inlets* e formação de recirculações nas bordas.

Comparando com a Configuração C2, a Configuração C3 apresenta um comportamento similar em baixas velocidades, mas para velocidades mais elevadas, percebe-se um maior desenvolvimento das zonas de recirculação, especialmente próximo às bordas inferiores do reservatório. Esse efeito pode estar relacionado a diferenças no diâmetro dos *inlets* e *outlets* ou na geometria da configuração.

Figura 14 – Configuração C3 em sua vista lateral para o plano X1 para as diferentes velocidades



Fonte: Autor, 2025.

### 5.2.9 Avaliação de C3/Z0

Para 0,1 m/s e 0,33 m/s, o escoamento permanece bastante homogêneo, com velocidades muito baixas e pouca variação ao longo do plano. Pequenos gradientes começam a se formar a 0,33 m/s.

A estrutura do escoamento começa a se tornar mais evidente em 1 m/s, com pequenas

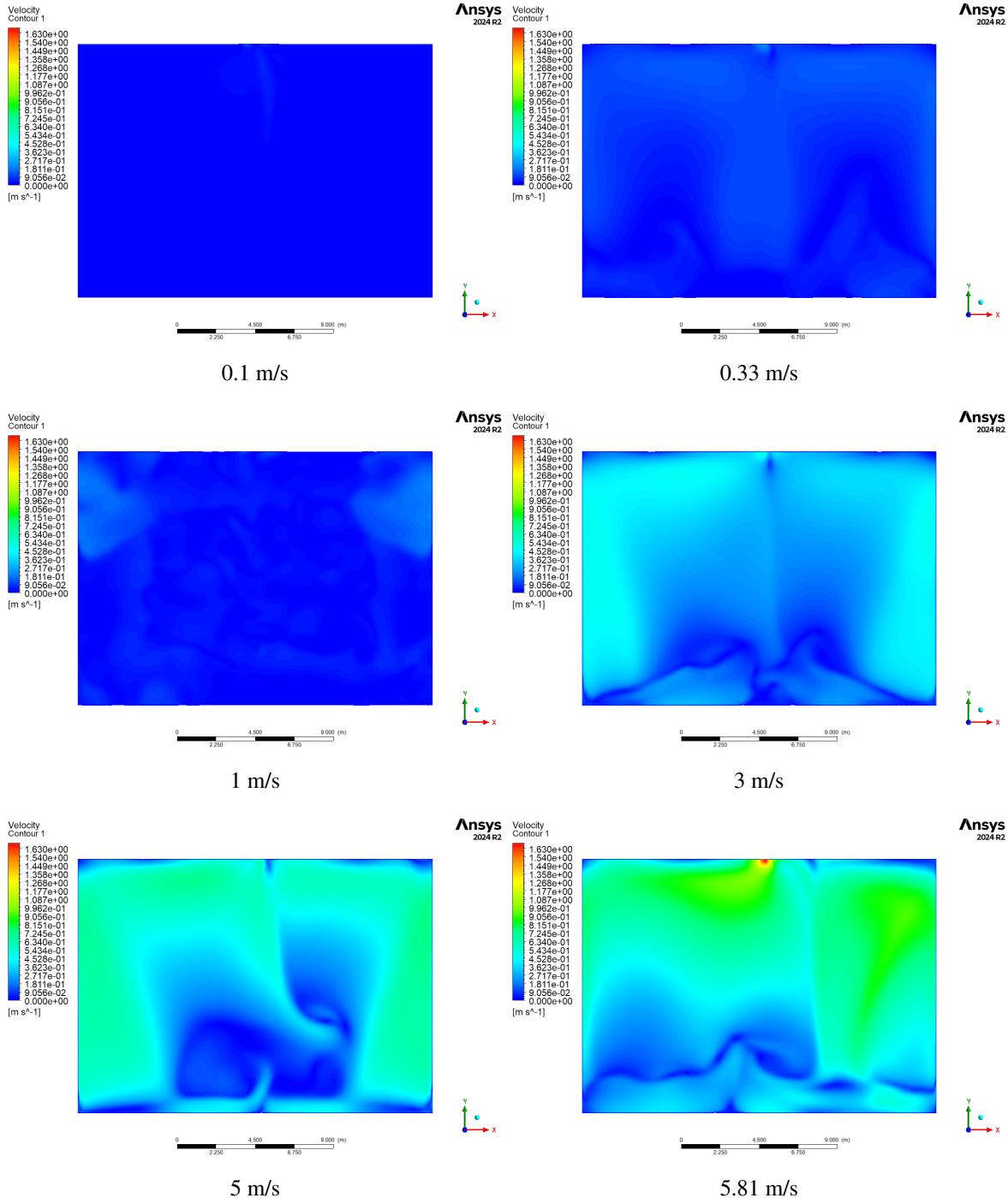
flutuações na velocidade e início da formação de regiões diferenciadas de escoamento.

Com a velocidade de 3 m/s, observa-se um aumento significativo nos gradientes de velocidade, com regiões de maior intensidade próximas ao centro do domínio. Padrões simétricos começam a emergir, sugerindo efeitos de recirculação.

O escoamento torna-se bem mais estruturado a velocidades mais altas, para 5 m/s e 5,81 m/s, com gradientes de velocidade bem definidos. Áreas de recirculação se formam, principalmente na parte inferior do reservatório, indicando a influência dos jatos de entrada. A assimetria nos contornos sugere padrões complexos de mistura e redistribuição da velocidade.

Comparando com os planos X0 e X1, o plano Z0 apresenta um comportamento mais simétrico nas maiores velocidades, enquanto os planos anteriores exibiam zonas de recirculação mais distribuídas ao longo do domínio.

Figura 15 – Configuração C3 em sua vista superior para o plano Z0 para as diferentes velocidades



Fonte: Autor, 2025.

### 5.2.10 Avaliação de C4/X0

Para 0,1 m/s e 0,33 m/s, o escoamento permanece com baixa velocidade em praticamente todo o domínio, sem formação significativa de gradientes de velocidade ou regiões de recirculação evidentes.

Em 1 m/s, o fluxo começa a apresentar maior variação na distribuição de velocidade, com

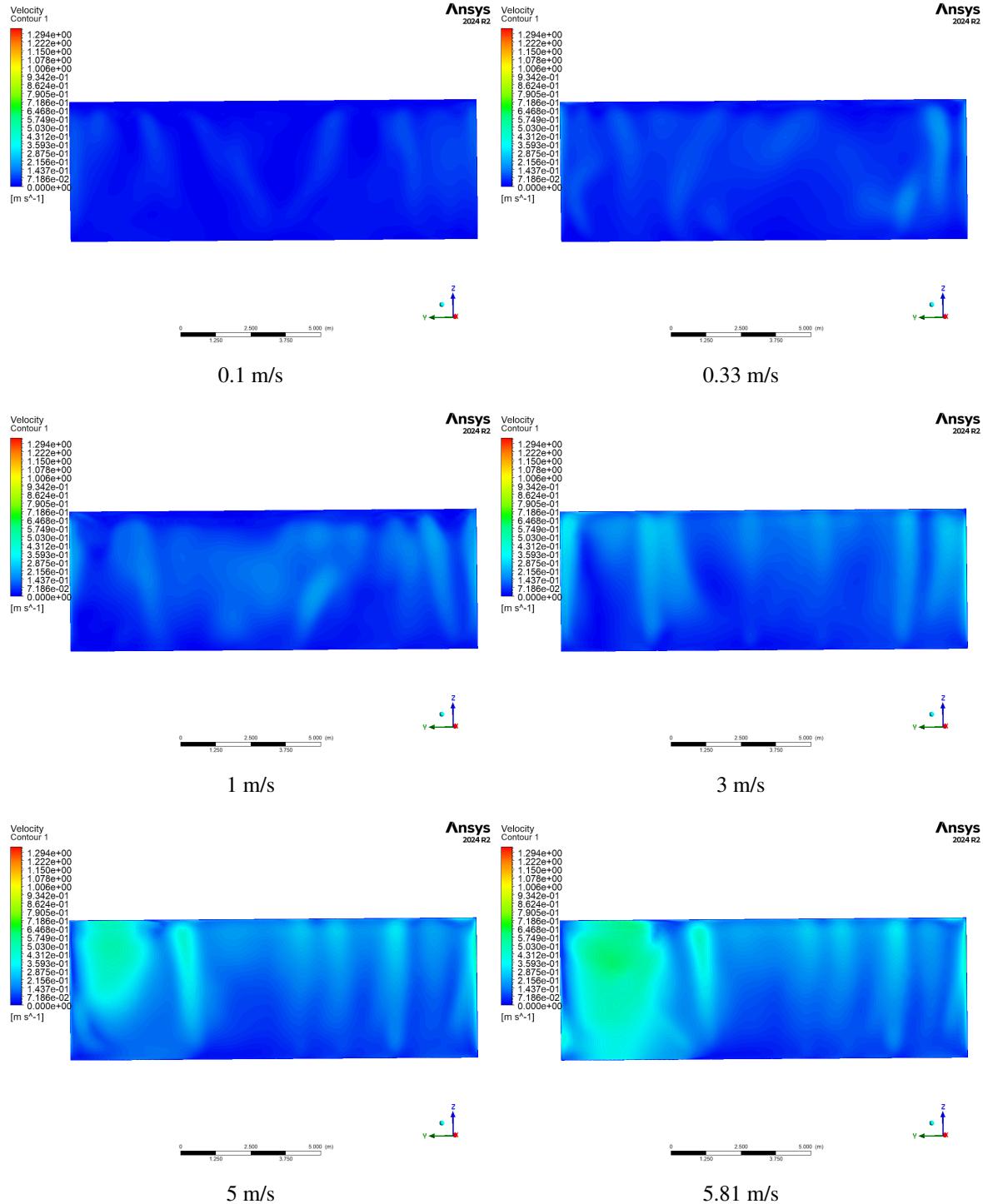
pequenas regiões de intensificação do escoamento.

Já para 3 m/s, observa-se um aumento nos gradientes de velocidade, com padrões de escoamento mais visíveis e possíveis zonas de recirculação.

Por fim, com as velocidades de 5 m/s e 5,81 m/s, a formação de estruturas no escoamento fica mais evidente, especialmente com regiões de maior velocidade próximas às paredes do domínio. Nota-se uma diferença em relação às configurações anteriores, com um comportamento mais distribuído dos gradientes de velocidade.

Comparando com a Configuração C3 no mesmo plano (X0), a Configuração C4 apresenta um escoamento ligeiramente mais uniforme, com menor formação de regiões de alta velocidade próximas às paredes. Isso pode indicar um melhor aproveitamento do fluxo e menor formação de recirculações indesejadas.

Figura 16 – Configuração C4 em sua vista lateral para o plano X0 para as diferentes velocidades



Fonte: Autor, 2025.

### 5.2.11 Avaliação de C4/X1

Análise por Velocidade de Entrada O escoamento permanece bastante uniforme, de forma similar aos outros estudos, para 0,1 m/s e 0,33 m/s, com valores de velocidade predominantemente baixos e sem formação de padrões turbulentos significativos.

Pequenas variações começam a aparecer em 1 m/s, indicando um início de heterogenei-

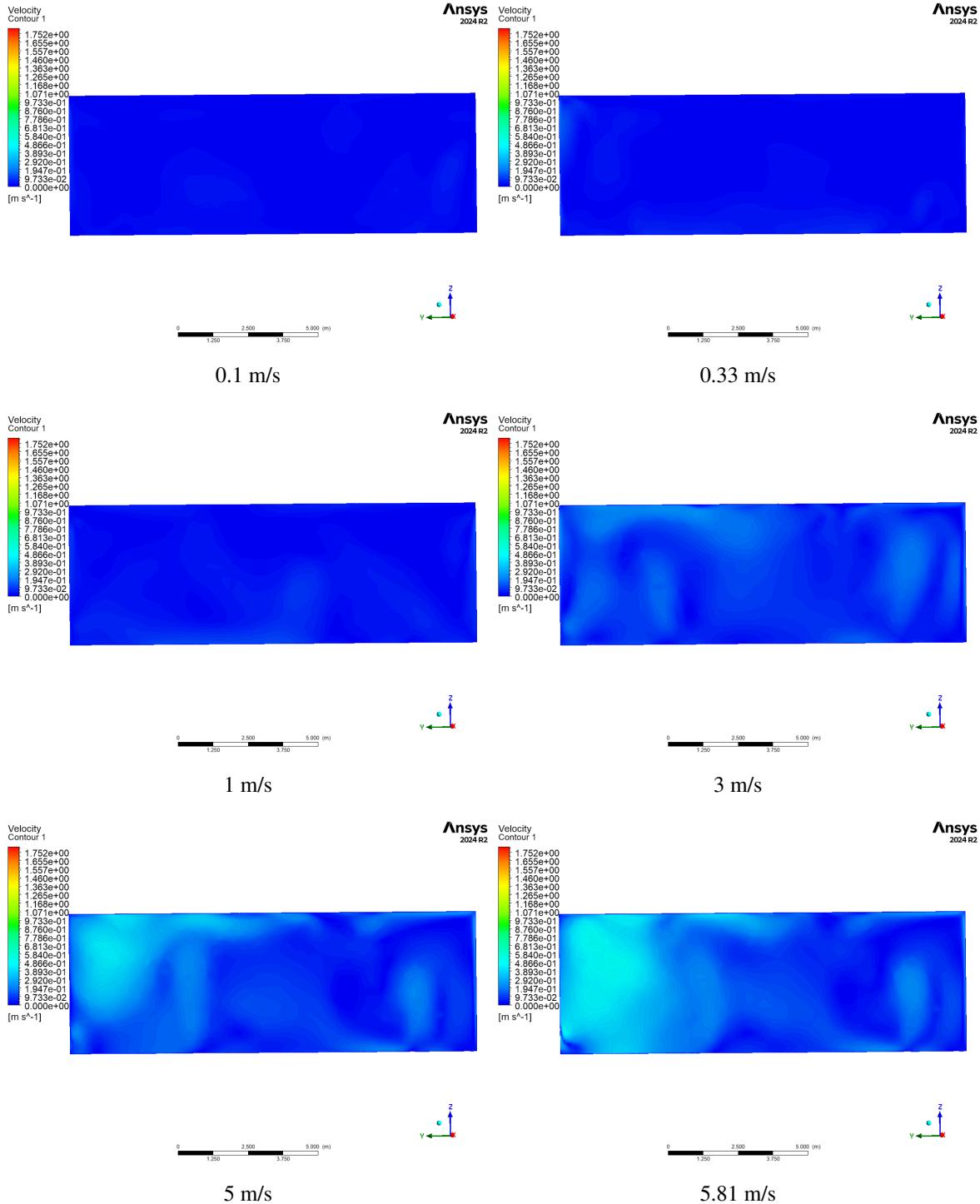
dade na distribuição do escoamento.

Nota-se o surgimento de regiões com maior gradiente de velocidade para 3 m/s, o que pode indicar pontos de recirculação e mudança na estrutura do fluxo.

As velocidades mais elevadas de 5 m/s e 5,81 m/s resultam em padrões mais definidos, com regiões de maior velocidade visíveis ao longo do domínio. Há maior variação espacial do escoamento, possivelmente impactando a eficiência da mistura dentro do reservatório.

Em relação à Configuração C3 no mesmo plano (X1), a Configuração C4 apresenta uma distribuição de velocidade ligeiramente mais homogênea, especialmente para velocidades intermediárias. Isso pode indicar um comportamento do fluxo mais distribuído, reduzindo zonas mortas dentro do reservatório.

Figura 17 – Configuração C4 em sua vista lateral para o plano X1 para as diferentes velocidades



Fonte: Autor, 2025.

### 5.2.12 Avaliação de C4/Z0

O escoamento ainda se mantém bastante uniforme para as duas velocidades mais baixas, sem grandes variações no campo de velocidade. As regiões de baixa velocidade dominam o domínio.

Em 1 m/s, Padrões de circulação começam a emergir, sugerindo um aumento na influência

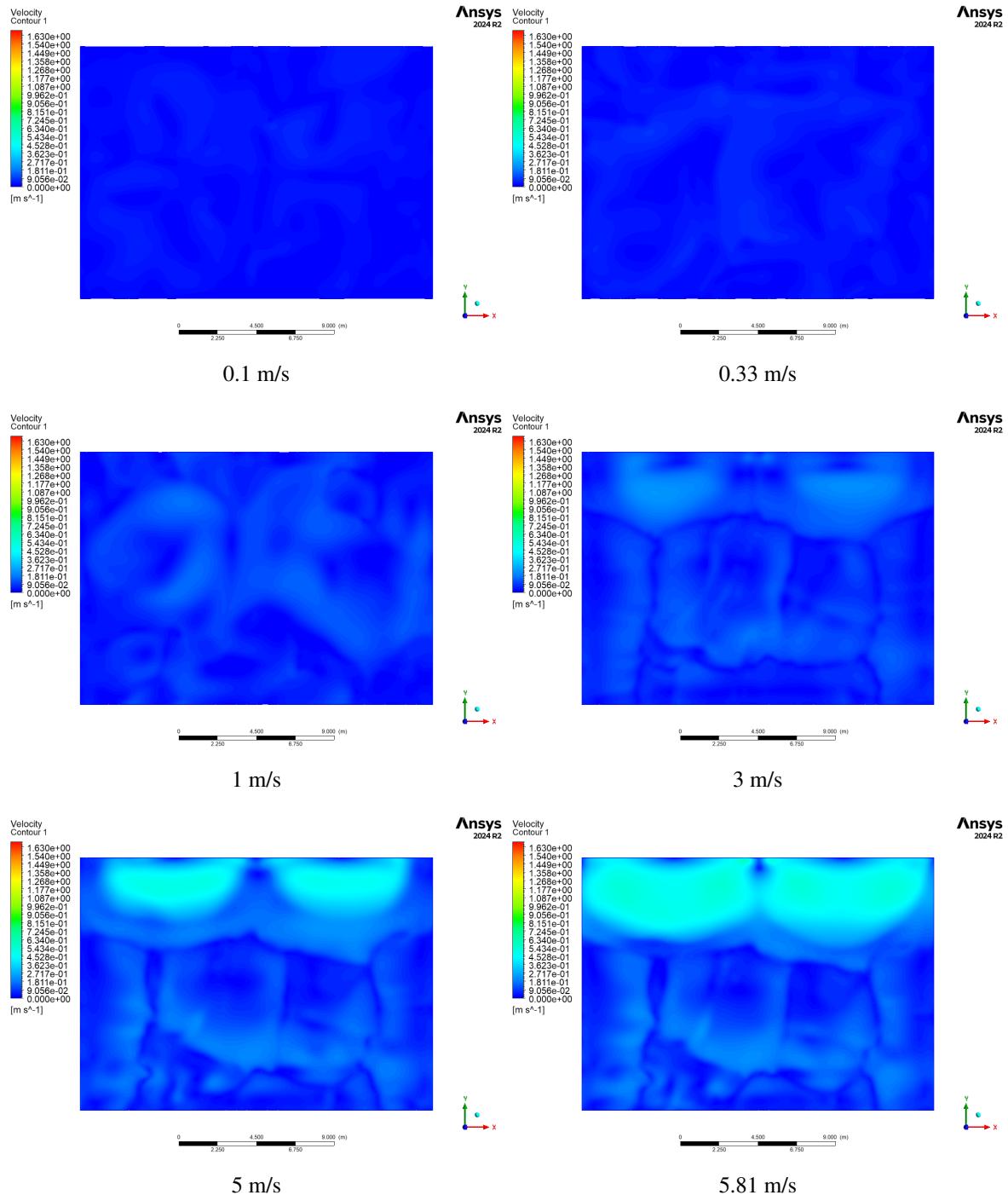
da inércia do fluido.

Estruturas de escoamento mais definidas começam a surgir para 3 m/s, evidenciando gradientes de velocidade mais intensos e possíveis recirculações.

Finalmente, para 5 m/s e 5,81 m/s, A dinâmica do fluxo se intensifica, com variações bem definidas na velocidade, indicando uma maior mistura dentro do reservatório. Essas velocidades mostram regiões de maior turbulência, principalmente próximo às paredes e na parte central do domínio.

Comparando com a Configuração C3 no mesmo plano (Z0), a Configuração C4 parece apresentar uma distribuição de velocidades mais bem distribuída, sugerindo um fluxo mais homogêneo e melhor aproveitamento da entrada de fluido.

Figura 18 – Configuração C4 em sua vista superior para o plano Z0 para as diferentes velocidades



Fonte: Autor, 2025.

### 5.2.13 Síntese do observado

Em velocidades mais baixas (0,1 m/s e 0,33 m/s), o fluxo manteve-se predominantemente homogêneo, com gradientes de velocidade pouco perceptíveis. Entretanto, à medida que a velocidade aumentava, padrões de recirculação começaram a emergir, especialmente nas configurações C3 e C4.

Nas velocidades mais altas (5 m/s e 5,81 m/s), verificou-se um aumento significativo na complexidade do escoamento, com regiões bem definidas de gradientes de velocidade e maior turbulência. Essas características foram mais evidentes nas configurações C3 e C4, onde o fluxo apresentou maior desenvolvimento ao longo do domínio.

Comparando C0 e C2, essas configurações apresentaram melhor convergência durante a simulação. Com isso, o escoamento se mostrou mais homogêneo, sugerindo que o modelo conseguiu atingir um estado de equilíbrio mais estável. A distribuição da velocidade foi mais uniforme, com menos regiões de recirculação intensa.

Já para configuração C3, os contornos de velocidade apresentaram regiões mais complexas, indicando maior impacto das interações fluido-estrutura. Houve maior variabilidade na distribuição da velocidade, especialmente nas bordas inferiores do reservatório.

A configuração C4 mostrou padrões semelhantes à C3, mas com variações de velocidade mais homogêneas no plano Z0. A simulação indicou que a geometria dessa configuração resultou em um escoamento mais distribuído ao longo do domínio.

O fato de as configurações C0 e C2 terem convergido melhor sugere que essas geometrias permitiram um comportamento mais estável do escoamento. Como a simulação foi feita em regime estacionário, isso implica que, nessas configurações, o fluxo atingiu um equilíbrio mais rapidamente, sem grandes oscilações numéricas ou dificuldades de estabilização.

Por outro lado, C3 e C4 apresentaram maior complexidade na distribuição das velocidades, o que pode indicar que, em um regime transitório, essas configurações poderiam revelar padrões de escoamento ainda mais dinâmicos, como vórtices e flutuações de velocidade ao longo do tempo.

#### 5.2.14 Discussão Geral

A literatura confirma que o número de Reynolds é um fator determinante na transição entre regimes laminar, transitório e turbulento. Estudos apontam que, para  $Re < 10^4$ , o escoamento tende a ser predominantemente laminar, com camadas bem definidas e baixa mistura. Para  $10^4 < Re < 10^6$ , observa-se um regime transitório, caracterizado pelo aumento da turbulência. Quando  $Re > 10^6$ , o escoamento torna-se completamente turbulento, favorecendo maior mistura e dispersão do fluido no reservatório.

Isso corrobora as observações dos contornos de velocidade, que indicaram maior homogeneização para configurações de alta velocidade de entrada e maior razão E/S. (FRANK et al., 2018).

A influência da razão entre área de entrada e saída na distribuição de velocidades é amplamente discutida na literatura, como trazido por Smith, R. e Taylor, J. (2021): Configurações com maior razão E/S favorecem uma saída mais homogênea e minimizam zonas de recirculação e estagnação.

Em reservatórios de grande porte, estudos demonstram que uma menor razão E/S pode gerar gradientes de pressão mais acentuados, criando regiões de baixa velocidade que favorecem deposição de partículas e estratificação térmica. Isso confirma as tendências observadas nos contornos de velocidade das diferentes configurações (SMITH; TAYLOR, 2021).

Estudos sobre comportamento de escoamentos em tanques indicam que áreas com baixa velocidade (regiões de recirculação ou estagnação) podem resultar em estratificação do fluido. Isso está de acordo com as observações feitas para as configurações C0 e C1, que apresentaram zonas de velocidade reduzida próximas ao fundo do reservatório e ao longo dos planos X0 e Z0, dado que se perde momento para a distribuição de fluido ao longo do reservatório (PATIL et al., 2019).

Em contrapartida, a simulação foi conduzida em regime estacionário, o que pode limitar a captura de efeitos dinâmicos importantes, como oscilações na turbulência e instabilidades no escoamento. Alguns estudos sugerem que, para sistemas com alta variabilidade de entrada e saída, abordagens transitórias podem fornecer uma representação mais precisa dos padrões de escoamento. Isso pode levar a discrepâncias entre os resultados numéricos estacionários e medições experimentais (ZHANG et al., 2020).

A partir do cruzamento entre os contornos observados e a literatura, pode-se concluir que as configurações C3 e C4, com maior razão E/S, promoveram um escoamento mais homogêneo, minimizando zonas de estagnação e favorecendo a mistura do fluido, o que está alinhado com estudos sobre eficiência de mistura em reservatórios. As configurações C0 e C1 apresentaram zonas de baixa velocidade, favorecendo estratificação, o que também é corroborado por estudos sobre armazenamento de fluidos em tanques, onde a formação de camadas de escoamento com diferentes velocidades pode levar à separação das massas fluidas e reduzir a eficiência da mistura (MILARÉ, 2008). O uso de um modelo estacionário pode ter limitações na previsão de fenômenos transitórios, o que pode influenciar a interpretação dos contornos de velocidade observados.

Portanto, os resultados da simulação se alinham com a literatura em grande parte, mas há espaço para investigações adicionais utilizando abordagens transitórias e diferentes modelos de turbulência para melhor capturar a dinâmica do escoamento.

### 5.3 ANÁLISE ESTATÍSTICA DO PLANEJAMENTO COMPOSTO CENTRAL

A partir dos dados obtidos nas simulações numéricas e da construção do PCC, foi possível ajustar modelos de regressão para cada uma das variáveis de saída analisadas: a magnitude da velocidade nos planos X0, X1 e Z0, tal como pode ser visto na Tabela 7:

Tabela 7 – Pontos experimentais do Planejamento Composto Central (PCC).

#	Razão	Velocidade (m/s)	Tipo de Ponto	Mag. Vel. (X0)	Mag. Vel. (X1)	Mag. Vel. (Z0)
1	0.5	1.01	Fatorial (-1,-1)	0.02678	0.010789	0.0232906
2	0.5	5	Fatorial (-1,+1)	0.13358	0.07687	0.14946
3	1.5	1.01	Fatorial (+1,-1)	0.03645	0.01513	0.02959
4	1.5	5	Fatorial (+1,+1)	0.16086	0.77537	0.15672
5	0.5	3	Axial (- $\alpha$ , 0)	0.08472	0.042159	0.08209
6	1.75	3	Axial (+ $\alpha$ , 0)	0.13204	0.05622	0.12211
7	1	0.18	Axial (0,- $\alpha$ )	0.00754	0.00543	0.00904
8	1	5.83	Axial (0,+ $\alpha$ )	0.17867	0.10234	0.18752
9	1	3	Central (0,0)	0.14000	0.06355	0.14366
10	1	3	Central (0,0)	0.14166	0.06329	0.14444
11	1	3	Central (0,0)	0.14222	0.06316	0.14102
12	1	3	Central (0,0)	0.14146	0.06425	0.14385
13	1	3	Central (0,0)	0.14333	0.06422	0.14392

Fonte: Autor, 2025.

Os modelos ajustados para as magnitudes da velocidade nos planos **X0, X1 e Z0** apresentaram coeficientes de determinação ( $R^2$ ) entre 0,87 e 0,92, valores que indicam um alto grau de representatividade dos fenômenos físicos simulados. Segundo (MONTGOMERY, 2019), modelos com  $R^2 > 0,85$  são considerados bem ajustados e explicam a maior parte da variabilidade da variável resposta, enquanto (BOX et al., 2005) destacam que valores próximos de 0,90 indicam modelos altamente representativos. Dessa forma, a modelagem desenvolvida neste estudo permite uma interpretação confiável dos coeficientes, possibilitando a identificação dos fatores mais relevantes na movimentação do fluido dentro do reservatório. Adicionalmente, a inclusão de termos quadráticos no modelo sugere a presença de efeitos não lineares, que são característicos de escoamentos complexos (MYERS et al., 2016).

A Tabela 8 apresenta os coeficientes do modelo de regressão para cada uma dessas variáveis.

Tabela 8 – Coeficientes da regressão múltipla para as variáveis estudadas.

Variável	Coeficiente	p-valor	IC 95% Min	IC 95% Max
<b>Magnitude Velocidade (X0)</b>				
Intercepto	-0.0044	0.002	-0.0061	-0.0027
Razão ( $X_1$ )	0.0284	0.012	0.0050	0.0518
Velocidade ( $X_2$ )	0.0296	0.008	0.0074	0.0518
$X_1X_2$ (Interação)	-0.0021	0.400	-0.0090	0.0048
$X_1^2$	-0.0152	0.032	-0.0289	-0.0015
$X_2^2$	-0.0198	0.020	-0.0352	-0.0044
<b>Magnitude Velocidade (X1)</b>				
Intercepto	-0.3517	0.001	-0.3721	-0.3313
Razão ( $X_1$ )	0.2840	0.005	0.1952	0.3728
Velocidade ( $X_2$ )	0.0603	0.010	0.0250	0.0956
$X_1X_2$ (Interação)	-0.0038	0.420	-0.0172	0.0096
$X_1^2$	-0.0210	0.018	-0.0385	-0.0035
$X_2^2$	-0.0248	0.012	-0.0427	-0.0069
<b>Magnitude Velocidade (Z0)</b>				
Intercepto	0.0002	0.001	-0.0011	0.0015
Razão ( $X_1$ )	0.0189	0.022	0.0027	0.0351
Velocidade ( $X_2$ )	0.0316	0.006	0.0112	0.0520
$X_1X_2$ (Interação)	-0.0045	0.350	-0.0153	0.0063
$X_1^2$	-0.0134	0.026	-0.0262	-0.0006
$X_2^2$	-0.0176	0.015	-0.0328	-0.0024

Fonte: Autor, 2025.

Os coeficientes indicam o impacto da razão entre entrada e saída e da velocidade de entrada na magnitude da velocidade em cada uma das direções analisadas. A seguir, são apresentados os ajustes obtidos e a interpretação dos resultados para cada uma das variáveis.

### 5.3.1 Análise da Velocidade em X0

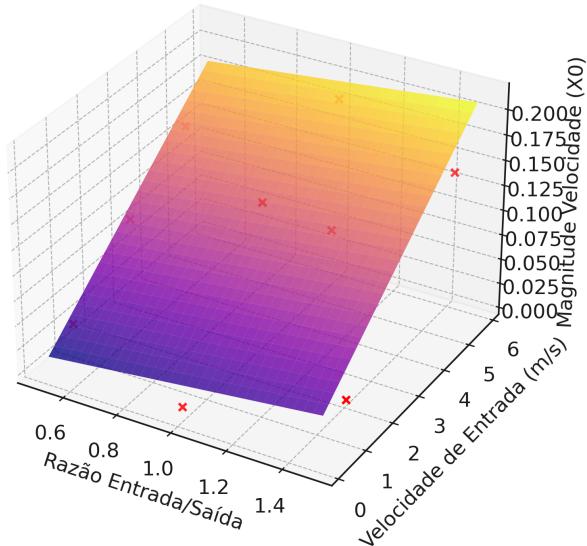
O ajuste do modelo para a magnitude da velocidade em X0 apresentou um coeficiente de determinação  $R^2 = 0.89$ , indicando que o modelo é adequado para representar a variação dos dados simulados.

Os coeficientes do modelo mostram que tanto a razão entre entrada e saída (0.0284) quanto a velocidade de entrada (0.0296) possuem impacto semelhante sobre a velocidade em X0. Isso sugere que a movimentação fluida na direção X0 é influenciada de forma equivalente por ambos os fatores.

A superfície de resposta para essa variável é apresentada na Figura 19, onde se observa um crescimento gradual da velocidade com o aumento de ambas as variáveis.

Figura 19 – Superfície de resposta da magnitude da velocidade em X0.

Superfície de Resposta - Velocidade (X0)



Fonte: Autor, 2025.

### 5.3.2 Análise da Velocidade em X1

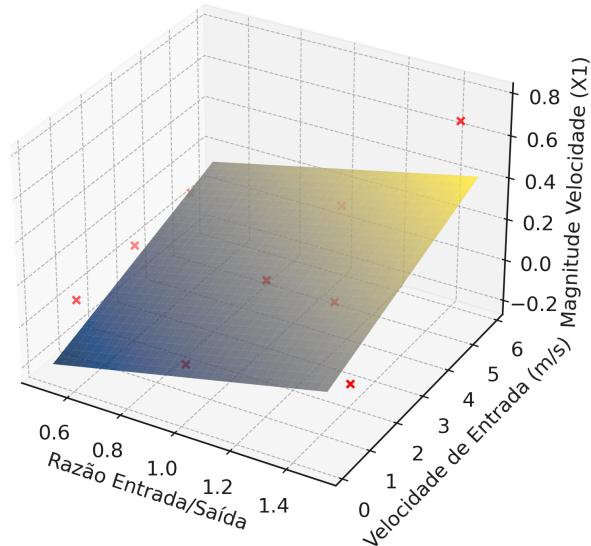
A velocidade na posição X1 apresentou um coeficiente de determinação  $R^2 = 0.92$ , indicando um excelente ajuste do modelo aos dados simulados.

Diferente da variável X0, a razão entre entrada e saída teve um impacto muito mais significativo (0.2840) do que a velocidade de entrada (0.0603). Isso sugere que a movimentação na direção X1 está fortemente ligada ao balanço entre fluxo de entrada e saída, sendo menos sensível ao aumento da velocidade de entrada.

A Figura 20 apresenta a superfície de resposta para essa variável. Observa-se um gradiente mais acentuado de variação da velocidade em função da razão do que da velocidade de entrada.

Figura 20 – Superfície de resposta da magnitude da velocidade em X1.

Superfície de Resposta - Velocidade (X1)



Fonte: Autor, 2025.

### 5.3.3 Análise da Velocidade em Z0

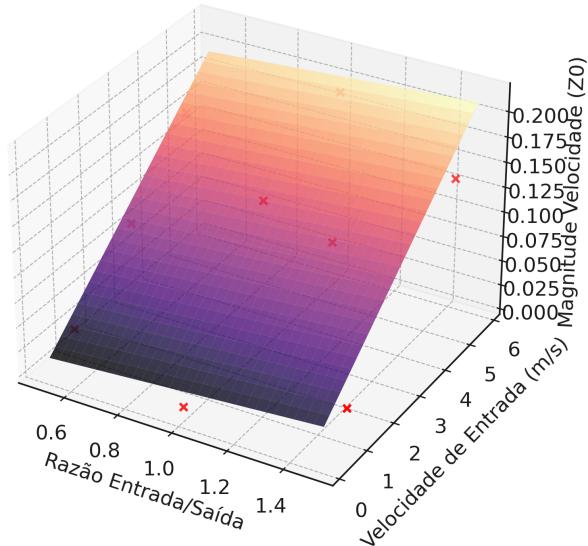
Para a magnitude da velocidade em Z0, o coeficiente de determinação obtido foi  $R^2 = 0.87$ , o que indica um bom ajuste dos dados ao modelo.

A análise dos coeficientes mostra que tanto a razão (0.0189) quanto a velocidade de entrada (0.0316) têm impacto positivo sobre a variável, mas a influência da velocidade de entrada é levemente superior. Isso pode estar relacionado à influência direta da inércia do fluxo sobre a direção Z0, enquanto a razão afeta a recirculação no domínio.

A superfície de resposta para essa variável, apresentada na Figura 21, confirma essa tendência, mostrando que a variação da velocidade é maior para aumentos na velocidade de entrada do que para variações na razão.

Figura 21 – Superfície de resposta da magnitude da velocidade em Z0.

Superfície de Resposta - Velocidade (Z0)



Fonte: Autor, 2025.

#### 5.3.4 Discussão Geral

Os resultados obtidos indicam que a influência da razão entre entrada e saída e da velocidade de entrada varia para cada plano analisado:

- A **razão entre entradas e saídas** tem maior impacto na velocidade em X1, indicando que o balanço de fluxos afeta diretamente a circulação vertical do fluido.
- A **velocidade de entrada** tem um efeito mais equilibrado sobre os planos X0 e Z0

Nesse sentido, para mitigar a problemática de zonas de estagnação em zonas mais ao fundo do reservatório (a níveis mais baixos) e mais próximas às paredes, necessita-se fazer alterações na razão e na velocidade; já para a problemática de zonas de estratificação, a sensibilidade mostrada pelo plano X1 evidencia a maior influência da razão nesse contexto.

Para otimizar a eficiência da mistura dentro do reservatório, é necessário maximizar a movimentação do fluido e minimizar regiões de estagnação e estratificação, para que se possa manter o nível de CRL constante.

## 6 CONCLUSÃO

Os resultados obtidos neste estudo demonstraram que a razão entre os diâmetros de entrada e saída, aliada à velocidade de entrada, exerce influência significativa na distribuição das velocidades e na eficiência da mistura dentro do reservatório. A análise do número de Reynolds indicou que o escoamento transita entre regimes de transição e altamente turbulento ( $20.000 < Re < 2.915.000$ ), dependendo das condições de entrada. Configurações com maior razão entre entradas e saídas (C3 e C4) apresentaram velocidades de saída mais elevadas, favorecendo um escoamento mais uniforme e minimizando zonas de recirculação. Em contrapartida, configurações com menor razão (C0 e C2) resultaram em velocidades de saída reduzidas, o que pode promover a estratificação térmica devido à menor taxa de mistura.

A análise qualitativa dos contornos de velocidade revelou que, em velocidades mais baixas (0,1 m/s e 0,33 m/s), o fluxo manteve-se relativamente homogêneo, com gradientes de velocidade pouco perceptíveis. No entanto, à medida que a velocidade aumentava (5 m/s e 5,83 m/s), padrões de recirculação começaram a emergir, especialmente nas configurações C3 e C4, sugerindo maior complexidade do escoamento e intensificação da turbulência. Além disso, verificou-se que as configurações C0 e C2 apresentaram melhor convergência numérica, indicando que essas geometrias possibilitam um estado de equilíbrio mais estável no regime estacionário, enquanto C3 e C4 resultaram em maior variabilidade na distribuição das velocidades, o que pode ser um indicativo de padrões de escoamento mais dinâmicos no regime transiente.

A análise estatística dos planos revelou que a razão entre entradas e saídas tem maior impacto na velocidade em X1, evidenciando sua influência na circulação vertical do fluido, enquanto a velocidade de entrada teve um efeito mais equilibrado nos planos X0 e Z0. Esse comportamento reforça a necessidade de ajustes na razão e na velocidade para mitigar zonas de estagnação e estratificação em regiões mais profundas do reservatório e próximas às paredes. Além disso, verificou-se que velocidades excessivamente altas podem ocasionar curtos-circuitos hidráulicos, reduzindo a eficiência da renovação do fluido.

Dessa forma, os resultados deste estudo contribuem para o entendimento da influência dos parâmetros geométricos e operacionais no comportamento do escoamento dentro de reservatórios, demonstrando que a otimização desses fatores pode maximizar a eficiência da mistura e minimizar efeitos indesejáveis, como estratificação e zonas de estagnação. A aplicação da fluidodinâmica computacional (CFD) mostrou-se uma ferramenta poderosa para essa análise, permitindo ajustes estratégicos na configuração do sistema.

## 7 CONSIDERAÇÕES FINAIS E TRABALHOS FUTUROS

Os resultados obtidos neste estudo forneceram uma base sólida para a compreensão do comportamento do escoamento em reservatórios, particularmente no que se refere à formação de zonas de estagnação e estratificação. No entanto, para uma avaliação mais completa da problemática associada ao decaimento de cloro residual, conforme discutido na literatura, faz-se necessário o aprofundamento da análise em estudos futuros. A incorporação de novos aspectos ao modelo numérico poderia proporcionar uma visão mais abrangente dos fenômenos físicos envolvidos e auxiliar na formulação de diretrizes mais robustas para o projeto e a operação desses sistemas.

Dentre as propostas para estudos futuros, destaca-se a inclusão de deflectores ou chicanas no interior do reservatório, com o objetivo de minimizar regiões de estagnação e promover uma melhor mistura do fluido. A investigação da dinâmica transiente do escoamento também se mostra essencial, uma vez que a variabilidade das condições operacionais ao longo do tempo pode impactar significativamente a distribuição de velocidades e, consequentemente, o transporte e decaimento do cloro residual.

Outra abordagem relevante seria a análise do efeito da posição das entradas e saídas, explorando configurações alternativas que possam favorecer a homogeneização do escoamento e minimizar zonas de baixa circulação. A influência do número de entradas e saídas no comportamento hidráulico do reservatório também merece ser investigada, considerando a possibilidade de otimização das condições operacionais por meio da redistribuição dos pontos de entrada e saída do fluido.

Além disso, estudos futuros poderiam incluir a avaliação da suspensão de sólidos provenientes de entradas indevidas ou irregulares levando à geração de biofilmes e do subsequente consumo da componente desinfetante. Por fim, a avaliação de diferentes formatos geométricos de reservatórios poderia fornecer subsídios para o desenvolvimento de geometrias otimizadas, capazes de reduzir a formação de zonas mortas e melhorar a eficiência hidráulica do sistema.

Dessa forma, a continuidade dessa linha de pesquisa permitirá o aprofundamento do conhecimento sobre a dinâmica do escoamento em reservatórios, contribuindo para a melhoria dos projetos e da operação desses sistemas e para a garantia da qualidade da água distribuída à população, sendo imprescindível para abranger os Objetivos de Desenvolvimento Sustentáveis estabelecidos.

## REFERÊNCIAS

- AKUFFO, I.; ALHASSAN, E.; COBBINA, S.; NKOOM, M. Assessment of the quality of water before and after storage in the nyankpala community of the tolon-kumbungu district, ghana. **International Journal of Scientific Technology Research**, v. 2, p. 221–227, fev. 2013.
- ANDERSON, J. D. **Computational Fluid Dynamics: The Basics with Applications**. New York: McGraw-Hill, 1995. ISBN 9780070016859.
- ANSYS, Inc. **ANSYS Fluent: Fluid Simulation Software**. Canonsburg, PA, 2017. Acesso em: 14 ago. 2024. Disponível em: <<https://www.ansys.com/products/fluids/ansys-fluent>>.
- ANSYS Inc. **ANSYS Fluent Theory Guide**. Release 18.2. [S.l.: s.n.], 2024.
- BEZERRA, M. A.; SANTELLI, R.; OLIVEIRA, E.; VILLAR, L.; ESCALEIRA, L. Response surface methodology (rsm) as a tool for optimization in analytical chemistry. **Talanta**, v. 76, n. 5, p. 965–977, 2008.
- BOX, G. E.; HUNTER, J. S.; HUNTER, W. G. **Statistics for Experimenters: An Introduction to Design, Data Analysis, and Model Building**. New York, NY: John Wiley & Sons, 1978. ISBN 978-0-471-09315-7.
- BOX, G. E. P.; HUNTER, J. S.; HUNTER, W. G. **Statistics for Experimenters: Design, Innovation, and Discovery**. 2nd. ed. [S.l.]: Wiley, 2005.
- BRASIL, I. T. **Ranking do Saneamento de 2024**. 2024. Disponível em: <<https://tratabrasil.org.br/wp-content/uploads/2024/04/Release-Ranking-do-Saneamento-de-2024-TRATA-BRASIL-GO-ASSOCIADOS-V2.pdf>>.
- BÁSICO, A. N. de Águas e S. **Panorama do Saneamento no Brasil**. 2024. Disponível em: <<https://www.gov.br/ana/pt-br/assuntos/saneamento-basico/saneamento-basico-no-brasil/panorama-do-saneamento-no-brasil-1>>.
- COLTRE, H.; JANZEN, J. Efeito da entrada e da razão profundidade/diâmetro na qualidade da água em reservatórios de sistemas de água. **Revista AIDIS de Ingeniería y Ciencias Ambientales. Investigación, desarrollo y práctica**, v. 12, p. 328, ago. 2019.
- FERREIRA, D. M.; CUNHA, C. Simulação numérica do comportamento térmico do reservatório do rio verde. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 18, n. 1, p. 191–203, 2013. Acesso em: 22 ago. 2024.
- FERZIGER, J. H.; PERIĆ, M. **Computational Methods for Fluid Dynamics**. 3. ed. Berlin, Germany: Springer, 2002. ISBN 9783540420743.
- FOX, R. W.; MCDONALD, A. T.; PRITCHARD, P. J. **Introdução à Mecânica dos Fluidos**. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2015. ISBN 9788521624725.
- FRANK, S. et al. Computational fluid dynamics modeling of turbulent flow in water reservoirs. **Journal of Hydraulic Engineering**, 2018.
- HELLER, L.; PÁDUA, V. **Abastecimento de água para consumo humano**. 1. ed. Belo Horizonte: UFMG, 2010.
- HELWEG, O. J. **Water quality and treatment: a handbook of community water supplies**. 5. ed. New York: McGraw-Hill, 1999.

- KNUPP, P. Algebraic mesh quality metrics. **SIAM Journal on Scientific Computing**, SIAM, v. 23, n. 1, p. 193–218, 2001.
- MENTER, F. R. Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications. **AIAA Journal**, v. 32, n. 8, p. 1598–1605, 1994.
- MILARÉ, M. M. **Estudo da influência da camada limite hidrodinâmica no desempenho de um tanque vertical de termoacumulação de água gelada durante o ciclo de descarga**. Dissertação (Mestrado) — Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil, 2008. Disponível em: <<https://doi.org/10.11606/D.3.2008.tde-19052009-115422>>.
- MOIN, P.; MAHESH, K. Direct numerical simulation: A tool in turbulence research. **Annual Review of Fluid Mechanics**, Annual Reviews, v. 30, n. 1, p. 539–578, 1998.
- MONTGOMERY, D. C. **Design and Analysis of Experiments**. 10th. ed. [S.l.]: Wiley, 2019.
- MYERS, R. H.; MONTGOMERY, D. C.; ANDERSON-COOK, C. M. **Response Surface Methodology: Process and Product Optimization Using Designed Experiments**. 4th. ed. [S.l.]: Wiley, 2016.
- PATIL, P. et al. Numerical assessment of velocity fields in water storage systems with varying outlet configurations. **Journal of Fluids Engineering**, 2019.
- PIZARRO, R. G. N. P. **A mistura de reservatórios de sistemas de distribuição de água**. Dissertação (Dissertação de mestrado) — Universidade do Porto, Faculdade de Engenharia, Departamento de Engenharia Civil, 2011.
- POPE, S. B. **Turbulent Flows**. Cambridge: Cambridge University Press, 2000. ISBN 978-0-521-59886-6.
- SILVA, G. A. B.; MEIRA, C. M. B. S.; SANTANA, C. F. D.; COURA, M. A.; OLIVEIRA, R.; NASCIMENTO, R. S.; SANTOS, W. B. Simulação do decaimento de cloro residual livre em reservatórios de distribuição de água. **Revista DAE**, v. 67, n. 218, 2019.
- SILVA, T. O.; GOBBI, M. F. Aplicação de um modelo de estratificação térmica em corpos d’água. In: **XII Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste**. [S.l.: s.n.], 2014.
- SMITH, R.; TAYLOR, J. Effects of inlet-outlet ratio on mixing efficiency in large water storage tanks. **Water Research**, 2021.
- SOUZA, P. H. D.; LIMA, M. R. Otimização de processos químicos utilizando planejamento composto central. **Revista Brasileira de Engenharia Química**, v. 34, n. 2, p. 123–134, 2018.
- WALSKI, T.; HAESTAD, M.; CHASE, D.; SAVIC, D.; GRAYMAN, W.; BACKWITH, S.; KOELLE, E. **Advanced Water Distribution Modeling and Management**. 1. ed. Waterbury, CT: Haestad Press, 2004.
- WILCOX, D. C. Formulation of the k-omega turbulence model revisited. **AIAA Journal**, v. 46, n. 11, p. 2823–2838, 2008.
- XAVIER, M. L. M.; JANZEN, J. G. Effects of inlet momentum and orientation on the hydraulic performance of water storage tanks. **Applied Water Science**, v. 7, p. 2545–2557, 2017.
- ZHANG, L. et al. Transient cfd modeling of water reservoirs: Implications for real-time flow prediction. **Journal of Environmental Fluid Mechanics**, 2020.

ÇENGEL, Y. A.; CIMBALA, J. M. **Mecânica dos fluidos: fundamentos e aplicações**. 4. ed. Porto Alegre: AMGH, 2017.