

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CENTRO TECNOLÓGICO DE JOINVILLE  
CURSO DE ENGENHARIA NAVAL

RAYZA YASMIN DE OLIVEIRA VICENTE

CONSTRUÇÃO DE UM MODELO NUMÉRICO DE SIMULAÇÃO PARA ESTUDO  
PRELIMINAR DE UM CANAL DE ÁGUA CIRCULANTE EM BAIXOS NÚMEROS DE  
REYNOLDS

Joinville  
2021

RAYZA YASMIN DE OLIVEIRA VICENTE

CONSTRUÇÃO DE UM MODELO NUMÉRICO DE SIMULAÇÃO PARA ESTUDO  
PRELIMINAR DE UM CANAL DE ÁGUA CIRCULANTE EM BAIXOS NÚMEROS DE  
REYNOLDS

Trabalho apresentado como requisito para  
obtenção do título de bacharel em Engenharia  
Naval do Centro Tecnológico de Joinville da  
Universidade Federal de Santa Catarina.

Orientador: Dr. André Luís Condino Fugarra

Joinville  
2021

RAYZA YASMIN DE OLIVEIRA VICENTE

CONSTRUÇÃO DE UM MODELO NUMÉRICO DE SIMULAÇÃO PARA ESTUDO  
PRELIMINAR DE UM CANAL DE ÁGUA CIRCULANTE EM BAIXOS NÚMEROS DE  
REYNOLDS

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do título de bacharel em Engenharia Naval, na Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico de Joinville.

Joinville (SC), 05 de Maio de 2021.

**Banca Examinadora:**

---

Orientador: Dr. André Luís Condino Fugarra  
Orientador  
Presidente

---

Prof. Dr. Ernane Silva  
Membro  
Universidade Federal de Santa Catarina

---

Prof. Dr. Thiago Antonio Fiorentin  
Membro  
Universidade Federal de Santa Catarina

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus, por ter me guiado nessa jornada com amor e cumprido suas promessas na minha vida.

Ao meu marido, Fredi Cenci, por ter sido meu companheiro, meu professor sempre que precisei e por ter acreditado em mim.

À minha família, por todos os tipos de suporte e cuidados. Essa conquista é nossa.

Ao meu orientador, Prof. Dr. André Luís Condino Fajarra, por ter me orientado em pesquisas e projetos desde o meu terceiro semestre, mas especialmente pela atenção com este trabalho.

Ao CNPq, pela concessão da bolsa de Iniciação Científica atrelada ao projeto de pesquisa N<sup>o</sup> 437114/2018-0, Chamada MCTIC/CNPq N<sup>o</sup> 28/2018.

Aos meus amigos Paulo e Aline, pelo auxílio com as malhas e dicas de CFD. Às minhas amigas e colegas de laboratório Letícia, Monique, Kamila, Iara, Amanda e Giovana pelas boas risadas e companhia.

## RESUMO

Canais de recirculação de água de baixo Reynolds são aparelhos importantes para estudos em Mecânica dos Fluidos e Hidrodinâmica, pois são capazes de proporcionar a realização de diversos experimentos. Em razão da complexidade de sua estrutura, seu custo é elevado. Por isso, muitas universidades optam pela construção de um canal de baixo custo, o qual possui dimensões menores e também menos elementos constituintes. Um instrumento presente nesse canal é o modificador de fluxo, o qual é utilizado para uniformizar os perfis de velocidades do escoamento e reduzir a intensidade de turbulência gerada devido ao jato de entrada. Assim sendo, este trabalho tem como objetivo encontrar uma combinação de geometria e localização de inserção que permita a esse instrumento exercer sua função com a máxima eficiência possível. Neste trabalho, testou-se a viabilidade da adição de um modificador de fluxo em formato de placa perfurada, em comparação com o canal na sua forma mais simples. Para isso, construiu-se um modelo para análises preliminares em Fluidodinâmica Computacional com auxílio do *software* ANSYS Fluent, nas quais variavam-se a geometria e a localização longitudinal dessa placa. Para avaliação, as características escolhidas foram intensidade de turbulência e velocidade axial do escoamento. Os casos foram então avaliados e comparados. Conclui-se que a configuração com a maior quantidade de furos de pequeno diâmetro mostrou-se mais adequada, bem como a inserção da placa em uma localização mais afastada da entrada do fluido. Portanto, a combinação de mais furos e maior distância foi a que demonstrou melhores resultados e atingiu os objetivos.

**Palavras-chave:** Canal de recirculação de água. Ansys Fluent. Modificadores de fluxo. CFD. Intensidade de turbulência.

## ABSTRACT

Low Reynolds water recirculation channels are important devices for studies in Fluid Mechanics and Hydrodynamics, as they are capable of providing the realization of several experiments. Due to the complexity of its structure, its cost is high. For this reason, many universities choose to build a low-cost channel, which has smaller dimensions and also less constituent elements. An instrument present in this channel is the flow modifier, which is used to standardize the flow velocity profiles and to reduce the intensity of turbulence generated due to the incoming jet. Therefore, this work aims to find a combination of geometry and insertion location that allows this instrument to perform its function as efficiently as possible. In this work, we tested the feasibility of adding a flow modifier in the shape of a perforated plate, compared to the channel in its simplest form. For this, a model for preliminary analyzes in Computational Fluid Dynamics was built with the help of textit software ANSYS Fluent, in which the geometry and longitudinal location of this plate were varied. For evaluation, the characteristics chosen were turbulence intensity and axial flow velocity. The cases were then evaluated and compared. It was concluded that the configuration with the largest number of small diameter holes proved to be more adequate, as well as the insertion of the plate in a location further away from the fluid inlet. Therefore, the combination of more holes and greater distance was the one that demonstrated the best results and achieved the objectives.

**Keywords:** Water recirculation channel. Ansys Fluent. Flow modifiers. CFD. Turbulence intensity.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Linhas de emissão em escoamentos laminar, de transição e turbulento no interior de um tubo . . . . .	13
Figura 2 – Flutuações na velocidade . . . . .	14
Figura 3 – CWC de baixo custo . . . . .	16
Figura 4 – CWC completo típico . . . . .	16
Figura 5 – Honeycomb como endireitador de fluxo . . . . .	17
Figura 6 – Fluxograma das simulações. . . . .	24
Figura 7 – Geometrias da Placa Perfurada . . . . .	26
Figura 8 – Posições longitudinais da placa perfurada. . . . .	26
Figura 9 – Condições de Contorno. . . . .	27
Figura 10 – Malha gerada para a simulação 3 . . . . .	29
Figura 11 – Malha gerada para a placa da simulação 3 . . . . .	29
Figura 12 – Malha aproximada da placa da simulação 3 . . . . .	30
Figura 13 – Linhas de referência . . . . .	33
Figura 14 – Análise de convergência - Linha vermelha . . . . .	34
Figura 15 – Análise de convergência - Linha preta . . . . .	35
Figura 16 – Resíduos da malha $M_2$ . . . . .	36
Figura 17 – Grupo 0 - Velocidade axial . . . . .	37
Figura 18 – Grupo 1 - Velocidade no plano horizontal . . . . .	38
Figura 19 – Grupo 1 - Velocidade no plano vertical . . . . .	39
Figura 20 – Grupo 2 - Velocidade no plano horizontal . . . . .	41
Figura 21 – Grupo 2 - Velocidade no plano vertical . . . . .	42
Figura 22 – Vista do modelo experimental e dos planos de análise . . . . .	44
Figura 23 – Comparação no Plano 2 - Perfil de Velocidade . . . . .	44
Figura 24 – Comparação no Plano 1 - Perfil de Velocidade . . . . .	45
Figura 25 – Comparação: Intensidade de turbulência . . . . .	47
Figura 26 – Conjunto selecionado: Geometria A e Localização B . . . . .	48
Figura 27 – Comparação dos casos 0 e 3: Perfil de velocidade . . . . .	49
Figura 28 – Comparação dos casos 0 e 3: Intensidade de turbulência . . . . .	49

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Parâmetros de entrada . . . . .	28
Tabela 2 – Matriz das simulações realizadas. . . . .	31
Tabela 3 – Malhas simulados para o Caso 0 . . . . .	32

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\rho$	Densidade do fluido
$D$	Diâmetro do modelo
$k$	Energia cinética turbulenta
$u'$	Flutuação da velocidade na direção x
$v'$	Flutuação da velocidade na direção y
$w'$	Flutuação da velocidade na direção z
$T$	Intensidade de turbulência
$Re$	Número de Reynolds
$P$	Pressão
$RP$	Razão de permeabilidade
$\omega$	Taxa de dissipação específica
$V_A$	Velocidade adimensional
$V$	Velocidade em análise
$U_i$	Velocidade de entrada
$U_\infty$	Velocidade do escoamento
$\nu$	Viscosidade cinemática do fluido
$\mu$	Viscosidade do fluido
$\mu_t$	Viscosidade turbulenta do fluido

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>10</b>
1.1	Objetivo Geral	11
1.2	Objetivos Específicos	11
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b>	<b>12</b>
2.1	Mecânica dos Fluidos aplicada a canais de recirculação	12
<b>2.1.1</b>	<b>Coeficientes adimensionais e regimes de escoamento</b>	<b>12</b>
<b>2.1.2</b>	<b>Turbulência</b>	<b>13</b>
2.1.2.1	Intensidade de turbulência	14
2.1.2.2	Razão de viscosidade turbulenta	15
<b>2.1.3</b>	<b>Canais de recirculação</b>	<b>15</b>
2.1.3.1	Seção de teste	16
2.1.3.2	Redução da turbulência	17
2.2	DINÂMICA DOS FLUIDOS COMPUTACIONAL	18
<b>2.2.1</b>	<b>Parâmetros da malha</b>	<b>18</b>
<b>2.2.2</b>	<b>Modelagem da turbulência e o Método RANS</b>	<b>18</b>
<b>2.2.3</b>	<b>Equações governantes do método RANS</b>	<b>19</b>
<b>2.2.4</b>	<b>Modelos numéricos de turbulência do método RANS</b>	<b>20</b>
2.2.4.1	O Modelo $k - \omega$ SST	21
2.3	Estudos similares	21
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA</b>	<b>24</b>
3.1	Definição do problema	24
<b>3.1.1</b>	<b>Descrição do fluxo</b>	<b>25</b>
<b>3.1.2</b>	<b>Modelos de placa perfurada</b>	<b>25</b>
<b>3.1.3</b>	<b>Posições longitudinais para a placa perfurada</b>	<b>26</b>
<b>3.1.4</b>	<b>Definição da seção de teste</b>	<b>27</b>
3.2	Parâmetros e Condições de Contorno	27
3.3	Geração da malha	28
3.4	Métodos de análise dos resultados	30
3.5	Síntese das análises contempladas por este texto	31
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b>	<b>32</b>
4.1	Grupo 0 - Canal de Recirculação sem Placa Modificadora de Fluxo	32
4.2	Grupo 1 – Placas Modificadoras de Geometria A e B Posicionadas na Localização A	37

4.3	Grupo 2 – Placas Modificadoras de Geometria A e B Posicionadas na Localização B . . . . .	40
4.4	Comparações e observações finais . . . . .	43
<b>4.4.1</b>	<b>Perfil de velocidade</b> . . . . .	<b>43</b>
<b>4.4.2</b>	<b>Intensidade de turbulência</b> . . . . .	<b>46</b>
4.5	Seção de teste . . . . .	47
4.6	Seleção do conjunto geometria-posição da placa perfurada . . . . .	48
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES</b> . . . . .	<b>50</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b> . . . . .	<b>52</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A mecânica dos fluidos é definida como a ciência que trata do comportamento dos fluidos em repouso ou movimento, e da interação entre fluidos e sólidos ou outros fluidos nas fronteiras (CENGEL; CIMBALA, 2015). Sua história inicia-se com Arquimedes e as investigações pioneiras sobre empuxo. Desde então, teorias como essa foram amplamente postas à prova com auxílio de experimentos físicos. Em virtude do avanço científico, tornou-se possível e comum reproduzir tais testes em ambientes escolares e acadêmicos.

Nesse contexto, um aparelho intrínseco aos estudos dos fluidos e frequentemente utilizado nas aulas e laboratórios de Mecânica dos Fluidos e Hidrodinâmica dentro das universidades é o canal de recirculação de fluido de baixo Reynolds de baixo custo. Esse equipamento é um tanque que permite a recirculação de fluido por meio de dutos e bombas, e pode contar com utensílios modificadores de fluxo ou não. Neles, é possível realizar diversos experimentos hidrodinâmicos, como a observação da transformação de um escoamento laminar para o modo turbulento, ou o desprendimento de vórtices em modelos em escala de plataformas de petróleo submetidos a vibrações, entre outros. A validação e a verificação desses ensaios podem ser feitas por meio de simulações numéricas.

Entretanto, o processo reverso também é viável. A fim de verificar e otimizar as condições em que serão efetuados os experimentos, e dessa forma, proporcionar melhor aproveitamento do aparelho, pode-se, antes da construção do canal, realizar simulações numéricas. Nesse método, o equipamento é modelado computacionalmente e são feitas simulações visando encontrar a melhor configuração e disposição de seus elementos constituintes. Após avaliação dos resultados, pode-se então dar início à construção física.

Assim sendo, esse trabalho de conclusão de curso tem como principal objetivo encontrar a geometria e localização de inserção de um elemento modificador de fluxo para que esse seja capaz de minimizar a turbulência - gerada pelo jato de entrada do fluido no canal - e uniformizar o escoamento. Esse utensílio permite a passagem controlada do fluido e é posicionado à montante da região em que os experimentos serão estudados - chamada área ou seção de teste. Tendo em vista a complexidade desse objetivo, justifica-se o uso da ferramenta Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD) para entender o comportamento do fluido sem a necessidade de construção do canal de recirculação.

A primeira etapa deste trabalho é a fundamentação teórica baseada no entendimento do número de Reynolds ( $Re$ ), definição de turbulência e os modelos

numéricos de turbulência mais conhecidos, bem como a função e as aplicações dos canais de recirculação de água de baixo custo. Além disso, a abordagem CFD é explicada, indicando as questões pertinentes para a modelagem do problema e utilização do *software* de simulação numérica ANSYS.

Em seguida, inicia-se a segunda parte: a modelagem numérica 3D do canal no ANSYS. Primeiramente esse é modelado em sua forma simplificada, ou seja, apenas o tanque com orifícios de entrada e saída de água para servir de referência para as demais simulações. Então uma placa perfurada, na função de modificador de fluxo, é acrescentada variando-se a sua geometria e posição ao longo do canal.

Dessa maneira, é possível analisar a eficiência da existência dessa barreira no alcance do objetivo, avaliando-se os perfis de velocidade, bem como o índice de turbulência por meio de gráficos comparativos.

O estudo numérico tridimensional realizado neste trabalho é preliminar e tem caráter qualitativo devido aos recursos computacionais disponíveis. Ademais, é esperada certa dificuldade na geração da malha tridimensional em razão das dimensões do domínio computacional, do nível de refinamento suportado pela capacidade operacional do computador e da necessidade de atendimento a parâmetros de avaliação de qualidade dos elementos e da malha.

## 1.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral é encontrar o conjunto de modelo geométrico e posição longitudinal da placa perfurada que é capaz de reduzir ao máximo a turbulência gerada devido ao jato de entrada e uniformizar o perfil de velocidade axial do escoamento na seção de teste, a fim de que a seção de teste possua qualidade suficiente para a realização dos experimentos hidrodinâmicos, e esses possam apresentar resultados precisos.

## 1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

No desenvolvimento deste objetivo, propõem-se como objetivos específicos:

- a. Compreender a definição e aplicação de canais de fluido recirculante de baixo Reynolds;
- b. Modelar as malhas com os diferentes geometrias e localizações das placas a serem testadas;
- c. Verificar a interferência do conjunto geometria-posição da placa na uniformização dos perfis de velocidade do escoamento;
- d. Verificar a interferência do conjunto geometria-posição da placa na redução da turbulência causada pela entrada do fluido no canal.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Nesta seção são expostos os conceitos necessários para o entendimento dos próximos capítulos e para o desenvolvimento do trabalho. Essa fundamentação teórica divide-se em duas partes: uma explicação sobre os conhecimentos de mecânica dos fluidos, e outra sobre a abordagem CFD (Dinâmica dos Fluidos Computacional ou *Computational Fluid Dynamics*). A primeira introduz as teorias, variáveis adimensionais e equações mais importantes para canais de fluido recirculante. Em seguida são apresentadas a teoria e aplicação da teoria CFD.

### 2.1 MECÂNICA DOS FLUIDOS APLICADA A CANAIS DE RECIRCULAÇÃO

Esta seção abrange os conhecimentos de Mecânica dos Fluidos cruciais para a compreensão desse estudo. São esses: coeficientes adimensionais e tipos de escoamento, bem como as características mais comuns em canais de baixo Reynolds e análise e conceito de turbulência.

#### 2.1.1 Coeficientes adimensionais e regimes de escoamento

O número de Reynolds é o parâmetro adimensional mais conhecido na mecânica dos fluidos. Ele é definido pela Equação 1, em que  $V$  é a velocidade do escoamento,  $\nu$  é a viscosidade cinemática do fluido e  $D$  é o comprimento característico do escoamento. Esse adimensional relaciona as forças inerciais com as forças viscosas do fluido.

$$Re = \frac{VD}{\nu} \quad (1)$$

O número de Reynolds é o parâmetro chave para identificar o regime de um escoamento: laminar, turbulento ou em transição. De acordo com Batchelor (2000), o regime laminar caracteriza-se por um movimento ordenado das camadas de fluido, comum para alta viscosidade e baixa velocidade, enquanto o turbulento retrata um movimento altamente desordenado, com mudanças caóticas que geram flutuações de velocidade e pressão, as quais normalmente são elevadas. Já a transição ocorre em uma região do fluxo que se encontram características mistas até esse se tornar completamente turbulento. A Figura 1 apresenta esses três regimes, em que o primeiro é representado por 1a, de transição por 1b e, finalmente, turbulento por 1c.

Há também outras classificações importantes para o regime de um escoamento, como permanente, transiente, completamente desenvolvido ou não. Conforme Cengel e Cimbala (2015), o primeiro termo significa que o escoamento não sofre alteração com

Figura 1 – Linhas de emissão em escoamentos laminar, de transição e turbulento no interior de um tubo



Fonte: ANSYS Inc (2013).

o passar do tempo. O segundo é oposto ao primeiro. Já a condição de desenvolvimento completo dá-se quando a forma do perfil de velocidade não mais varia na direção do escoamento (FOX; PRITCHARD; MCDONALD, 2006). Outro conceito importante é a uniformidade. O adjetivo uniforme implica que o fluido possui as mesmas características ao longo de uma seção transversal.

### 2.1.2 Turbulência

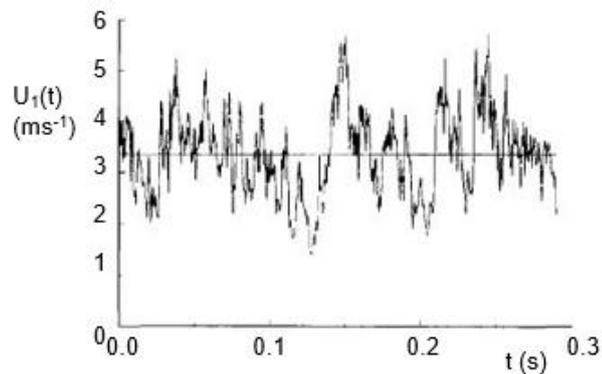
Esta seção introduz o conceito de turbulência e suas principais características fundamentais para a realização desse trabalho, como índice de turbulência, razão de turbulência viscosa, energia cinética turbulenta.

A turbulência é comumente observada em fenômenos cotidianos, como ondas, rios de fluxo rápido ou fumaça de uma chaminé, e a maioria dos fluxos de fluidos que ocorrem na natureza são turbulentos. O "Glossary of Oceanographic Terms" (Baker et al, 1966 apud Schwind, 1980) descreve o escoamento turbulento da seguinte forma: "É um estado de escoamento do fluido no qual as velocidades instantâneas exibem flutuações irregulares e aparentemente aleatórias".

A essência da turbulência, portanto, é a variação e irregularidade do campo de velocidade tanto para posição quanto para tempo. A fim de ilustrar essa afirmação, a Figura 2 mostra um histórico da componente axial da velocidade  $U_1(t)$ , medido na linha de centro de um jato turbulento. A linha horizontal representa a velocidade média. Aqui, é possível observar as flutuações da velocidade ao longo do tempo, característica marcante desse tipo de escoamento e que pode ser resultante de inúmeros fatores.

De acordo com Souza José Francisco Almeida de Oliveira (2011), o escoamento

Figura 2 – Flutuações na velocidade



Fonte: Pope et al. (2000).

instantâneo ( $\tilde{x}$ ) pode ser desdobrado em uma componente média (de grande escala,  $\bar{x}$ ) e outra flutuante (de pequena escala,  $x'$ ) pela separação das variáveis como na Equação 2.

$$\tilde{x} = \bar{x} + x' \quad (2)$$

Estas flutuações constituem as principais deformações do escoamento e são capazes de transportar *momentum*, energia e outras propriedades a taxas muito maiores que aquelas da difusão molecular nos escoamentos laminares (SCHWIND, 1980).

Entretanto, conforme Batchelor (2000), a existência de perturbações não explica a natureza do escoamento turbulento, uma vez que essas também são comuns em fluxos laminares; há diferença, contudo, quanto à sensibilidade das condições iniciais e de contorno e propriedades do material mediante a presença dessas perturbações.

### 2.1.2.1 Intensidade de turbulência

O parâmetro utilizado para conhecer o comportamento médio turbulento do escoamento é chamado Intensidade de Turbulência e definido pela Equação 3, em que  $U_\infty$  é a velocidade média do escoamento,  $\bar{u}'$ ,  $\bar{v}'$  e  $\bar{w}'$  são as flutuações médias das velocidades em x, y e z respectivamente.

$$T = \frac{\sqrt{\frac{1}{3}(\overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2})}}{U_\infty} \quad (3)$$

De acordo com Manual do ANSYS (2013), a intensidade de turbulência é geralmente considerada baixa quando possui valor igual a 1% ou menos, e altas quando maiores que 10%. Ademais, em túneis de vento modernos de baixa turbulência, a intensidade da turbulência de fluxo livre pode ser tão baixa quanto 0,05%.

### 2.1.2.2 Razão de viscosidade turbulenta

Conforme consta no manual técnico do ANSYS Inc (2013), a razão da viscosidade turbulenta,  $\frac{\mu_t}{\mu}$ , é diretamente proporcional ao número de Reynolds turbulento ( $Re_t \equiv k^2/(\varepsilon\nu)$ ).  $Re_t$  está na ordem de 100 a 1000 em camadas limite de alto número de Reynolds, camadas de cisalhamento e fluxos de dutos totalmente desenvolvidos. No entanto, nos limites do fluxo livre da maioria dos fluxos externos,  $\mu_t/\mu$  é pequeno. Normalmente, os parâmetros de turbulência são definidos de forma que  $1 < \mu_t/\mu < 10$ .

Esse parâmetro é calculado por meio da Equação 4, na qual  $\mu_t$  é a viscosidade turbulenta,  $\mu$  a viscosidade do fluido e  $\omega$  é a taxa de dissipação específica.

$$\frac{\mu_t}{\mu} = \rho \frac{k}{\mu \omega} \quad (4)$$

### 2.1.3 Canais de recirculação

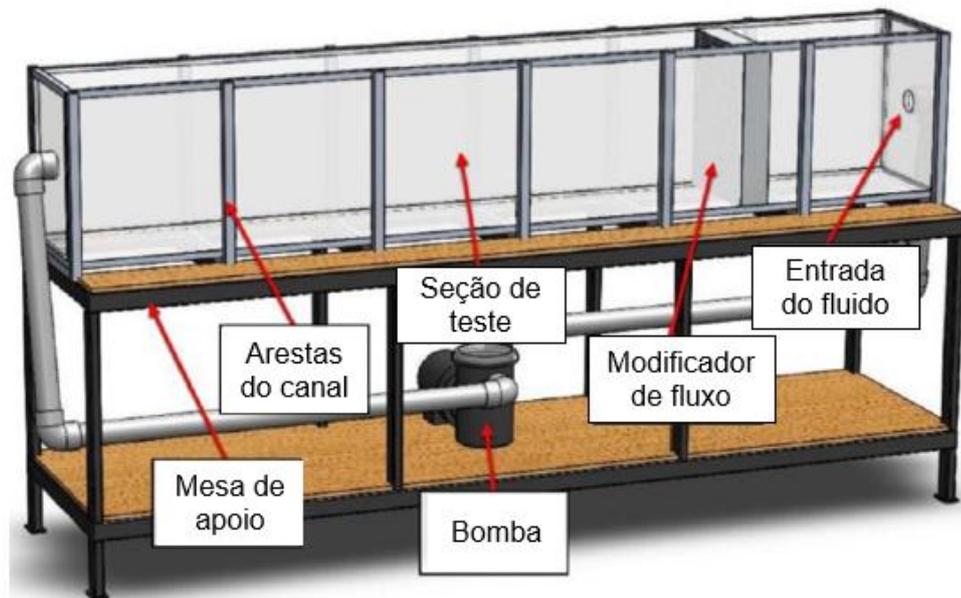
Canal de recirculação de água, ou canal de água recirculante, ou ainda *Circulating Water Channel (CWC)*, é um tanque retangular no qual um determinado fluido (geralmente água ou glicerina) circula com uma velocidade pré determinada simulando as correntes marítimas. A recirculação de fluido é possível por meio de um dispositivo constituído por bombas e dutos, que imprimem velocidade no fluído e fecham o circuito de maneira a não permitir escape de conteúdo. Essa configuração é chamada de circuito fechado.

Há algumas vantagens em se utilizar esse tipo de canal, como a maior facilidade para manter a homogeneidade da seção de teste, a menor produção de ruído e a exigência de menos energia quando se comparado a canais de circuito aberto (BRUSCA; LANZAFAME; MESSINA, 2011). Nesses, o fluxo entra por uma extremidade de um único duto e é lançado ao meio externo pela outra, levando assim ao desperdício de fluido.

Entretanto, uma das principais desvantagens ao se utilizar canal de circuito fechado é o alto custo de construção devido à complexidade da estrutura e grande quantidade de elementos componentes. Por essa razão, muitas universidades buscam opções como a sugerida por Rutledge e French (2018): um canal de baixo custo apresentado na Figura 3. Dessa forma, é indicado especialmente para abrigar experimentos com baixo número de Reynolds. Segundo os autores, no ano de 2017, o custo de compra desse modelo representava apenas 10% do custo de um CWC completo típico como o exemplar da Figura 4.

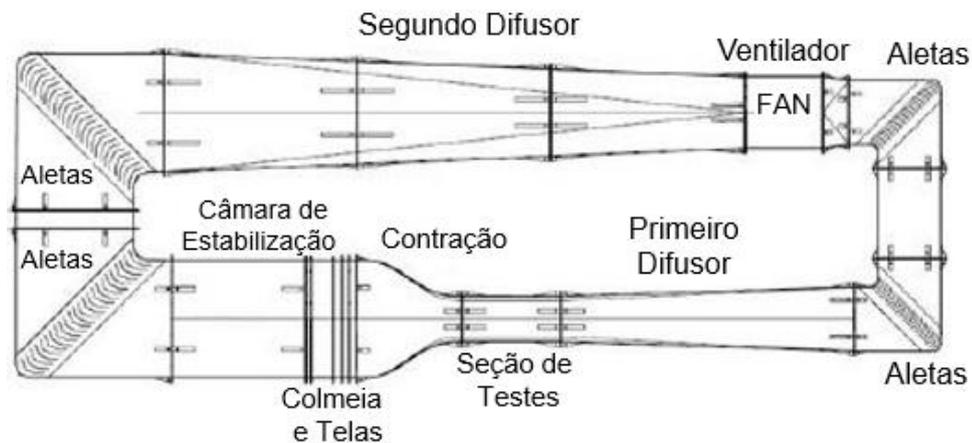
Canais de recirculação de água possuem configuração semelhante a de túneis de vento e, conforme cita Suarez et al. (1994), muitos estudos como os de Thompson (1975), Deane (1979), Erickson et al. (1986) mostram que os campos de fluxo e as forças hidrodinâmicas em túneis de água são equivalentes ao campos de fluxo

Figura 3 – CWC de baixo custo



Fonte: Traduzida de Rutledge e French (2018).

Figura 4 – CWC completo típico



Fonte: Brusca, Lanzafame e Messina (2011 apud BUSNARDO, 2015)

aerodinâmico e forças para modelos em túneis de vento para o regime de fluxo incompressível, nos quais os números de Mach são menores que 0,3. Dessa maneira, a aplicação de conhecimentos sobre túneis de vento é válida em canais recirculantes.

#### 2.1.3.1 Seção de teste

A seção de testes é a região mais importante de um canal circulante e pode ser descrita como a região em que os testes experimentais ocorrem. Se bem projetada, deve apresentar sempre as mesmas características nos campos de pressão e velocidade ao longo do tempo e de sua extensão, de forma a gerar uma condição adequada para os ensaios (ASSI, 2005).

Conforme BUSNARDO (2015), o escoamento nesta região deve ser uniforme e permanente, significando assim que, em um determinado local, a velocidade média não deve apresentar mudanças com o tempo ou local. É nesse trecho que o modelo experimental será posicionado e algumas características do escoamento serão estudadas, como perfil de velocidades, índice de turbulência, pressão, temperatura, entre outros, bem como a interação fluido-estrutura.

A fim de facilitar a visualização do escoamento e a instalação dos equipamentos de instrumentação, as paredes dessa seção são comumente construídas em material transparente como vidro ou acrílico. Além disso, o tamanho da seção de teste depende de elementos como complexidade do projeto e potência do sistema propulsor de fluido para manter as condições desejadas.

### 2.1.3.2 Redução da turbulência

Conforme comentário anterior, os canais de água podem ser comparados a túneis de vento sem prejuízo. Nesse sentido, visando garantir a uniformidade do escoamento e o menor índice de turbulência possível na seção de teste, pode-se utilizar elementos endireitadores de fluxo, como telas, *honeycombs* e placas perfuradas ou porosas. A Figura 5 apresenta um modelo de *honeycomb*.

Figura 5 – Honeycomb como endireitador de fluxo



Fonte: Almeida et al. (2018).

Scheiman (1981) afirma que, embora alterações ou distúrbios no fluxo devido à turbulência em túneis comuns (sem acessórios) sejam relativamente baixos, uma modificação é válida para reduzir a turbulência da seção de teste a níveis ainda mais baixos e/ou obter mais controle sobre o número de Reynolds da seção.

Para obter esse efeito, os manipuladores são geralmente instalados na parte à jusante dos últimos grandes geradores de turbulência (como a entrada do fluido) e à frente da seção de teste. Além disso, vale ressaltar que a introdução desses utensílios na corrente de fluxo aumenta a potência necessária da bomba devido à

resistência adicional do escoamento (queda de pressão) ao mover o fluido através dos manipuladores (SCHEIMAN, 1981). Inclusive, para gerar uma desejada queda de pressão total, pode, ainda, ser vantajoso usar várias telas em sequência ao longo da região antecedente à seção de teste (DRYDENH; SCHUBAUEGR., 1947 apud GROTH; JOHANSSON, 1988).

## 2.2 DINÂMICA DOS FLUIDOS COMPUTACIONAL

Segundo Versteeg e Malalasekera (2007), a Dinâmica dos Fluidos Computacional é uma análise de sistemas que podem envolver transferência de calor, escoamento de fluido e fenômenos associados. É uma técnica amplamente utilizada nas áreas industrial e acadêmica, devido à oferta de redução de custos com experimentos e detalhamento do problema.

### 2.2.1 Parâmetros da malha

A ferramenta CFD exige a geração de uma malha, que é definida como a discretização do domínio computacional para determinar as células nas quais as variáveis do escoamento serão calculadas. Antes de se realizar a simulação, deve-se analisar alguns parâmetros que medem a viabilidade do tipo de malha a ser utilizada, a fim de garantir a confiabilidade dos resultados.

O primeiro passo é verificar se uma malha é estruturada ou não, ou até mesmo híbrida, quando apresentar ambas as formas. De acordo com Cengel e Cimbala (2015), a estruturada tridimensional consiste em células volumétricas com seis faces. Essas devem seguir uma estrutura fixa, de maneira que a numeração de um volume seja consecutiva a de seu vizinho, e sua localização seja facilmente encontrada quando seus vizinhos são conhecidos. Já a malha não estruturada não possui restrição quanto ao formato de célula ou à numeração de células adjacentes.

A qualidade de cada elemento, e também da malha como um todo, é fator crítico para a confiabilidade da simulação. É preferível que os elementos sejam simétricos, evitando quaisquer inclinações e distorções de sua forma, e que a razão de aspecto seja pequena, ou seja, que não haja variação brusca no tamanho das células. Isso é necessário para que não haja instabilidade na convergência e imprecisão numérica.

### 2.2.2 Modelagem da turbulência e o Método RANS

Ao se tratar de escoamentos turbulentos por meio de CFD, é necessário utilizar uma técnica para atingir a solução computacional. As principais são DNS (Simulação Numérica Direta), LES (Simulação em Grandes Escalas) e RANS (Reynolds Average Navier-Stokes). De acordo com Cengel e Cimbala (2015), a técnica DNS é a mais sofisticada em termos de detalhamento e necessita de malhas muito finas e

computadores potentes, pois consome muito tempo computacional. Já a técnica LES se utiliza de aproximações e hipóteses, o que a faz exigir menos recursos computacionais que a DNS, porém ainda precisa de recursos altos. Há, ainda, a RANS, que é a menos detalhada dentre as três por empregar modelos de turbulência para solucionar o escoamento. Essa consideração baseia-se em modelos matemáticos que consideram a combinação e difusão dos vórtices turbulentos (CENGEL; CIMBALA, 2015).

Nas subseções seguintes, em razão de ser adotado na realização deste trabalho, o método RANS será explicado mais profundamente por meio da apresentação de suas equações governantes e modelos de turbulência.

### 2.2.3 Equações governantes do método RANS

Para descrever o movimento fluido, Cengel e Cimbala (2015) afirmam serem necessárias algumas equações matemáticas como a Equação da Continuidade e a de Navier-Stokes. Para escoamento incompressível, em regime permanente e newtoniano, essas são apresentadas pelas Equações 5 e 6, respectivamente, em que  $\vec{U}$  é a velocidade do fluido,  $\rho$  é a densidade,  $P$  é a pressão e  $\nu$  é a viscosidade cinemática do fluido.

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{U} = 0 \quad (5)$$

$$(\vec{U} \cdot \vec{\nabla}) \vec{U} = -\frac{1}{\rho} \vec{\nabla} P + \nu \nabla^2 \vec{U} \quad (6)$$

Essas equações são discretizadas e utilizadas pelos softwares. Servem para fornecer detalhes para cada ponto dentro do domínio do escoamento, como velocidade, pressão e massa específica, por exemplo. No método RANS, todavia, a equação de Navier Stokes exibida na Equação 6 é resolvida como uma média sobreposta a uma componente variante no tempo, conforme a Equação 7.

$$(\vec{U} \cdot \vec{\nabla}) \vec{U} = -\frac{1}{\rho} \vec{\nabla} P + \nu \nabla^2 \vec{U} + \vec{\nabla} \cdot \tau_{ij,turbulento} \quad (7)$$

O termo  $\tau_{ij,turbulento}$  adicionado na Equação 7 é o tensor de tensão de Reynolds e serve para incluir as informações das flutuações turbulentas na equação. O tensor  $\tau_{ij,turbulento}$  é apresentado na Equação 8, na qual a barra indica a média de tempo do produto dos dois componentes de velocidade flutuante. Incluso o tensor de tensões de Reynolds, seis novas incógnitas são adicionadas ao escoamento. Estas variáveis devem ser definidas através de um modelo de turbulência.

$$\tau_{ij,turbulento} = \begin{pmatrix} \overline{u'^2} & \overline{u'v'} & \overline{u'w'} \\ \overline{u'v'} & \overline{v'^2} & \overline{v'w'} \\ \overline{u'w'} & \overline{v'w'} & \overline{w'^2} \end{pmatrix} \quad (8)$$

#### 2.2.4 Modelos numéricos de turbulência do método RANS

Conforme citado anteriormente, uma maneira de prever a turbulência no fluido é através de modelos de turbulência. Uma abordagem possível é a chamada *one-point closure*, na qual são estudadas as médias de equações de movimento ao longo do tempo (se o fluxo for estatisticamente estável), ao longo de uma coordenada em que o fluxo médio não varia, ou ao longo de um conjunto de realizações (um conjunto imaginário de fluxos em que todos os fatores controláveis são mantidos fixos). Ela leva às equações diferenciais parciais de Navier-Stokes com média de Reynolds (RANS). No entanto, essas equações não formam um conjunto fechado, portanto este método requer a introdução de aproximações (modelos de turbulência) (FERZIGER J. H.; PERIC, 2002).

Os principais modelos de turbulência são  $k - \varepsilon$  e  $k - \omega$ . Esses adicionam mais duas equações importantes para finalmente resolver a RANS, e conseqüentemente, precisam de mais duas condições de contorno nas entradas e saídas do sistema. Para o primeiro modelo, deve-se conhecer os valores de  $k$ , que é a energia cinética turbulenta e  $\varepsilon$ , que é a taxa de dissipação turbulenta. Já para o segundo, deve-se especificar  $k$  e também  $\omega$  (taxa de dissipação específica).

Existem vantagens e desvantagens para cada modelo que podem afetar a qualidade da resolução do escoamento. Karthik e Durst (2011) descrevem as principais características de alguns modelos de turbulência.

- $k - \varepsilon$ : Conhecido como *Standard*, é simples de implementar, leva a cálculos estáveis que convergem mais facilmente e produz resultados satisfatórios para vários tipos de escoamento. No entanto, não é indicado para escoamentos em que há rotação, mistura de fluidos ou intensa separação. Necessita da implementação de funções de parede e é válido apenas para escoamentos totalmente turbulentos.
- RNG  $k - \varepsilon$ : Derivado do *Standard*, mantém algumas similaridades, porém é acrescido da capacidade de trabalhar com efeito rotativo e escoamentos transientes ou separados. Porém, não prevê o espalhamento de um jato redondo corretamente.
- Realizable  $k - \varepsilon$ : Compartilha a mesma equação de energia cinética turbulenta que o modelo padrão, porém a equação para  $\varepsilon$  foi aperfeiçoada, resultando em melhor desempenho para fluxos com jatos planos e redondos, camadas limites sob fortes gradientes de pressão adversos ou separação, rotação, recirculação e forte curvatura aerodinâmica.

- $k - \omega$ : Possui comportamento numérico semelhante ao dos modelos citados anteriormente, porém duas equações são adicionadas: uma de transporte para  $\omega$  e outra que representa uma versão modificada da equação  $k$  usada em  $k - \varepsilon$ . Uma possível aplicação é em escoamentos de baixo Reynolds.
- $k - \omega$  SST: O modelo SST (Shear Stress Transport) é um modelo de viscosidade turbulenta que combina  $k - \omega$  (na camada limite interna) e  $k - \varepsilon$  (na região externa e fora da camada limite), o que lhe confere a habilidade de resolver as regiões tanto internas à camada limite quanto distantes da parede. Portanto, é aplicável para casos de baixo e alto Reynolds. Além disso, serve para escoamentos com alto gradiente adverso de pressão e separação, porém introduz níveis de turbulência altos para regiões de estagnação e forte aceleração.

#### 2.2.4.1 O Modelo $k - \omega$ SST

De acordo com o manual técnico do software ANSYS Inc (2013), o modelo de transporte de tensão de cisalhamento (SST) foi desenvolvido por Menter em 1994 para combinar efetivamente a formulação robusta e precisa do modelo  $k - \omega$  na região próxima à parede com a independência de fluxo livre do modelo  $k - \varepsilon$  no campo distante. Para isso, o modelo  $k - \varepsilon$  é convertido em uma formulação  $k - \omega$ .

O modelo SST é semelhante ao modelo padrão, porém inclui os seguintes refinamentos, como a incorporação de um termo derivado de difusão cruzada amortecido na equação e a modificação da definição da viscosidade turbulenta para levar em conta o transporte da tensão de cisalhamento turbulenta. Além disso, o modelo padrão e o modelo  $k - \varepsilon$  transformado são multiplicados por uma função de combinação e os dois modelos são somados. A função de mistura é projetada para ser um na região próxima à parede, que ativa  $k - \omega$  padrão, e zero distante da superfície, que ativa o modelo transformado  $k - \varepsilon$ .

Esses recursos tornam o modelo SST mais preciso e confiável para uma classe mais ampla de fluxos, como, por exemplo, fluxos de gradiente de pressão inversa e aerofólios do que o modelo padrão.

### 2.3 ESTUDOS SIMILARES

Canais de recirculação são equipamentos importantes em universidades e laboratórios de hidrodinâmica. Para garantir a máxima aproveitabilidade do aparelho, é comum utilizar a abordagem CFD como uma ferramenta para estudar o comportamento do fluido na seção de testes. Muitos pesquisadores estudam maneiras de uniformizar o escoamento nessa região e proporcionar níveis baixos de intensidade de turbulência, de modo que seja possível realizar os experimentos em condições adequadas.

Nesse contexto, dentre esses trabalhos, destaca-se o de Pullinger e Sargison (2007). Os autores analisam um CWC complexo que possui uma tela aramada e uma placa do tipo *honeycomb*. Segundo eles, a *honeycomb* endireita o fluxo e reduz a turbulência e velocidades laterais, enquanto a tela reduz a turbulência na direção axial e é capaz de desacelerar o fluido de maneiras distintas, afetando mais velocidades maiores do que velocidades baixas, melhorando assim a uniformidade do fluxo. O objetivo deste projeto foi sugerir possíveis mudanças de *design* que levará à melhoria na uniformidade vertical do fluxo na seção de teste do canal de água. Uma das propostas é o aumento do coeficiente de resistência hidrodinâmica da placa *honeycomb*. O efeito de cinco coeficientes de resistência diferentes foram examinados.

Pullinger e Sargison (2007) concluem que o aumento na resistência hidrodinâmica da tela é semelhante ao efeito de adicionar telas simples de arame à *honeycomb*, porque a resistência ao fluxo de uma tela de arame geralmente é muito maior do que a imposta por uma *honeycomb*. Telas de arame também tendem a aumentar a uniformidade do fluxo, pois consegue afetar em as velocidades mais altas em um grau maior do que as velocidades mais baixas. No entanto, percebeu-se que, embora eficiente em uniformizar o fluxo, o aumento da resistência está diretamente relacionado com a queda de pressão, o que é indesejável, pois implica em aumento dos custos de funcionamento para o canal de água circulante.

O CWC desse caso é complexo e capaz de abrigar modelos fora de escala, pois possui grandes dimensões. A tela de arame é posicionada à justante da placa. Para a simulação, uma malha tetraédrica não estruturada foi usada em todo o corpo, exceto em regiões próximas à parede. De acordo com os autores, malhas não estruturadas têm vantagens sobre as estruturadas porque são mais fáceis de configurar e gerar. Para validar a análise CFD, os resultados foram comparados com resultados experimentais obtidos a partir de um modelo de túnel de vento.

Há, também, a pesquisa realizada por Kulak, Olasek e Karczewski (2012), a qual possui o mesmo objetivo, porém se utiliza de uma metodologia diferente. O autor analisa um túnel de vento equipado com duas telas de redução de turbulência. Eles afirmam que as telas reduzem a turbulência axial e lateral, no entanto, são mais eficazes na redução da turbulência axial. Então, para reduzir a intensidade turbulenta e uniformizar o escoamento, é proposta a inserção de uma placa *honeycomb* à montante das telas.

De acordo com Kulak, Olasek e Karczewski (2012), a geração da malha tridimensional de um túnel de vento completo com endireitador de fluxo é complexa. A malha consistia em elementos hexaédricos em todas as regiões. As simulações foram tratadas como em regime permanente com um pseudo *timestepping* (recurso ANSYS). "Para completar as equações de turbulência, optou-se por usar o modelo de turbulência SST com função automática de parede."(KULAK; OLASEK; KARCZEWSKI, 2012). A

solução numérica forneceu níveis aceitáveis de convergência com resíduos na faixa de cerca de  $1 \times 10^{-4}$ . Os autores acreditam que o objetivo foi alcançado, porém reforçam que verificações mais aprofundadas podem ser necessárias.

Apesar da existência de diferenças estruturais nos estudos citados, como o tipo de elemento de malha utilizado e a posição de inserção da placa, ambos os trabalhos não apenas justificam o uso de placas perfuradas para auxiliar na redução da intensidade turbulenta, mas também indicam que, para obter melhores resultados, pode ser necessária a utilização de mais de um elemento modificador de fluxo. Além disso, também ressaltam, em seus conteúdos, certa dificuldade na geração da malha e a presença de limitações devido a recursos computacionais.

### 3 METODOLOGIA

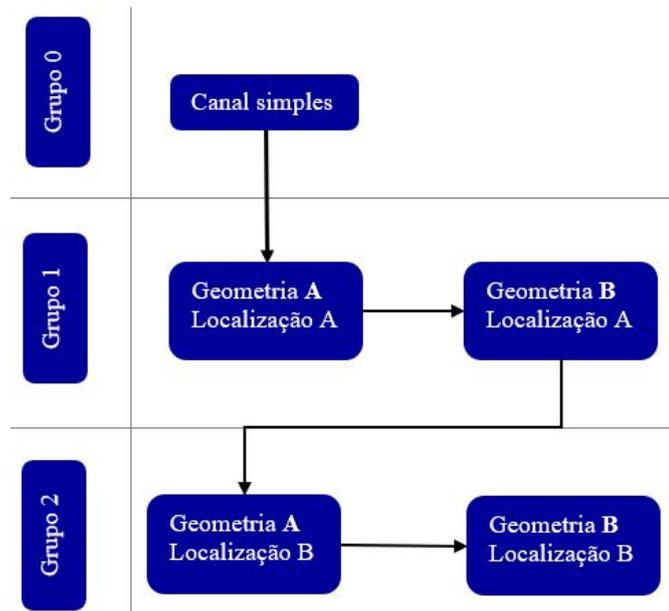
A metodologia descreve as etapas do trabalho e explicita as ferramentas a serem utilizadas para seu desenvolvimento. Este capítulo apresenta os casos estudados, ou seja, o conjunto de geometrias e posições longitudinais da tela, além de comentar sobre o programa empregado como ferramenta para realização das simulações. Em seguida, são descritos os procedimentos para a construção da malha e as condições de contorno assumidas. Finalmente, é citada a maneira segundo a qual serão analisados os resultados.

Este trabalho estuda, de maneira preliminar e simplificada, a interferência de um elemento modificador de fluxo em formato de placa perfurada inserido no canal de recirculação de fluido de baixo custo. Serão variadas a localização de inserção e a geometria dessa placa. A análise será feita por meio de simulações numéricas com o *software* comercial ANSYS Fluent. Todo o estudo será inteiramente realizado em um notebook Lenovo Legion Y720, o qual possui processador Intel Core i7-7700HQ (2.8GHz) e memória RAM 16GB.

#### 3.1 DEFINIÇÃO DO PROBLEMA

Esta seção é fundamental para descrever os casos a serem analisados pelo estudo, os quais seguirão a ordem do fluxograma apresentado pela Figura 6.

Figura 6 – Fluxograma das simulações.



Fonte: Autora (2021).

O Grupo 0 representa o canal sem adição de elemento modificador de fluxo, e servirá como referência para justificar e avaliar as outras simulações. Os demais grupos são formados cada um por duas simulações e são distribuídos conforme a posição longitudinal de inserção do modificador de fluxo, de modo que o Grupo 1 se refere à Localização A e o Grupo 2 à Localização B.

Nesse sentido, serão estudados dois modelos de placa perfurada, nos quais a diferença está na geometria e quantidade de furos, mantendo-se a mesma razão de permeabilidade (RP). Esse número indica, em porcentagem, quanto da área da placa é permeável para permitir a passagem do fluido, e é calculado como uma razão da área total dos furos pela área da seção transversal do canal. A posição longitudinal da placa também é um objeto de análise. Dessa forma, as geometrias serão simuladas em duas posições diferentes, uma logo após a entrada do fluido e a outra mais próxima ao centro do canal. Com isso, será possível comparar o efeito do conjunto formado pela geometria associada à posição na redução da turbulência e também na uniformização do escoamento.

### 3.1.1 Descrição do fluxo

O fluido percorre o duto retangular, de 40 cm de altura, 30 cm de largura e 2,4 m de comprimento ( $L$ ), com uma coluna de água de 30 cm ( $h$ ). As extremidades se localizam em  $y = 0$  e  $y = L$ . O canal de recirculação possui a face superior aberta ao meio externo, essa é uma região de interface ar-água.

Já as velocidades nas direções  $x$ ,  $y$  e  $z$  são  $u$ ,  $v$  e  $w$ , respectivamente. Próximo à entrada, em  $y = 0$ , há um região onde o escoamento não está completamente desenvolvido, devido ao jato de água proveniente da tubulação e a velocidade ainda varia com  $y$ , além de possuir os maiores módulos de velocidade e intensidade de turbulência de todo o canal.

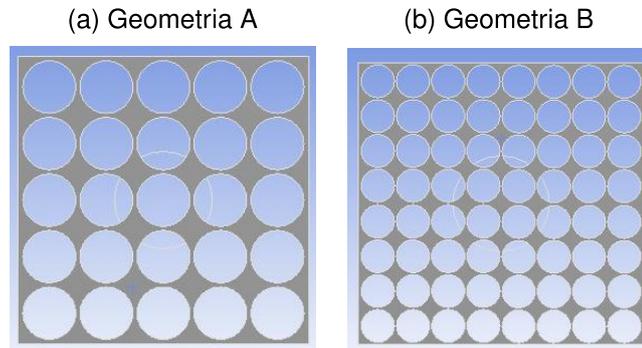
### 3.1.2 Modelos de placa perfurada

As placas têm dimensões semelhantes ao canal em altura e largura, porém a sua espessura é desprezível. Cada uma delas possui a mesma razão de permeabilidade, ou seja, permitem a passagem da mesma quantidade de massa. Para essas simulações, tem-se que  $RP = 68,4\%$  e o fluxo de massa é  $0,65 \text{ kg/s}$ .

Nesse contexto, a primeira configuração de placa é composta por 25 furos de 56 mm de diâmetro, espaçados 59 mm entre seus centros, tanto na direção vertical quanto na horizontal. Esse modelo é mostrado pela Figura 7a e é chamado Geometria A. Seguindo esse padrão, a segunda placa, nomeada Geometria B, contém 64 furos de 35 mm de diâmetro e espaçamento entre centros de 37 mm em ambas as direções, conforme a Figura 7b.

A geometria de todo o canal será construída com auxílio do *SpaceClaim*, uma ferramenta do ANSYS.

Figura 7 – Geometrias da Placa Perfurada

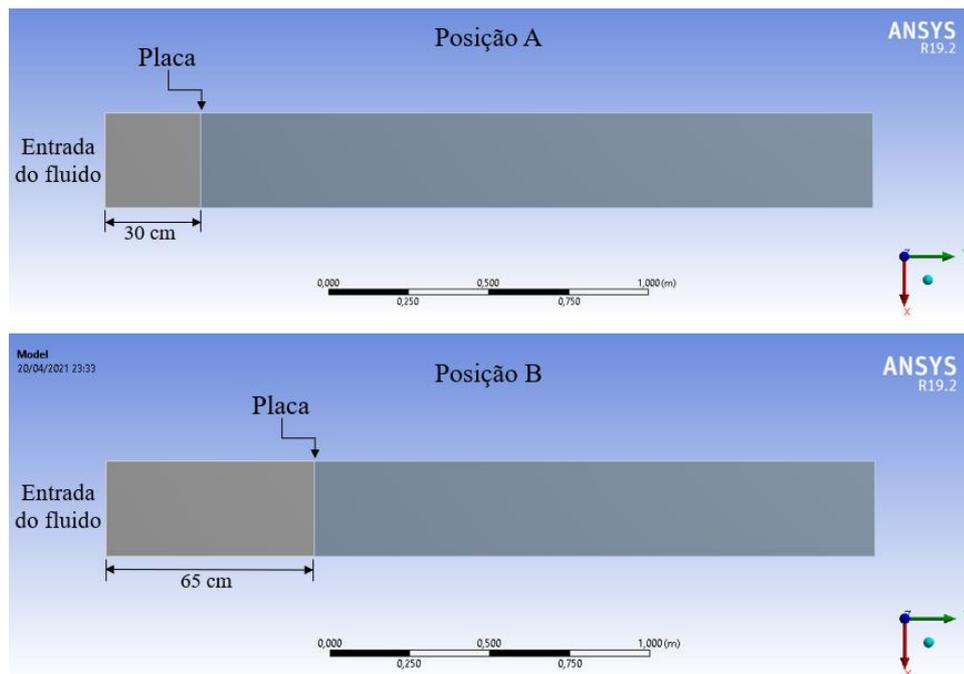


Fonte: Autora (2021).

### 3.1.3 Posições longitudinais para a placa perfurada

Serão estudadas duas localizações de inserção da placa, a fim de verificar a posição ideal para maximizar os resultados obtidos pela utilização do dispositivo. Dessa forma, para as simulações 1 e 2 (Grupo 1), a placa será inserida a 30 cm da extremidade inicial do canal ( $y = 0,3m$ ). Essa posição é chamada Localização A e é representada pela imagem superior da Figura 8. Em seguida, serão transferidas para a Localização B em  $y = 0,65m$ , sofrendo um deslocamento de 35 cm. Essa configuração é utilizada nas simulações do Grupo 2 e é representada pela imagem inferior da Figura 8.

Figura 8 – Posições longitudinais da placa perfurada.



Fonte: Autora (2021).

### 3.1.4 Definição da seção de teste

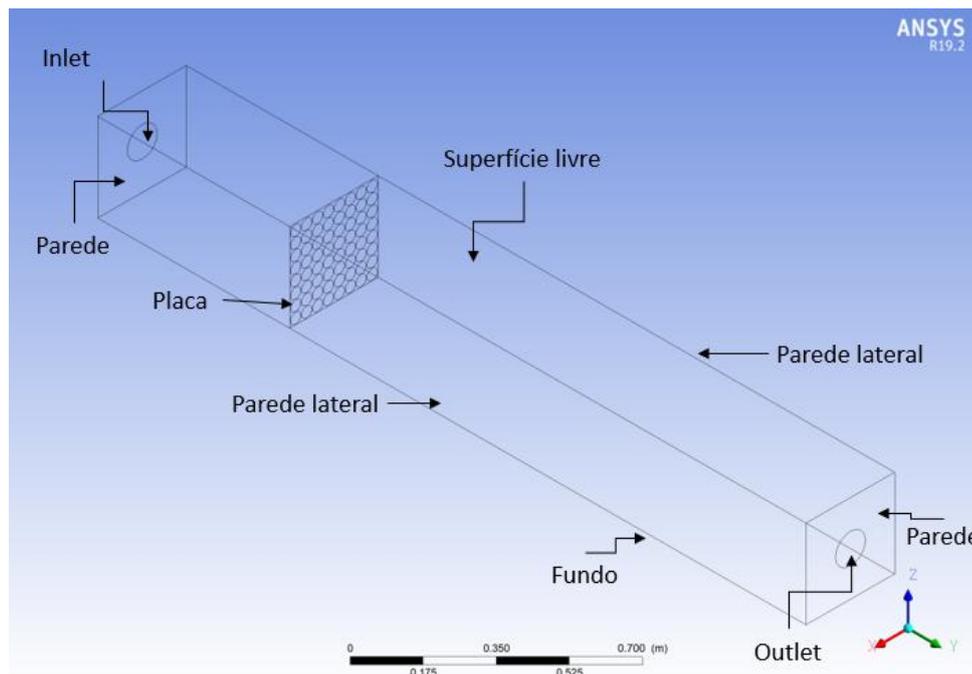
Após simular os conjuntos de placa geometria-posição, será verificado se é possível, com os resultados obtidos, definir longitudinalmente a região em que serão feitos os experimentos. Isso será feito apenas uma vez, de acordo com a simulação que apresentar o resultado mais satisfatório, isto é, aquela que atingir os objetivos determinados.

Nessa região, o escoamento deve ser uniforme e completamente desenvolvido. Além disso, o índice de turbulência deve ser inferior ao calculado na simulação 0, para que o uso do modificador de fluxo seja justificado.

## 3.2 PARÂMETROS E CONDIÇÕES DE CONTORNO

As condições de contorno devem ser especificadas para cada face da geometria como na Figura 9 e são iguais para todas as simulações conduzidas neste trabalho.

Figura 9 – Condições de Contorno.



Fonte: Autora (2021).

De acordo com o ANSYS Inc (2013), o uso da condição da face de saída de escoamento como *pressure-outlet*, em vez de uma condição baseada no fluxo de massa (*mass-flow-outlet*), geralmente resulta em uma melhor taxa de convergência em casos que é possível a ocorrência de refluxo durante a simulação, principalmente próximo à saída. Outra perspectiva para a face de saída é alongá-la, transformando-a em um duto, a fim de garantir o desenvolvimento completo do escoamento e, com isso, evitar quaisquer possibilidades de não cumprimento das restrições impostas pelas condições de contorno durante as simulações.

As condições de contorno são:

- *Entrada/Inlet*: Necessita de velocidade inicial, intensidade turbulenta e razão de viscosidade turbulenta. A velocidade é constante e comandada pela bomba de recirculação, já os outros dois parâmetros são inseridos com base em literatura e simulações já realizadas;
- *Saída/Outlet*: descreve a saída do escoamento. A velocidade de saída possui gradiente zero e a pressão possui valor nulo. Essa condição no *ANSYS Fluent* é chamada *pressure-outlet*;
- *Placa*: Também é parede, por isso se aplica a condição de não escorregamento, em que a velocidade é nula e a pressão possui gradiente zero;
- *Paredes laterais e de fundo*: aplica-se a condição de não escorregamento;
- *Paredes adjacentes às faces de entrada e saída*: aplica-se a condição de não escorregamento;
- *Parede superior*: é uma região de superfície livre, pois é a fronteira ar-água. Aplica-se uma condição conhecida como livre escorregamento, configurando como nulo o cisalhamento nessa parede.

As simulações de todos os grupos serão conduzidas em conformidade com os parâmetros e valores de entrada apresentados na Tabela 1. O fluido utilizado é água, que possui viscosidade cinemática de  $\nu = 1.10^{-6}$  m<sup>2</sup>/s e densidade  $\rho = 999$  kg/m<sup>3</sup>. O modelo de turbulência aplicado é o  $k - \omega$  SST e as simulações serão realizadas em regime permanente.

Tabela 1 – Parâmetros de entrada

Dados da geometria do canal [cm]	
Comprimento	240
Largura	30
Altura	40
Nível da água	30
Diâmetro entrada/saída	10,16
Dados da simulação	
Velocidade de Entrada [cm/s]	8,00
Fluxo de massa (entrada/saída) [kg/s]	0,65
Intensidade de turbulência (entrada/saída) [%]	3
Razão de viscosidade turbulenta (entrada/saída)	1

Fonte: Autora (2021).

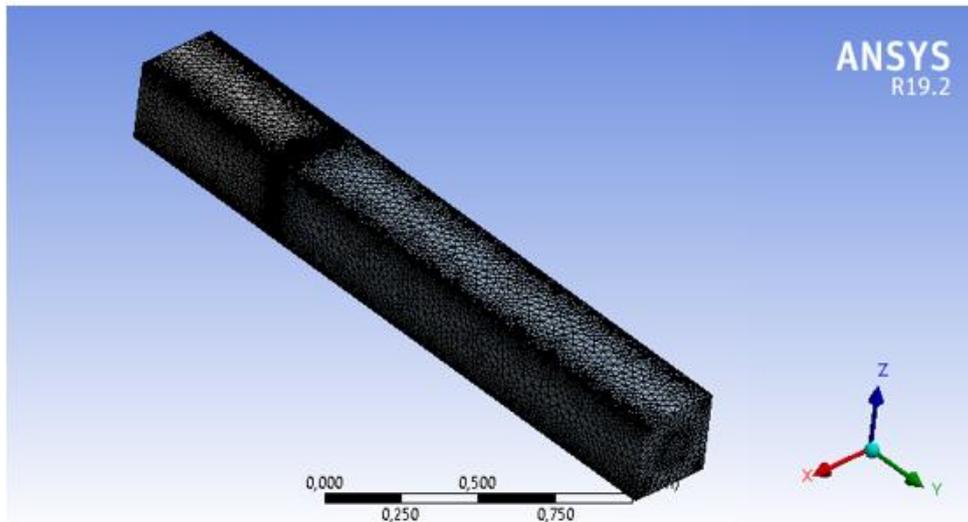
### 3.3 GERAÇÃO DA MALHA

As malhas são não estruturadas com elementos tetraédricos e são geradas com auxílio da ferramenta *Meshing* do software ANSYS através de procedimentos como *body sizing*, *face sizing* e *edge sizing*, os quais são comandos para definir o tamanho

de blocos, faces e arestas. O nível de refinamento das células interfere diretamente na quantidade de elementos, e por consequência, no tempo da simulação e demanda computacional.

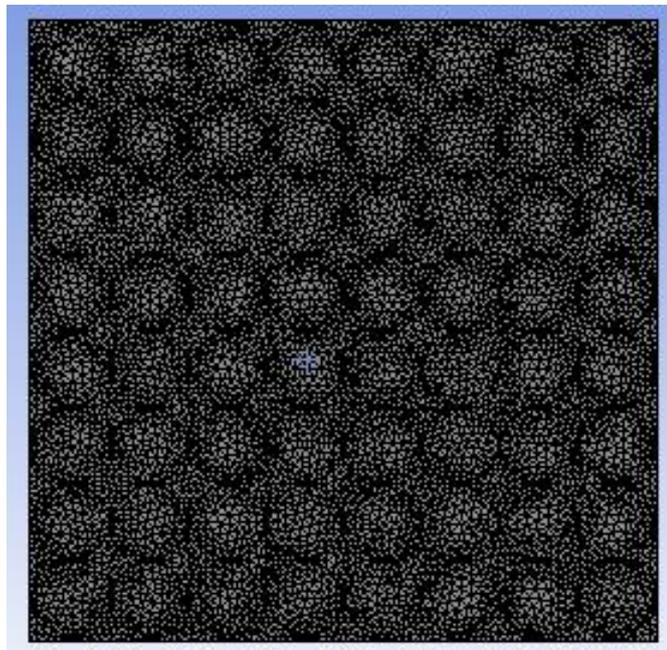
A Figura 10 mostra uma malha construída para a simulação 3 (ver Tabela 2), porém, todas as malhas seguem as mesmas etapas e possuem características semelhantes. Da mesma maneira, a Figura 11 mostra a malha gerada na placa perfurada e a Figura 12 traz uma versão ampliada da malha dessa placa.

Figura 10 – Malha gerada para a simulação 3



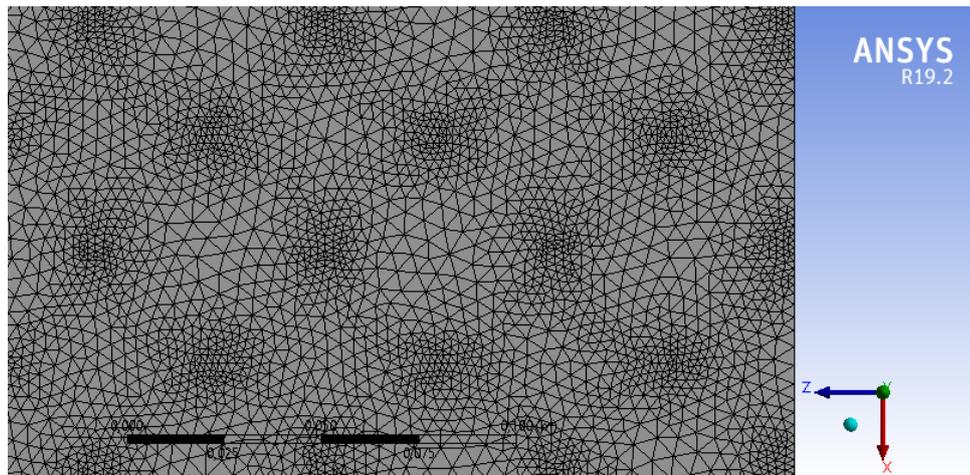
Fonte: Autora (2021).

Figura 11 – Malha gerada para a placa da simulação 3



Fonte: Autora (2021).

Figura 12 – Malha aproximada da placa da simulação 3



Fonte: Autora (2021).

Em conformidade com o citado na subseção 2.2.1, fatores como qualidade da malha, razão de aspecto e *skewness* ou assimetria são importantes para a convergência dos resultados. Segundo o manual do ANSYS (2013), a qualidade da malha é quantificada para valores variando de 0 a 1, sendo que 1 representa qualidade máxima. Já o *skewness* segue a lógica contrária, isto é, 0 indica total simetria do elemento e nenhuma inclinação.

Como se pode observar na Figura 10, nas regiões próximas às paredes laterais e de fundo, a malha é levemente mais refinada. Isso é importante para satisfazer as condições impostas pelo modelo de turbulência aplicado. No entanto, devido a limitações computacionais, não foi possível atingir os tamanhos mínimos recomendados para elementos na parede.

Vale comentar que esta é a etapa mais desafiadora deste estudo. Apesar da aparente simplicidade da geometria, em razão da tridimensionalidade, a construção dessa malha exige cuidados importantes. Devido às grandes dimensões do canal, as malhas podem possuir uma quantidade elevada de nós e elementos, o que resulta na necessidade de maiores recursos computacionais para efetuar as simulações. Além disso, é recomendado atentar para os critérios de qualidade ortogonal e assimetria mínimos exigidos pelo ANSYS para casos 3D.

### 3.4 MÉTODOS DE ANÁLISE DOS RESULTADOS

As simulações serão realizadas com o pacote *Fluent* do ANSYS e os resultados serão analisados empregando-se a ferramenta *Results*, contida nesse pacote. Para o Grupo 0, será feita uma breve análise de convergência de malha e serão avaliadas a intensidade de turbulência e velocidade do escoamento em dois pontos ao longo do canal por meio de gráficos.

Já para os Grupos 1 e 2, o método aplicado tem um caráter qualitativo e

comparativo. Serão criados um plano longitudinal central horizontal, paralelo ao fundo, e um plano longitudinal central vertical, paralelo às paredes. Neles, serão exibidos os chamados *contours* (contornos ou mapa de cores) com as magnitudes e perfis da velocidade axial ( $v$ ), isto é, na direção  $y$ .

A avaliação então se inicia com a análise da velocidade  $v$  no plano horizontal. Com isso, deseja-se observar como a placa auxilia na distribuição do escoamento que a atravessa e ainda se há uniformidade em alguma região que possa servir como seção de teste.

O perfil de velocidade também é avaliado nos planos verticais, com o intuito de verificar como são o comportamento e a distribuição do fluido em direção à saída e em regiões próximas à superfície livre. Esse procedimento será replicado igualmente para todas as simulações desses dois grupos.

A segunda etapa deverá comparar os resultados obtidos com a geração de gráficos. Para tal, são criadas linhas, que servem para coletar os dados na região escolhida. Essas são inseridas no utensílio *chart* do *Results* e depois exportadas para o excel, onde as informações serão trabalhadas com maior cuidado e a imagem efetivamente construída. Os parâmetros estudados são intensidade de turbulência e perfil de velocidade.

Por fim, será avaliado se existe alguma região qualificável, isto é, que atenda às expectativas citadas na subseção 2.1.3.1, para ser identificada como seção de teste desse canal de baixo custo.

### 3.5 SÍNTESE DAS ANÁLISES CONTEMPLADAS POR ESTE TEXTO

A Tabela 2 apresenta, de maneira resumida, o conteúdo de cada uma das cinco simulações e a ordem de apresentação do capítulo de Resultados e Discussões. Essa matriz é suficiente para atender os objetivos definidos anteriormente.

Tabela 2 – Matriz das simulações realizadas

Simulação	RP (%)	Configuração	Diâmetro dos furos (mm)	Quantidade de furos	Posição da placa (m)
0	100	Simples	N/A	N/A	N/A
1	68,40	Geometria A, Localização A	56	25	0,30
2	68,40	Geometria B, Localização A	35	64	0,30
3	68,40	Geometria A, Localização B	56	25	0,65
4	68,40	Geometria B, Localização B	35	64	0,65

Fonte: Autora (2021).

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Esta seção apresenta os resultados obtidos e as discussões pertinentes ao canal de recirculação de baixo  $Re$ . Primeiramente é demonstrada uma breve convergência de malha para o canal sem placa modificadora de fluxo e, posteriormente, as soluções com as placas, de maneira a seguir a mesma ordem exposta no capítulo de metodologia.

### 4.1 GRUPO 0 - CANAL DE RECIRCULAÇÃO SEM PLACA MODIFICADORA DE FLUXO

O canal sem a placa é o caso 0, pois é o caso tomado como referência para as demais simulações, em função da sua simplicidade. A água que entra percorre o canal e escoar para o duto de saída, sem modificações impostas por modificadores de fluido. Em razão disso, este caso é o que apresenta perfis de velocidade menos uniformes. Como este caso é o mais simples em termos da dinâmica do fluido, foram conduzidas três simulações variando o número de células da malha ( $N_{cel}$ ) e também o número de nós ( $N_{nos}$ ), como apresentado na Tabela 3.

Tabela 3 – Malhas simulados para o Caso 0

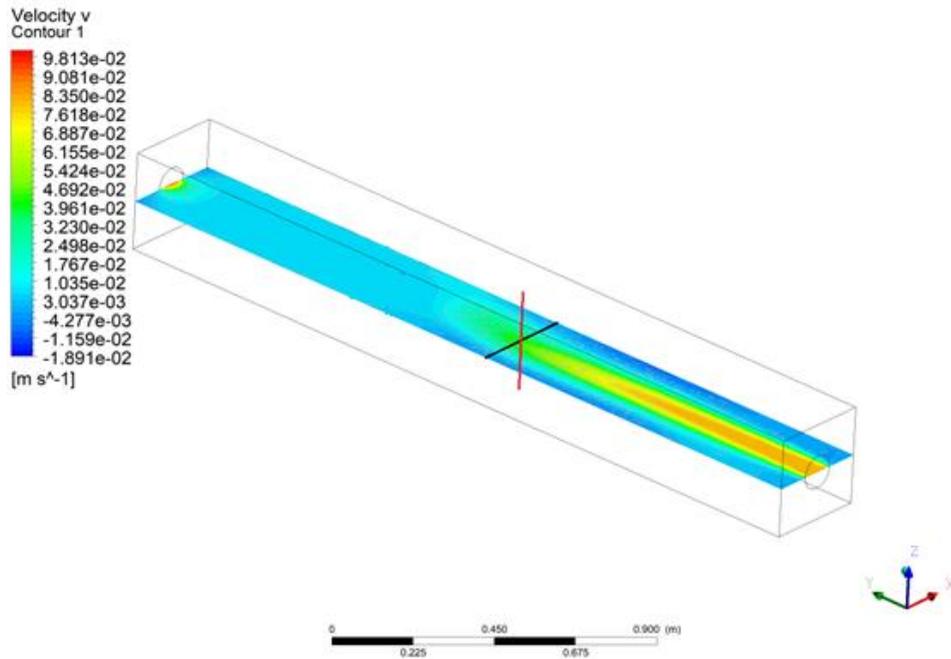
Malha	$N_{cel}$	$N_{nos}$
$M_1$	521.174	919.191
$M_2$	858.687	1.187.534
$M_3$	1.129.850	1.865.384

Fonte: Autora (2021).

A avaliação dos resultados para três malhas diferentes visa entender o comportamento numérico da simulação com o refinamento da malha, esta que é a maior fonte de erro das simulações desse trabalho. Para a avaliação dos resultados o perfil de velocidade do escoamento e a intensidade de turbulência ( $T$ ) são comparados. Nesse sentido, duas linhas foram escolhidas para comparação – exibidas na Figura 13. São elas:

- Linha Preta: Posicionada a 1,1 metros de distância da entrada do escoamento, transversal ao canal, na largura, e no centro de sua altura;
- Linha Vermelha: Posicionada a 1,1 metros de distância da entrada do escoamento, transversal ao canal, na altura, e no centro de sua largura.

Figura 13 – Linhas de referência



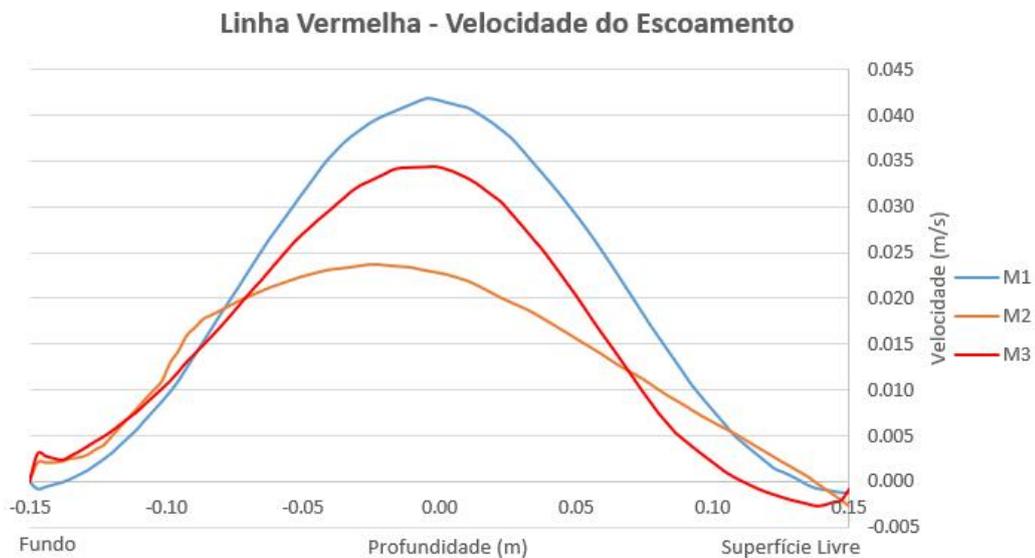
Fonte: Autora (2021).

A primeira posição avaliada é a linha vermelha, cujos resultados para o perfil de velocidade e intensidade de turbulência são mostrados nas Figuras 14a e 14b, respectivamente, de modo que a extremidade esquerda da imagem representa o fundo (parede inferior) do tanque e a extremidade direita representa a superfície livre.

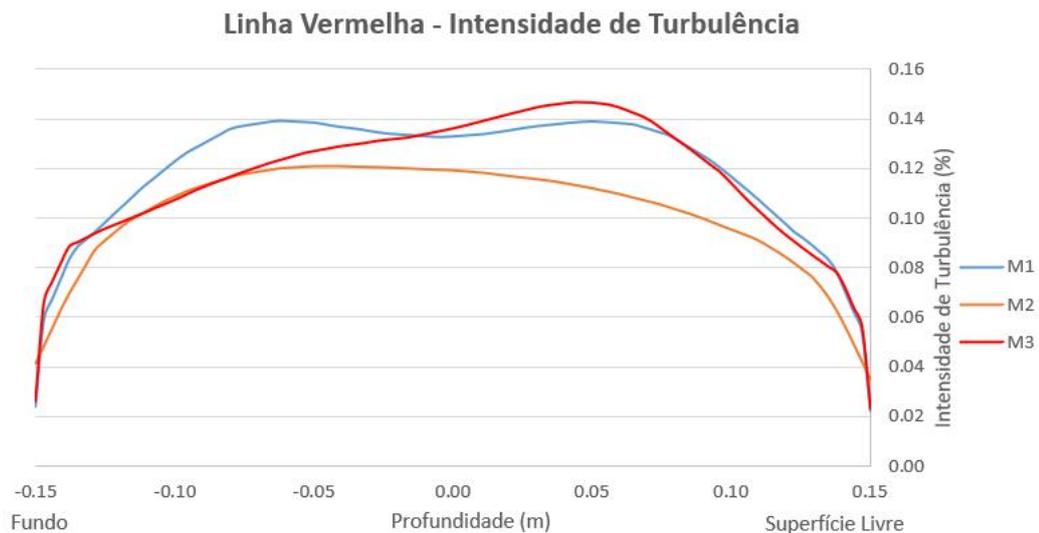
Para a velocidade, é notório que a solução indica ainda ser oscilatória, uma vez que a o pico da curva para a malha M1 (mais grosseira) é maior que a M2 e essa, por sua vez, é menor que a M3. Desta forma, é recomendada a simulação de malhas mais refinadas para a avaliação mais precisa do valor da velocidade. Contudo, devido à limitação da capacidade computacional, malhas mais refinadas não foram possíveis de serem simuladas. Ademais, como o interesse neste caso é o perfil, é satisfatória a solução encontrada, pois indica como o perfil se desenvolve nesta posição. Avaliando agora a intensidade de turbulência, na Figura 14b, nota-se que este parâmetro possui valores mais próximos entre si conforme o número de células da malha é aumentado.

Figura 14 – Análise de convergência - Linha vermelha

(a) Velocidade



(b) Intensidade de turbulência



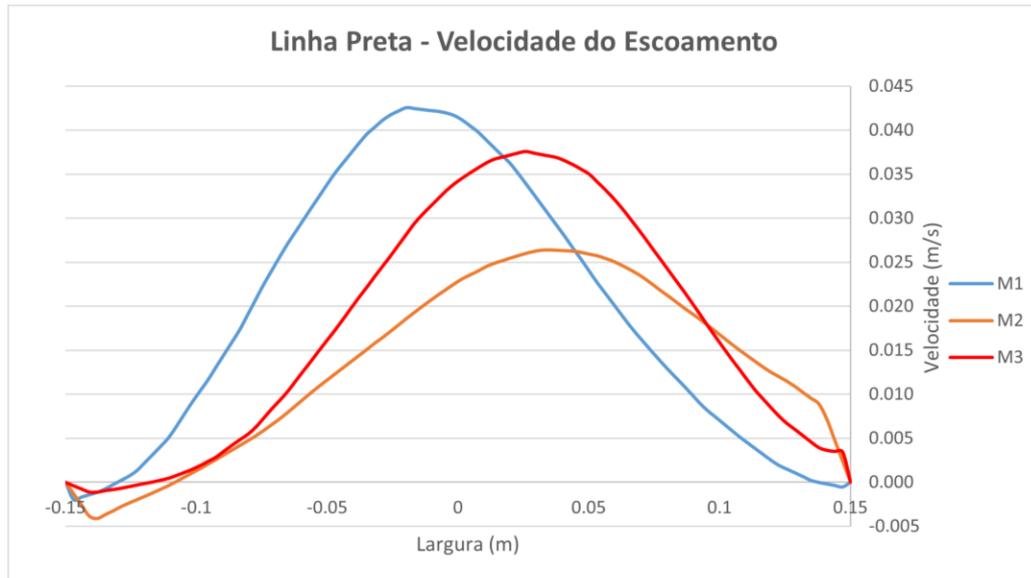
Fonte: Autora (2021).

A segunda posição avaliada é a representada pela linha Preta (indicada na Figura 13), cujos resultados para a velocidade e intensidade de turbulência são apresentados nas Figuras 15a e 15b, respectivamente. Na Figura 15, as extremidades laterais dos gráficos, marcadas no eixo horizontal por -0,15 e 0,15, indicam as paredes laterais esquerda e direita do canal, nessa ordem. A convergência encontrada foi similar à posição anterior.

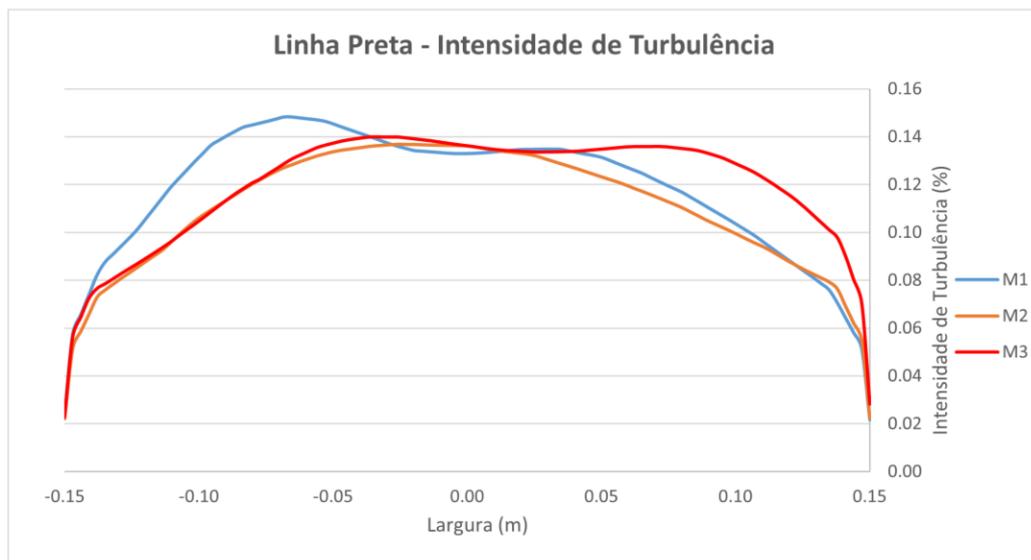
Nesse contexto, pode-se concluir que, enquanto a intensidade de turbulência apresenta valores mais próximos quando se varia a malha, o perfil de velocidade demonstra valores mais discrepantes para a malha mais grosseira.

Figura 15 – Análise de convergência - Linha preta

(a) Velocidade

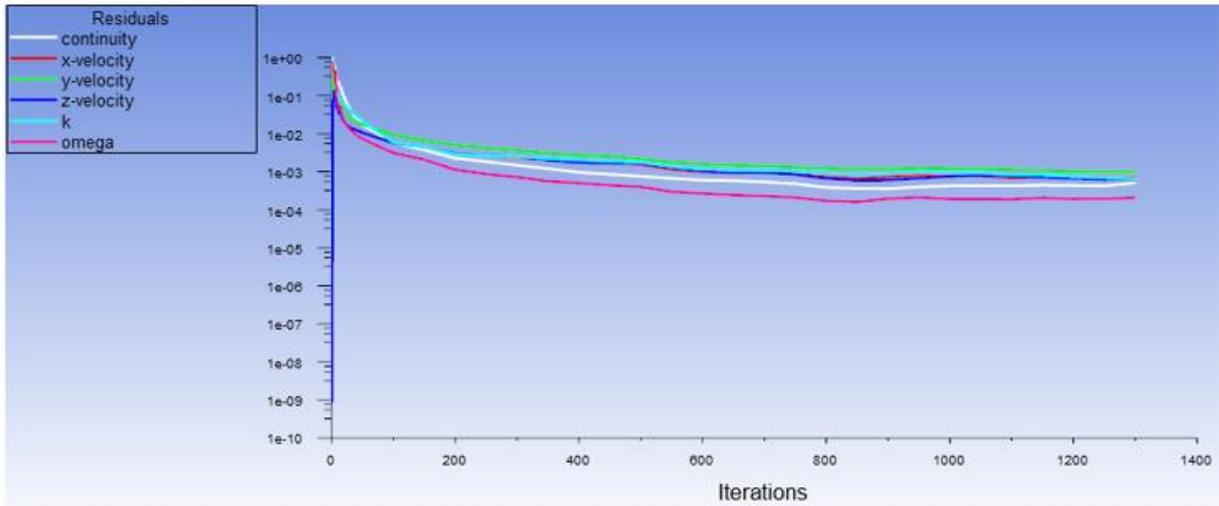


(b) Intensidade de turbulência



Fonte: Autora (2021).

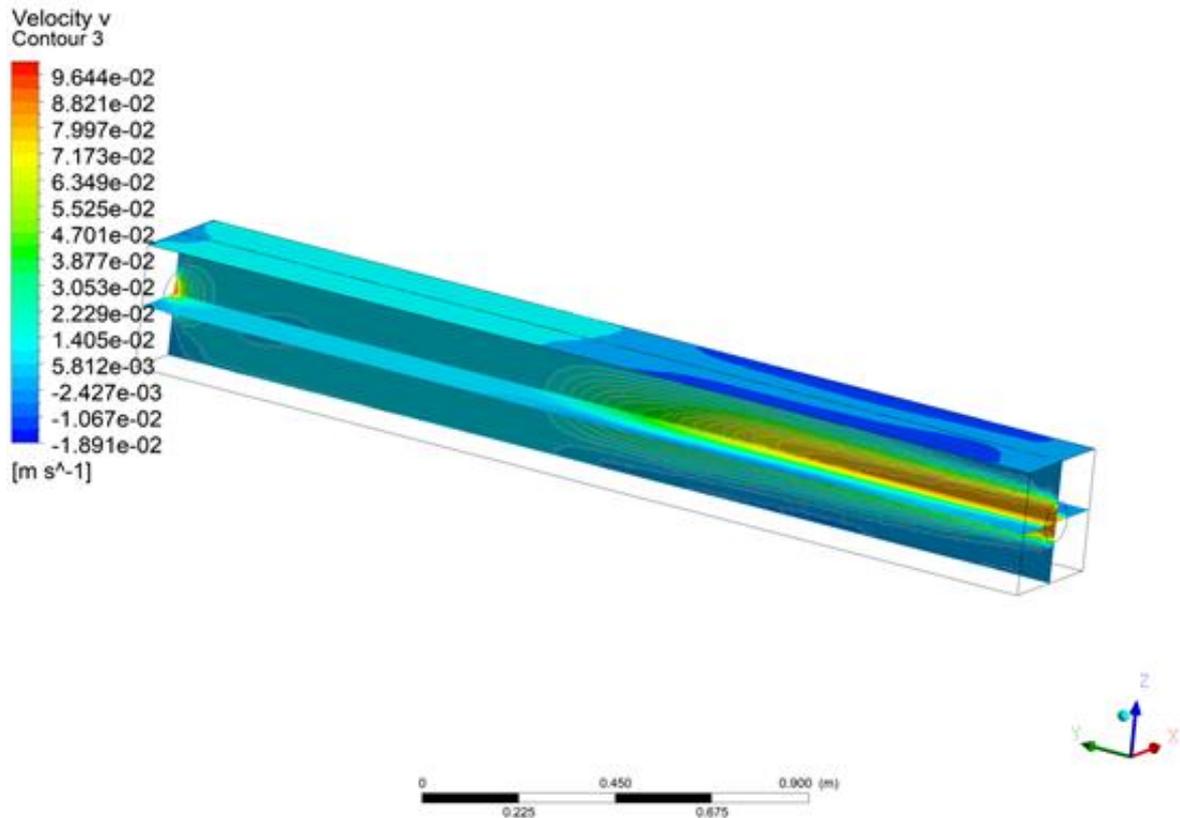
A Figura 16 mostra os valores residuais das variáveis em relação ao número de interações para a maha  $M_2$ , indicando a convergência para o valor de tolerância especificado a cada interação, de modo que os valores residuais para a velocidade em x, y e z, continuidade, k e  $\omega$  sejam no mínimo  $1 \times 10^{-3}$ .

Figura 16 – Resíduos da malha  $M_2$ 

Fonte: Autora (2021).

Por fim, para entender o comportamento do escoamento, apresenta-se a Figura 17, onde a velocidade axial é mostrada para o plano de superfície livre, central longitudinal horizontal e central longitudinal vertical. Na figura, é visível que o fluido entra no canal com um jato central que forma um perfil de velocidade parabólico que é mantido até a metade do canal. Quando próximo a saída, a velocidade também aumenta. Ademais, são expostas regiões de recirculação na superfície livre – regiões azuis escura, na metade inicial do tanque. Essa região apresenta velocidades negativas na superfície livre, fator que deve ser mitigado para que o tanque de recirculação resulte em velocidades axiais constantes e positivas nos arredores da superfície livre.

Figura 17 – Grupo 0 - Velocidade axial



Fonte: Autora (2021).

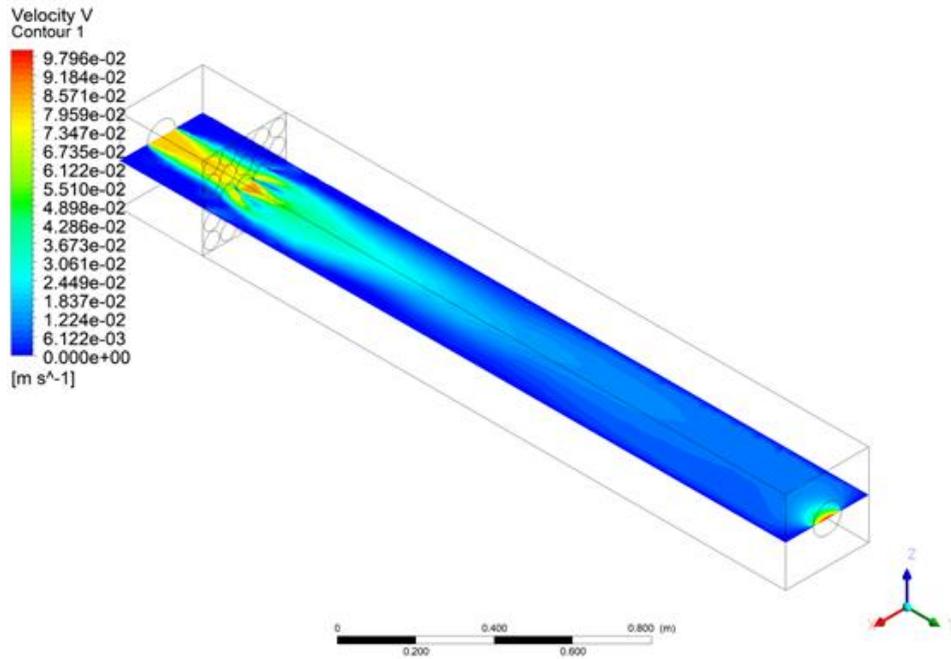
A próxima seção apresenta os resultados para o tanque de recirculação com as placas modificadores de fluxo. Para as próximas simulações, não serão avaliadas as convergências das malhas, pois, apesar de extremamente importantes não é factível com a disponibilidade computacional deste trabalho. Contudo, ressalta-se que os resultados ainda são valiosos, pois todas as simulações são conduzidas em malhas da ordem de grandeza da M2 e o critério de convergência é os valores residuais para todas as variáveis sejam menores que  $1 \times 10^{-3}$ , visando manter o padrão de resposta encontrado em um tempo de simulação aceitável.

#### 4.2 GRUPO 1 – PLACAS MODIFICADORAS DE GEOMETRIA A E B POSICIONADAS NA LOCALIZAÇÃO A

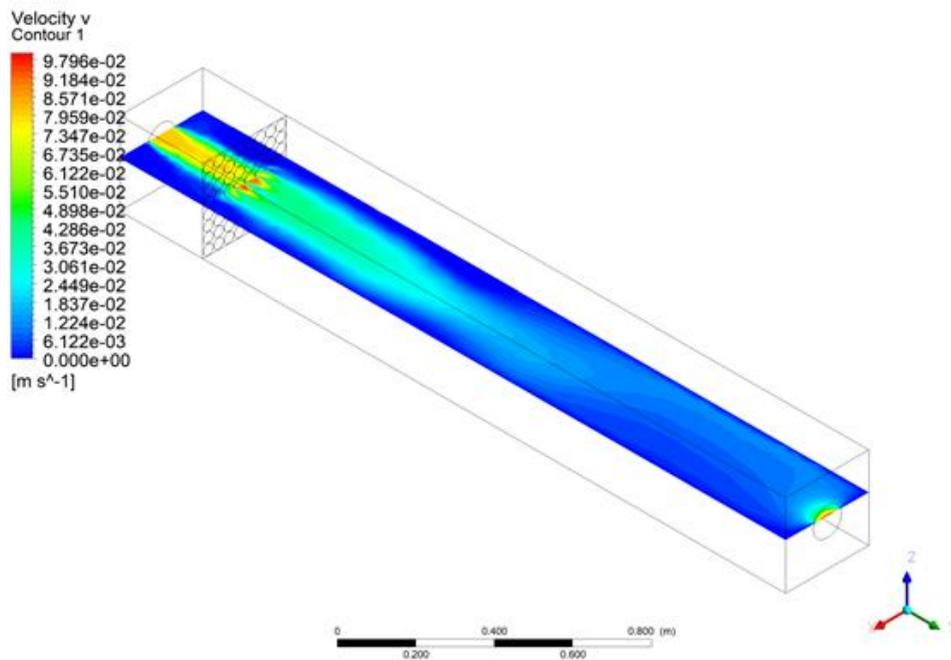
Esta seção apresenta qualitativamente os resultados obtidos para as simulações do Grupo 1, isto é, as Geometrias A (25 furos com diâmetro igual a 56 mm) e B (64 furos com diâmetro igual a 35 mm) na Posição A (300 mm da entrada do canal). A velocidade de entrada para ambos os casos foi mantida em 0,08 m/s.

A Figura 18a mostra um plano horizontal longitudinal com os contornos da velocidade axial para a Geometria A e a 18b para a Geometria B.

Figura 18 – Grupo 1 - Velocidade no plano horizontal  
(a) Geometria A



(b) Geometria B



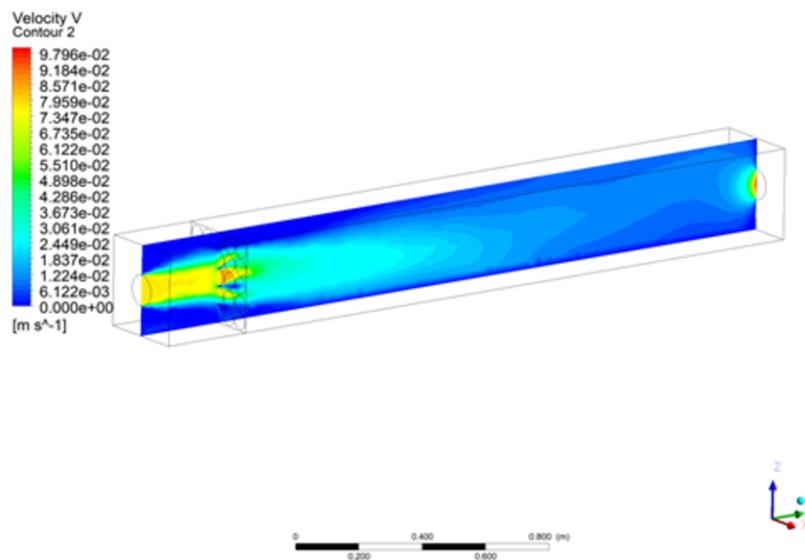
Fonte: Autora (2021).

O primeiro ponto observado é que a placa modificadora com mais furos distribui melhor o escoamento e mantém a velocidade do fluido por uma distância maior. Outro item que chama a atenção é que na segunda metade do comprimento do canal, ambos os casos apresentam uma região de assimetria. O fluido tende a ser direcionado para a esquerda com velocidades maiores e logo depois converge para a saída.

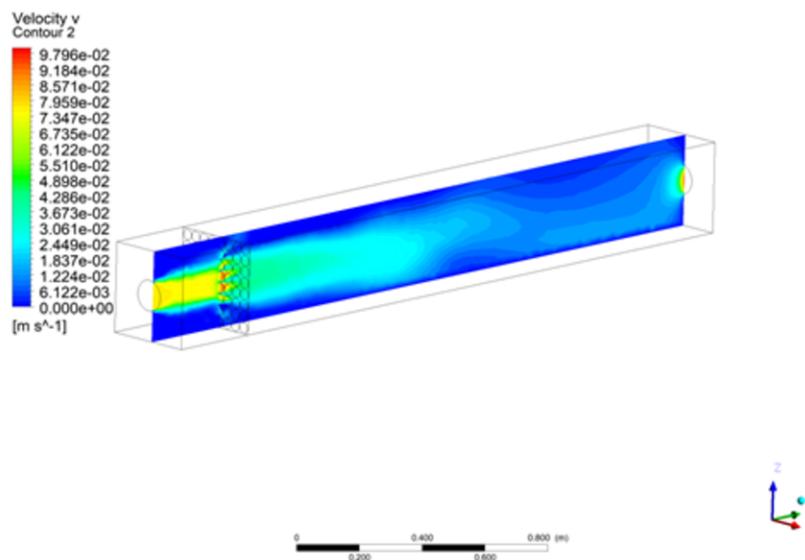
Adicionalmente às avaliações nos planos da Figura 18, é necessário entender como o escoamento se comporta próximo à superfície livre. Esta região é importante pois é o local onde o experimento ocorrerá. Assim sendo, introduz-se a Figura 19 com o plano central que une a superfície livre à parede inferior do tanque.

Figura 19 – Grupo 1 - Velocidade no plano vertical

(a) Geometria A



(b) Geometria B



Fonte: Autora (2021).

De forma controversa, a Figura 19 mostra que a Geometria A apresenta perfis de velocidades mais uniformes que a Geometria B, em razão de essa última aparentar o escoamento sofrendo desvio para a superfície livre na metade do comprimento do tanque e posteriormente para baixo. Neste ponto é possível discutir a condição de contorno aplicada na superfície livre.

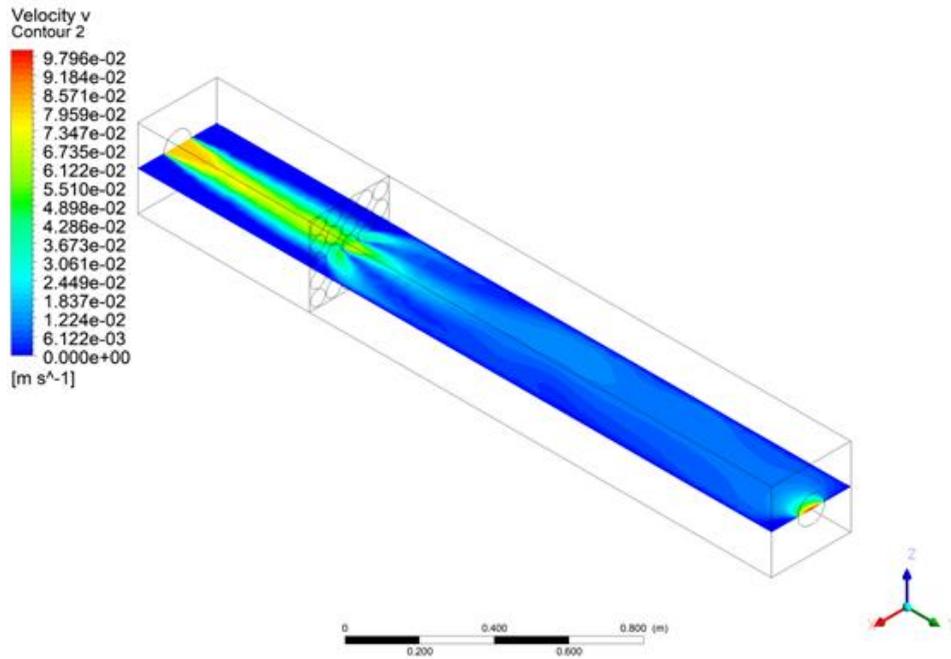
Neste trabalho, não foram aplicados os modelos de VOF (Volume of Fluid), que são ideais para modelar a interface ar-água, pois o escoamento é de baixo Re e não é gerador de ondas devido ao baixo número de Froud. Entretanto, de forma similar, utilizou-se uma parede com tensão de cisalhamento zero que reproduz o efeito da superfície livre, sem tensões viscosas. Este ponto é retomado posteriormente para sugestões de trabalhos futuros.

#### 4.3 GRUPO 2 – PLACAS MODIFICADORAS DE GEOMETRIA A E B POSICIONADAS NA LOCALIZAÇÃO B

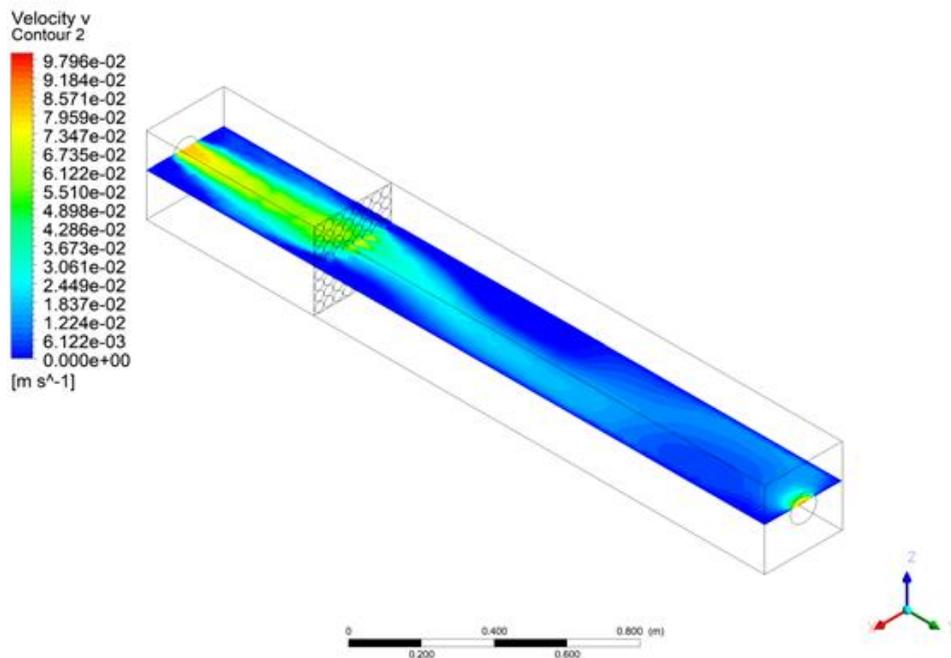
Esta seção apresenta qualitativamente os resultados obtidos para as simulações do Grupo 2, isto é, as Geometrias A e B na Localização B (650 mm da entrada do canal de recirculação).

A Figura 20 apresenta a solução encontrada para a velocidade axial no plano axial longitudinal. Para a Geometria A, Figura 20a, as velocidades são mais uniformes na metade final do canal de recirculação. Para a Geometria B, Figura 20b, o resultado obtido apresenta uma assimetria no escoamento. O fluxo é direcionado para a direita e posteriormente para a esquerda antes de sair do canal. Essa oscilação do escoamento é similar à esteira oriunda em corpos rombudos, como cilindros, logo antes da geração e desprendimento de vórtices. Assim, pode ser resultante da esteira da placa perfurada. Ademais, essa característica pode estar relacionada com a assimetria da malha, que introduz pequenos erros numéricos e faz com que um escoamento que deveria ser simétrico torne-se assimétrico. Por último, a oscilação do escoamento pode ser recirculação do fluido que não tem vazão na saída do canal e reflete para a direção contrária, retornando à entrada.

Figura 20 – Grupo 2 - Velocidade no plano horizontal  
(a) Geometria A



(b) Geometria B



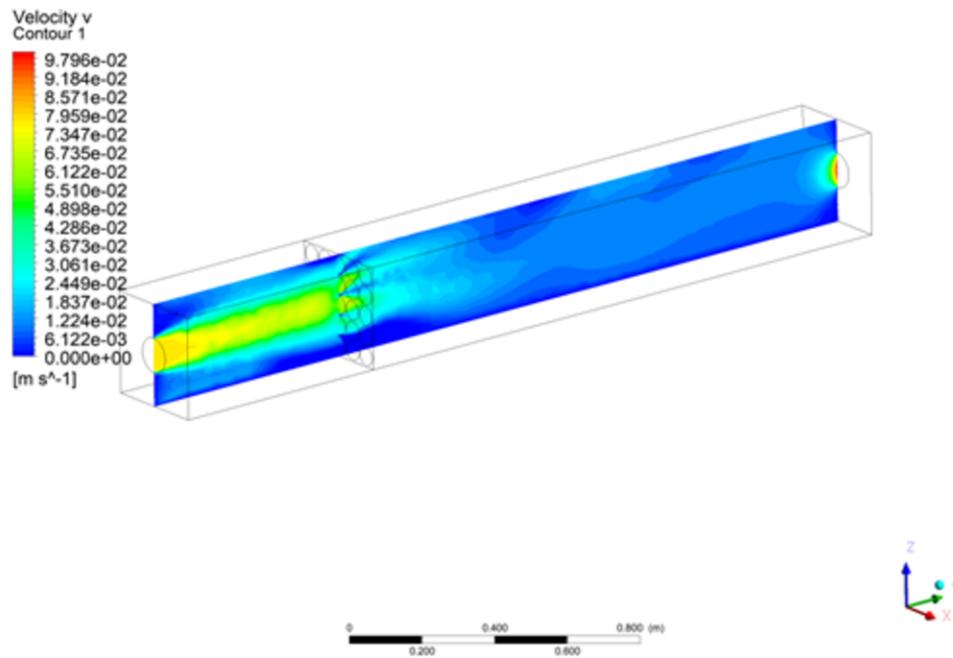
Fonte: Autora (2021).

Conforme indica a Figura 21, a qual mostra um plano central que une o fundo do canal à superfície livre, nas simulações desse grupo, o escoamento foi direcionado à superfície livre em alguns pontos ao longo do canal. É evidente que na Geometria A isso ocorreu de maneira mais uniforme, afinal, com o uso da Geometria B, não houve simetria no fluxo, uma vez que esse aparenta ondulações verticais em seu perfil de

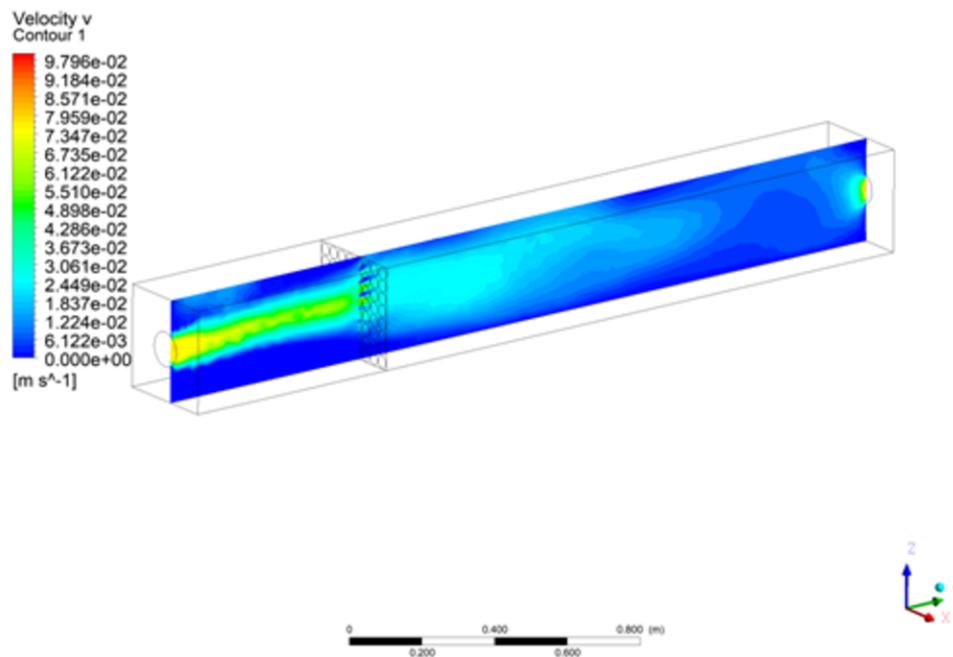
velocidade.

Figura 21 – Grupo 2 - Velocidade no plano vertical

(a) Geometria A



(b) Geometria B



Fonte: Autora (2021).

#### 4.4 COMPARAÇÕES E OBSERVAÇÕES FINAIS

Esta seção visa comparar e discutir os perfis de velocidade e a intensidade de turbulência obtidas para todos os casos simulados. Neste ponto, é necessário selecionar a região na qual os valores serão comparados, portanto, define-se que as análises subsequentes são baseadas em linhas transversais verticais e horizontais para  $y = 1,1$  m a partir da entrada.

É necessário ressaltar que, em virtude do caráter preliminar e qualitativo deste trabalho, as análises desta seção devem ser avaliadas apenas como uma referência, e consideradas de tal forma que os parâmetros quantitativos aqui expostos tenham efeito apenas para comparações qualitativas em relação ao objetivo traçado.

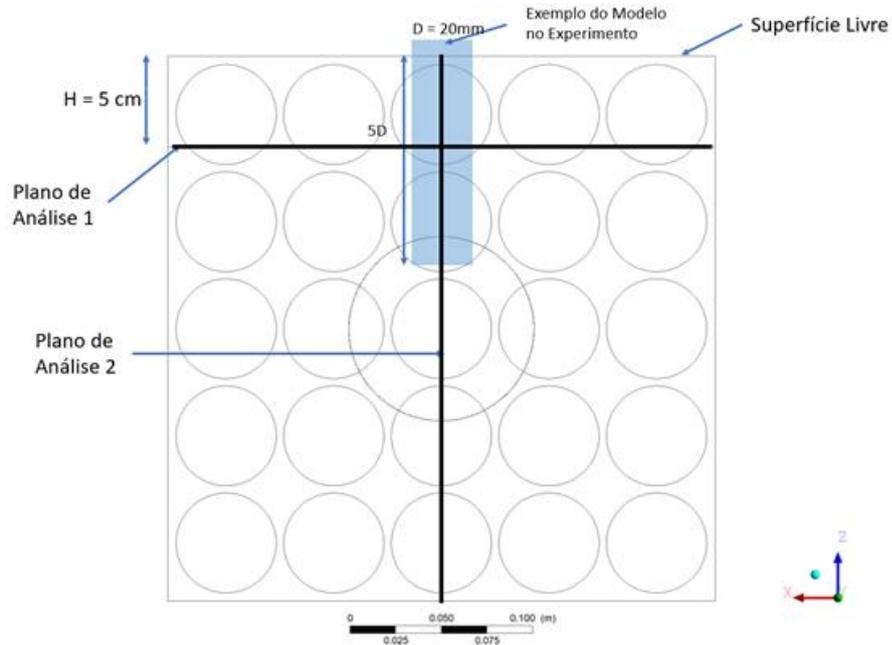
##### 4.4.1 Perfil de velocidade

Como foi mostrado pelas imagens das seções anteriores, cada simulação apresentou um resultado único com valores próprios. Apesar desse trabalho não tratar especificamente de valores, mas trabalhar com uma abordagem qualitativa, é importante padronizar os resultados, por isso os próximos gráficos trazem a velocidade do escoamento como uma porcentagem da velocidade de entrada, como mostrado na Equação 9, em que  $V_A$  é a velocidade adimensional e  $V$  é a velocidade em análise. Vale lembrar que todas as simulações foram conduzidas com velocidade de entrada de 0.08 m/s, que é uma velocidade alta para um canal de baixo Reynolds. A velocidade de entrada será chamada  $U_i$ .

$$V_A = \frac{V}{U_i} * 100 \quad (9)$$

Nesse contexto, considerou-se um modelo experimental cilíndrico de diâmetro igual a 20 mm e uma profundidade de 10 cm para representar a configuração de um experimento e então ponderar se é possível definir uma seção de teste a partir desse trabalho. Esse modelo é posicionado no canal de acordo com a Figura 22. Essa Figura também apresenta uma visão dos dois planos em que estão contidas as linhas transversais para avaliação dos resultados. O primeiro plano de análise (Plano de Análise 1) é horizontal e está a 50 mm de distância da superfície livre, o que contemplaria a metade do modelo. Já o segundo plano de análise (Plano de Análise 2) é vertical e une o fundo do canal à superfície livre no centro do modelo.

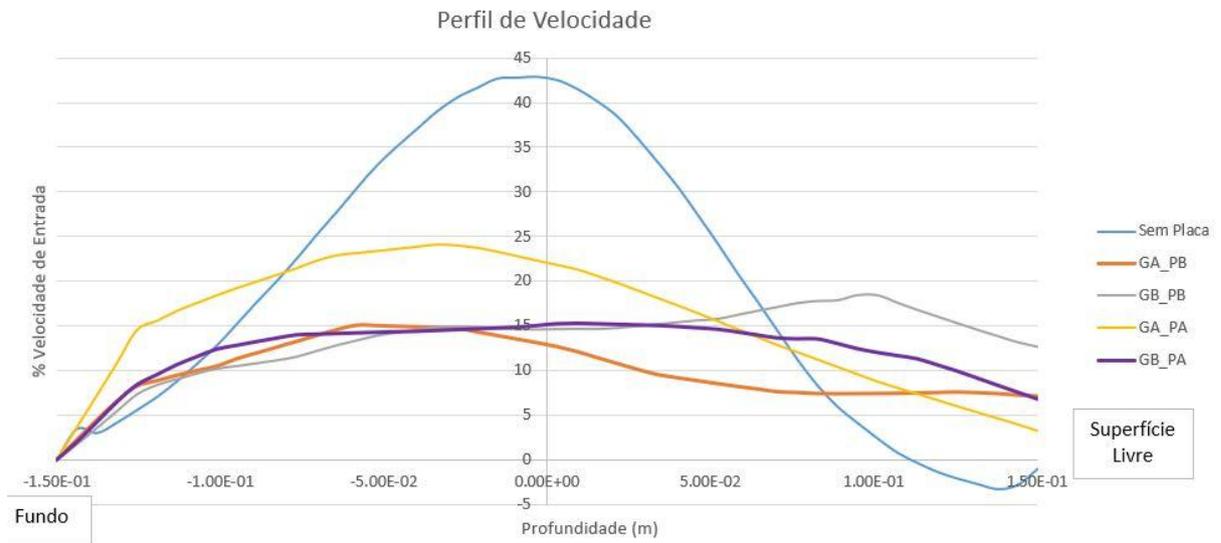
Figura 22 – Vista do modelo experimental e dos planos de análise



Fonte: Autora (2021).

A primeira variável analisada é o perfil de velocidade ao longo da profundidade do tanque, mostrado na Figura 23, em que GA significa Geometria A, PA é a Posição A, GB é a Geometria B e PB é a Posição B. A extrema direita dessa imagem 23 é a superfície livre e a extrema esquerda é o fundo do tanque.

Figura 23 – Comparação no Plano 2 - Perfil de Velocidade



Fonte: Autora (2021).

Na Figura 23, pode-se observar que, em  $y = 1,1m$ , a curva do Caso 0 (sem placa) possui um perfil parabólico, característica proveniente do jato de entrada. Nas demais linhas da imagem, nota-se ausência da aparência de parábola, o que prova a interferência das placas na tendência de uniformização do escoamento. Na região central do canal, a diferença visual mais significativa é entre as linhas azul (Caso 0) e

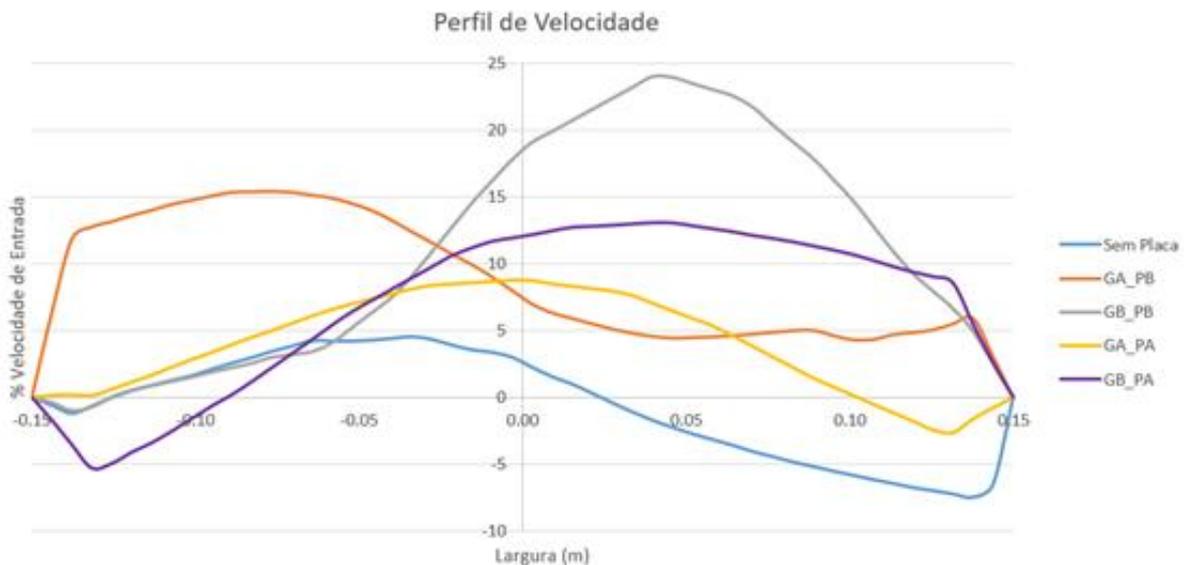
laranja (Caso 3). Já o fundo do canal de recirculação sempre terá velocidades nulas devido à condição de não-escorregamento aplicada.

Conforme já comentado, a região próxima à superfície livre é importante pelo fato de abrigar o modelo. Nessa porção do canal, percebe-se que, para o Caso 0, a velocidade é nula, pois o fluxo ainda está concentrado no centro. Já os casos com placa modificadora têm o escoamento mais distribuído ao longo da seção transversal. Aqui vale ressaltar uma diferença no resultado causada pela localização da placa. A inserção da placa na posição A permite a ocorrência de estagnação do fluido no topo do canal, e conseqüentemente exibe uma velocidade menor na superfície livre. Esse efeito é físico e comum em casos de jatos que desaguam em regiões abertas, como neste trabalho. O mesmo não é visto no Grupo 2 porque a placa está mais distante do *inlet* e distribui melhor o fluido.

Sendo assim, analisando então o perfil de velocidades, a placa de Geometria A na posição B (linha laranja) resultou o perfil com menos variação (o mais próximo de uma constante) na região de interesse – entre 5 e 10 cm da superfície livre.

Prosseguindo com as análises dos perfis de velocidade, a Figura 24 exibe a velocidade no Plano de Análise 1 (olhar Figura 22). Neste plano, é notável a diferença causada pelas diferentes placas. Percebe-se que, as linhas cinza (Caso 4) e roxa (Caso 2) apresentaram os perfis menos uniformes e com maiores variações ao longo do Plano 1.

Figura 24 – Comparação no Plano 1 - Perfil de Velocidade



Fonte: Autora (2021).

Ademais, os perfis de velocidade indicados na Figura 24, em geral, não são simétricos. Houve dificuldade em encontrar resultados confiáveis do perfil de velocidade até mesmo para o caso sem placa, como mostrado na análise de convergência de malha no início desta seção de resultados. Contudo, mais uma vez a solução da Placa

A na Posição B mostrou ser mais constante na região à direita. O fato do perfil de velocidade estar deslocado aqui, pode estar associado a qualidade da malha não estar suficientemente refinada resultando em uma tendência de assimetria na esquerda.

#### **4.4.2 Intensidade de turbulência**

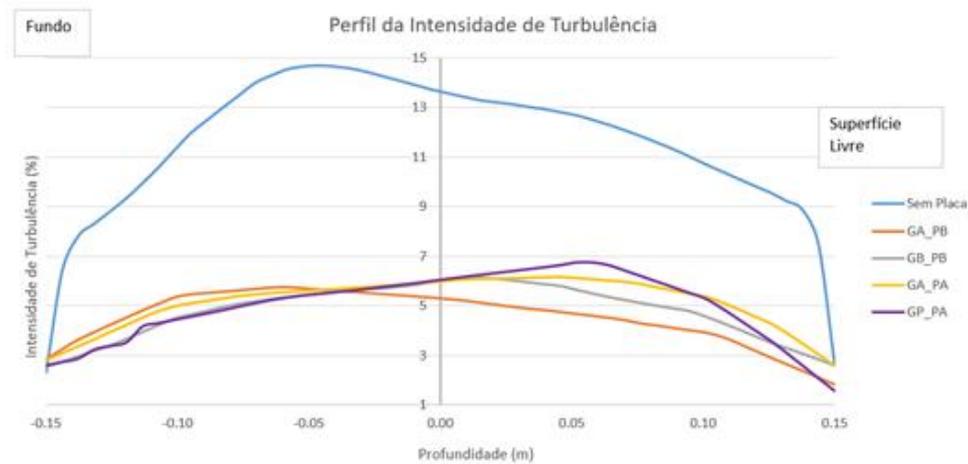
A intensidade de turbulência é mostrada na Figura 25a para o Plano de Análise 1 e na Figura 25b para o Plano de Análise 2 – conforme a Figura 22 explica. É notório que, para ambos os planos, a intensidade turbulenta é maior quando não há qualquer dispositivo modificador de fluxo adicionado no canal. A inserção da placa perfurada gerou modificações significativas nos perfis dessa variável.

Além disso, outro ponto que merece destaque é a uniformidade da intensidade de turbulência tanto ao longo da profundidade quanto da largura da seção transversal. Para os dois gráficos, as linhas dos Grupos 1 e 2 são achatadas.

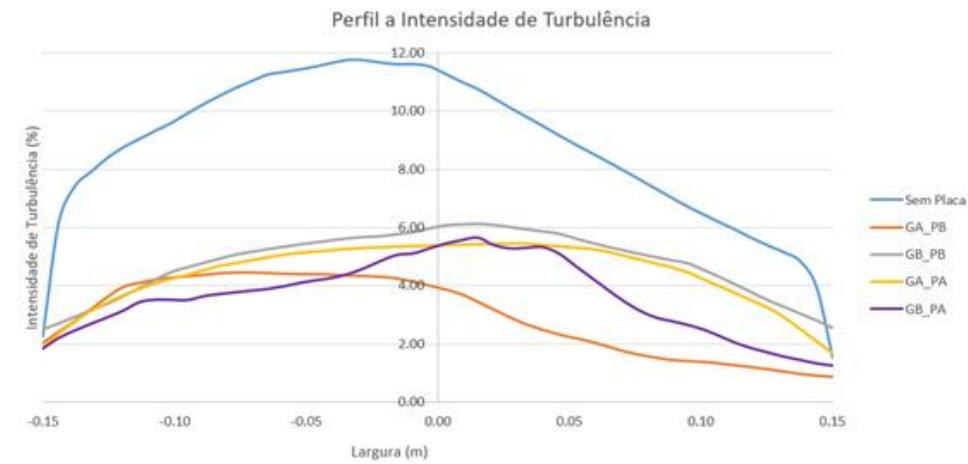
Embora as curvas apresentadas (com exceção das azuis), especialmente aquelas contidas na Figura 25a, tenham se mostrado muito próximas entre si, afirma-se que novamente, a utilização da Placa A na Posição B mostrou ser a mais eficaz na redução e controle desta variável.

Vale salientar que os resultados da intensidade de turbulência haviam sido mais precisos entre si também na convergência de malha apresentada anteriormente para o canal de recirculação sem placa.

Figura 25 – Comparação: Intensidade de turbulência  
(a) Plano 1



(b) Plano 2



Fonte: Autora (2021).

#### 4.5 SEÇÃO DE TESTE

Esta seção visa comentar sobre a especificação de uma região de teste para o canal de água recirculante.

Com base nos resultados obtidos e apresentados até aqui, comprova-se que existe uma configuração geometria-localização que satisfaça os objetivos desse trabalho, isto é, possui a capacidade de reduzir a intensidade de turbulência e proporcionar certa uniformidade ao escoamento à jusante da placa. No entanto, com apenas um modificador de fluxo não foi possível determinar uma região suficientemente larga, profunda e comprida para permitir a realização de experimentos hidrodinâmicos com a qualidade e padronização de escoamento necessárias. Sendo assim, esse estudo não definiu uma seção de teste para este canal de recirculação.

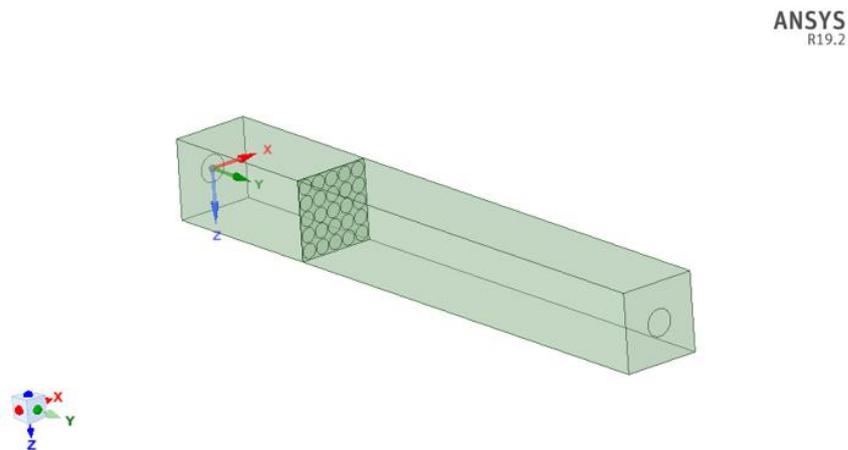
A não uniformidade do escoamento ao longo de uma faixa de comprimento se

deve ao fato da entrada do escoamento ser um jato de água, que se mostrou muito brusco para ser estabilizado com apenas uma placa modificadora de fluxo. A adição de mais placas tornaria a distribuição mais eficiente. Outra solução é a adição de uma manga perfurada, ou dispositivo injetor de fluido, que distribui o fluxo de entrada ao invés de deixá-lo como um jato de água.

#### 4.6 SELEÇÃO DO CONJUNTO GEOMETRIA-POSIÇÃO DA PLACA PERFURADA

Conforme comentado ao longo desse capítulo, após observar os resultados de todas as simulações, percebe-se que o conjunto formado por Geometria A e Posição B, testado pela simulação 3, é o que desempenhou sua função de maneira mais eficiente. Essa configuração é indicada nas seções anteriores pela linha laranja nas Figuras 21, 22 e 23. A Figura 26 apresenta o conjunto selecionado.

Figura 26 – Conjunto selecionado: Geometria A e Localização B

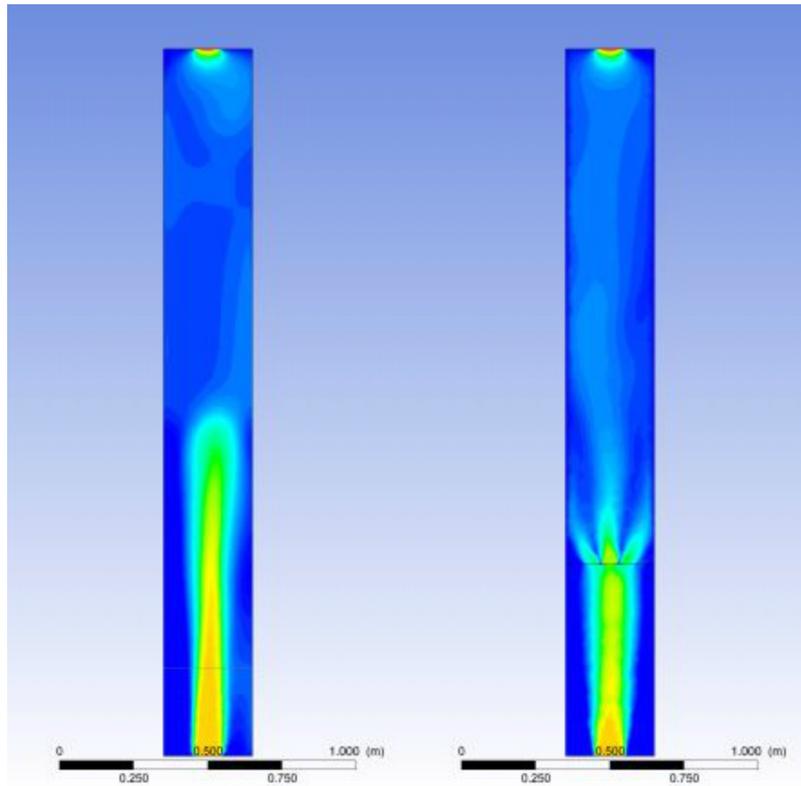


Fonte: Autora (2021).

Para demonstrar a interferência considerável que esse modelo causou no escoamento do canal de recirculação, apresentam-se a Figura 27, que traz lado a lado os perfis de velocidade, em um plano horizontal posicionado a 10 cm da superfície livre, do caso 0 (à esquerda) e do caso escolhido (à direita), e também, analogamente para a intensidade de turbulência, a Figura 28.

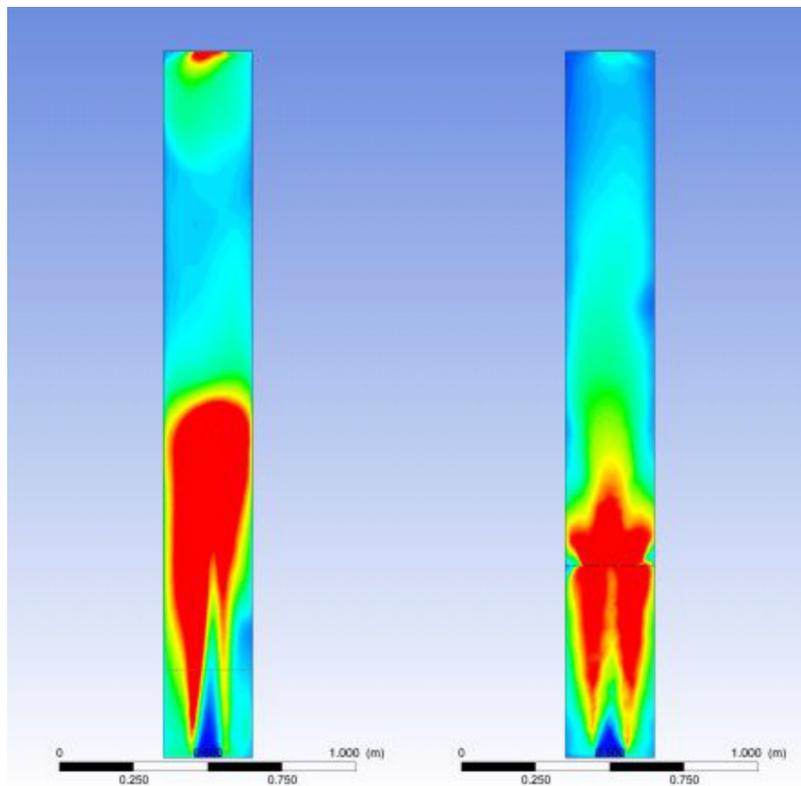
Ao refletir sobre essas imagens, nota-se que a inserção da placa dissipa o formato de jato, que no canal simples se estende até metade do comprimento do canal. Assim, o escoamento é melhor distribuído próximo às paredes, não permanecendo concentrado na região central e o fenômeno de estagnação é atenuado.

Figura 27 – Comparação dos casos 0 e 3: Perfil de velocidade



Fonte: Autora (2021).

Figura 28 – Comparação dos casos 0 e 3: Intensidade de turbulência



Fonte: Autora (2021).

## 5 CONCLUSÕES

Este trabalho avaliou, de maneira preliminar, a interferência da adição de um modificador de fluxo no escoamento de um canal de recirculação de baixo Reynolds e baixo custo por intermédio de um possível modelo destinado à análises via Dinâmica dos Fluidos Computacional. As simulações se dividiram em três grupos: o primeiro contém a simulação do canal sem nenhum utensílio a fim de servir como referência, e os demais englobam testes com duas geometrias e duas localizações de um modificador em formato de placa perfurada. Com isso, o objetivo era verificar a capacidade da placa em reduzir a intensidade de turbulência e também uniformizar o perfil de velocidade do escoamento de maneira geral. Para que isso fosse possível, o *software* ANSYS foi utilizado desde a concepção da geometria até a análise dos resultados.

Nesse contexto, os Grupos 1 e 2 representavam a Localização A (a 30 cm da entrada do tanque) e a Localização B (a 65 cm da entrada), respectivamente. As geometrias foram modeladas de tal modo a possuírem a mesma razão de permeabilidade ( $RP = 68,4\%$ ), apesar de a Geometria A ser constituída por 25 furos de 56 mm de diâmetro e a Geometria B por 64 furos de 35 mm de diâmetro. Quanto à geração da malha, foi encontrada dificuldade em construir uma malha que discretizasse o domínio de maneira razoável e, simultaneamente, mantivesse a quantidade de nós e elementos dentro da capacidade computacional disponível. Por esse motivo, não foi possível simular malhas mais refinadas. O mesmo se aplica para a tolerância dos valores residuais, que foram limitados a  $1 \times 10^{-3}$ .

Em termos qualitativos, analisando-se então os resultados pertinentes a essas simulações, a respeito do comportamento do escoamento, foram observadas regiões de estagnação próximas à superfície livre. Para evitar esse efeito, é indicado que o duto de entrada do fluido seja posicionado mais próximo à superfície livre ou seja aumentada a área de entrada e saída do fluido no canal. Observou-se, ainda, desvio de direção do escoamento e regiões de refluxo.

Com relação à qualidade da velocidade do escoamento na provável região de testes (à jusante da seção média do comprimento do canal), os resultados mostraram que as placas posicionadas mais próximas da entrada do fluido resultam em regiões maiores de estagnação, diminuindo a velocidade próximo à superfície livre. Já as placas posicionadas em B conseguiram restringir esse efeito ao proporcionarem melhor distribuição do escoamento tanto na seção transversal, quanto ao longo do canal.

Além disso, observou-se a alta eficiência das placas na redução da intensidade de turbulência e sua importância no projeto do sistema do tanque, se comparado com o caso simulado sem modificadores de fluxo. Notou-se ainda que, para a profundidade de

10 cm a partir da superfície livre, todas as simulações contendo placas apresentaram resultados parecidos entre si. Isso indica que, para haver outra variação brusca, como quando comparado ao caso 0, deve-se propor outra configuração, como, por exemplo, a adição de uma segunda placa perfurada no canal de recirculação.

Desta forma, diante do exposto até aqui, acredita-se que o presente trabalho teve seus objetivos atingidos dentro das possibilidades de geração de malha e simulação numérica oferecidas pelo computador utilizado, o qual é de uso pessoal e possui recursos limitados. Assim, tem-se que a opção que entregou os resultados mais satisfatórios dentre todas foi a aplicação de furos maiores porém em menor quantidade, agregada a uma distância maior da entrada do fluido, isto é a associação da Geometria A com a Posição B, testada pela simulação 3 (Grupo 2). Contudo, a seção de testes não foi completamente definida uma vez que, apesar de os objetivos terem sido alcançados, os perfis encontrados ainda não são quantitativamente ideais para a realização de experimentos hidrodinâmicos. No entanto, acredita-se que os resultados apresentados indicam uma tendência de que, com novas simulações mais aprofundadas, a seleção de uma seção de testes será possível.

Portanto, para trabalhos futuros é recomendado que sejam construídas malhas mais precisas, com maior refinamento próximo às regiões de parede e com elementos de maior qualidade ortogonal para melhor atender aos critérios do ANSYS e do modelo de turbulência aplicado. Acredita-se que dessa forma é possível diminuir os valores residuais e garantir mais precisão e exatidão dos resultados. Quanto às condições de contorno, é válido se utilizar do alongamento da face de saída, transformando-a em um duto, para aplicar a condição de *pressure-outlet*, a fim de comparar resultados e verificar se as simulações respeitam as restrições impostas de maneira correta. Outra sugestão é ampliar a área da face de saída do canal, a fim de reduzir a possibilidade de refluxo naquela região.

Adicionalmente, para reduzir ainda mais a intensidade de turbulência e melhorar a uniformização do escoamento, a ponto de que seja possível definir uma seção de teste de qualidade, sugere-se que seja inserida no canal de recirculação uma manga injetora de fluido conectada ao orifício de entrada - a fim de atuar como um dispositivo distribuidor de fluxo, evitando que o escoamento adentre o canal como um jato. Ou, ainda, pode-se combinar a placa existente com uma ou mais placas perfuradas ou telas no tanque, conforme recomendado por Kulak, Olasek e Karczewski (2012) e Pullinger e Sargison (2007). Também é interessante realizar o estudo da convergência de malha para todos os casos simulados.

## REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, O. d. et al. Low subsonic wind tunnel-design and construction. **Journal of Aerospace Technology and Management**, SciELO Brasil, v. 10, 2018.
- ANSYS INC, U. **ANSYS Fluent Theory Guide**. [S.I.], 2013.
- ASSI, G. R. S. **Estudo experimental do efeito de interferência no escoamento ao redor de cilindros alinhados**. 276 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica e Energia e Fluidos) — Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.
- BATCHELOR, G. **An introduction to fluid dynamics**. [S.I.]: Cambridge University Press, 2000. 615 p.
- BRUSCA, S.; LANZAFAME, R.; MESSINA, M. Low-speed wind tunnel: design and build. **Wind tunnels: aerodynamics, models and experiments**, Nova Science, New York, NY, USA, p. 189–220, 2011.
- BUSNARDO, E. R. **Projeto Conceitual de um Canal de Água Circulante para Pesquisas de Interação Fluido-Estrutura na UFSC – Campus de Joinville**. 82 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Naval) — Centro Tecnológico de Joinville, Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2015.
- CENGEL, Y. A.; CIMBALA, J. M. **Mecânica dos fluidos-3**. [S.I.]: Amgh Editora, 2015.
- DRYDENH, . L.; SCHUBAUEGR., G. . The use of damping screens for the reduction of wind-tunnel turbulence. **Aero Sci**, XXXXX, p. 221–228, 1947.
- FERZIGER J. H.; PERIC, M. **Computational Methods for Fluid Dynamics**. 3. ed. Nova lorque: Springer, 2002.
- FOX, R. W.; PRITCHARD, P. J.; MCDONALD, A. T. **Introdução À Mecânica Dos Fluidos** . 6. ed. [S.I.]: Grupo Gen-LTC, 2006.
- GROTH, J.; JOHANSSON, A. V. Turbulence reduction by screens. **Journal of Fluid Mechanics**, Cambridge University Press, v. 197, p. 139–155, 1988.
- KARTHIK, T.; DURST, F. Turbulence models and their applications. **10th Indo German Winter Academy**, p. 1–52, 2011.
- KULAK, M.; OLASEK, K.; KARCZEWSKI, M. Reduction of wind tunnel turbulence intensity level by installation of a honeycomb straightener – cfd simulation vs. experiment. **Proceedings of the XX Fluid Mechanics Conference KKMP2012**, 2012.
- POPE, S. et al. **Turbulent Flows**. [S.I.]: Cambridge University Press, 2000.
- PULLINGER, M.; SARGISON, J. Using cfd to improve the design of a circulating water channel. **16th Australasian Fluid Mechanics Conference**, 2007.
- RUTLEDGE, J.; FRENCH, J. J. Design and analysis of a water channel for characterization of low reynolds number flows. **Advances in Technology Innovation**, Taiwan Association of Engineering and Technology Innovation, v. 3, n. 3, p. 101, 2018.

SCHEIMAN, J. **Considerations for the installation of honeycomb and screens to reduce wind-tunnel turbulence**. [S.l.]: National Aeronautics and Space Administration, 1981. 60 p.

VON SCHWIND, J. J. **Geophysical fluid dynamics for oceanographers**. [S.l.]: Prentice Hall, 1980.

SOUZA JOSÉ FRANCISCO ALMEIDA DE OLIVEIRA, L. R. d. A. J. L. L. d. S. I. D. M. M. M. Uma revisão sobre a turbulência e sua modelagem. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 29, p. 21 – 41, 03 2011. Disponível em: [http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0102-261X2011000100002&nrm=iso](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0102-261X2011000100002&nrm=iso).

SUAREZ, C. J. et al. Development of a multicomponent force and moment balance for water tunnel applications, volumes i and ii. **NASA Contractor Report**, v. 4642, p. 2–0, 1994.

VERSTEEG, H. K.; MALALASEKERA, W. **An introduction to computational fluid dynamics: the finite volume method**. [S.l.]: Pearson education, 2007.