

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

PATRICK ALEXANDRE BATISTA

ALGORITMO PARA AUTOMATIZAÇÃO DA GERAÇÃO DE MALHA E SIMULAÇÃO
DO ESCOAMENTO EM TORNO DE CILINDROS TANDEM COM USO DE
FERRAMENTAS DE CÓDIGO LIVRE

Joinville

2022

PATRICK ALEXANDRE BATISTA

ALGORITMO PARA AUTOMATIZAÇÃO DA GERAÇÃO DE MALHA E SIMULAÇÃO
DO ESCOAMENTO EM TORNO DE CILINDROS TANDEM COM USO DE
FERRAMENTAS DE CÓDIGO LIVRE

Trabalho apresentado como requisito para
obtenção do título de bacharel no Curso de
Graduação em Engenharia Aeroespacial
do Centro Tecnológico de Joinville da
Universidade Federal de Santa Catarina.

Orientador: Filipe Dutra da Silva, Dr. Eng.

Joinville

2022

PATRICK ALEXANDRE BATISTA

ALGORITMO PARA AUTOMATIZAÇÃO DA GERAÇÃO DE MALHA E SIMULAÇÃO
DO ESCOAMENTO EM TORNO DE CILINDROS TANDEM COM USO DE
FERRAMENTAS DE CÓDIGO LIVRE.

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

Joinville (SC), 13 de dezembro de 2022.

Banca Examinadora:

Dr. Filipe Dutra da Silva
Orientador/Presidente

Dr. André Luís Condino Fugarra
Membro
Universidade Federal de Santa Catarina

Dr. Juan Pablo de Lima Costa Salazar
Membro
Universidade Federal de Santa Catarina

Dedico este trabalho a meu noivo e família.

RESUMO

Os fenômenos associados à geração de arrasto em cilindros em tandem são encontrados em diferentes aplicações de engenharia como plataformas offshore na indústria oceânica, ou trens de pouso de aeronaves. Simulações em mecânica dos fluidos computacional são utilizadas no projeto de tais sistemas e a etapa de geração de malha é crucial para a qualidade dos resultados obtidos. Tendo em vista sua otimização, é proposto um algoritmo para geração automatizada da geometria e malha, utilizando ferramentas de código aberto, como o OpenFOAM e o snappyHexMesh. Critérios de qualidade são estabelecidos e estudos de refino de malha na esteira dos cilindros e na região da camada limite são conduzidos, assim como a análise da influência da largura do domínio nos resultados. Tais análises visam buscar uma solução de compromisso entre acurácia e custo computacional. Para fins de validação, os resultados são confrontados com dados experimentais da literatura para os coeficientes de arrasto, pressão e perfis de velocidade na esteira. Pode-se concluir que, apesar das limitações, foram obtidos resultados próximos aos experimentais. Desta forma o modelo apresentado mostra-se uma boa ferramenta para análises iniciais durante o projeto de sistemas de engenharia.

Palavras-chave: Automatização de Malhas. CFD. Cilindros em Tandem.

ABSTRACT

The phenomena associated with the generation of drag on tandem cylinders are found in different engineering applications such as offshore platforms in the naval industry, or aircraft landing gear. Simulations in computational fluid mechanics are used in the design of such systems and the mesh generation step is crucial for the quality of the obtained results. In view of optimization it, an algorithm for automated generation of geometry and mesh is proposed, using open-source tools, such as OpenFOAM and snappyHexMesh. Quality criteria are adopted and mesh refinement studies in the cylinder wake and in the boundary layer region are controlled, as well as the analysis of the influence of the domain width on the results. Such analyses aim to find a compromise between accuracy and computational cost. For validation purposes, the results are compared with experimental data from the literature for drag coefficients, pressure and velocity profiles in the wake region. It can be concluded that, despite the limitations, results close to the experimental ones were obtained. In this way, the presented model proves to be a good tool for initial analysis during the design of engineering systems.

Key-words: Mesh Automatization. CFD. Tandem Cylinders.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	–	Malha para um estudo de uma plataforma semissubmersível com uso da técnica de simulação de cilindros.....	12
Figura 2	–	Configurações para diferentes distâncias L para cilindros em Tandem.....	15
Figura 3	–	Cilindros em tandem do experimento de Lockard et al. (2007).....	21
Figura 4	–	Domínio computacional do caso.....	22
Figura 5	–	Áreas de refino local para uma malha genérica. (a) Com destaque das regiões. (b) Sem destaque das regiões.....	26
Figura 6	–	Fluxograma do processo.....	28
Figura 7	–	Coeficiente de pressão médio para o cilindro 1 nos casos base.....	35
Figura 8	–	Coeficiente de pressão médio para o cilindro 2 nos casos base.....	35
Figura 9	–	Detalhamento na camada prismática da malha A no cilindro 1.....	37
Figura 10	–	Valores de coeficiente de pressão para os casos de validação. (a) Cilindro 1. (b) Cilindro 2.....	39
Figura 11	–	Valores de C_p RMS para os casos de validação (a) Cilindro 1. (b) Cilindro 2.....	39
Figura 12	–	Perfil da velocidade média na direção do escoamento medida entre os cilindros.....	40
Figura 13	–	Comparação de C_p do caso de validação com dados experimentais para (a) Cilindro 1. (b) Cilindro 2.....	42
Figura 14	–	Comparação de C_p RMS do caso de validação com dados experimentais para (a) Cilindro 1. (b) Cilindro 2.....	42
Figura 15	–	Média da velocidade na direção do escoamento medida entre os cilindros para a malha A comparados a dados experimentais.....	42
Figura 16	–	Perfil de velocidades normalizadas pela velocidade U_0 medidas na linha de centro $y = 0$ comparados a dados experimentais com zero	

	do sistema de coordenadas no centro do segundo cilindro. (a) U_x/U_0 . (b) U_y/U_0	43
Figura 17 –	(a) Perfil de velocidades normalizado pela velocidade U_0 medido em $X = 4,45D$ e comparados a dados experimentais de Jenkins <i>et al.</i> (2005). (a) na direção do escoamento. (b) Normal ao escoamento.....	44
Figura 18 –	Magnitude de velocidade instantânea no plano YX. (b) Magnitude de velocidade instantânea no eixo plano para um corte feito ao centro dos cilindros.....	45
Figura 19 –	Pressão instantânea no plano (a) YX. (b) ZX.....	46
Figura 20 –	Coeficiente de pressão médio analisado a partir da circunferência. (a) Cilindro 1. (b) Cilindro 2.....	47
Figura 21 –	Magnitude da velocidade instantânea vista no plano (a) YX. (b) ZY.....	48
Figura 22 –	Pressão instantânea no plano (a) YZ. (b) YZ.....	48

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Descrição das variáveis das equações (2) e (3).....	17
Quadro 2 – Parâmetros do arquivo “fvSchemes” para o caso.....	23
Quadro 3 – Descrição das condições de contorno para as variáveis do caso.....	24
Quadro 4 – Variáveis do algoritmo.....	29

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 –	Valores das variáveis da equação 12.....	18
Tabela 2 –	Nível de refinamentos locais para os casos definidos.....	25
Tabela 3 –	Variáveis definidas para o algoritmo.....	27
Tabela 4 –	Comparações de arrasto entre os casos base.....	34
Tabela 5 –	Número de elementos e espessura total da camada prismática para as malhas estudadas.....	36
Tabela 6 –	Resultados de y^+ para as malhas estudadas.....	36
Tabela 7 –	Valores das variáveis turbulentas.....	37
Tabela 8 –	Coeficientes de arrasto para as malhas A, B, C, D e E nos cilindros 1 e 2.....	38
Tabela 9 –	Comparações de arrasto entre os casos de validação.....	41
Tabela 10 –	Arrasto para simulação de malha com distância entre cilindros de $L = 1,435D$ comparado aos dados experimentais.....	46

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CFD – *Computational Fluid Dynamics*

LabCC – Laboratório de Computação Científica

LaSIN – Laboratório de Simulação Naval

OpenFOAM – *Open-source Field Operation and Manipulation*

RANS – *Reynolds Averaged Navier-Stokes*

RMS – *Root Mean Square*

SST – *Shear Stress Transport*

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Área de seção transversal
A_1	Constante do modelo de turbulência 1
β	Constante do modelo de turbulência 2
β^*	Constante do modelo de turbulência 3
CD_ω	Constante do modelo de turbulência 4
c_d	Coefficiente de arrasto
c_f	Coefficiente de fricção
c_p	Coefficiente de pressão
D	Diâmetro dos cilindros
δ_{99}	Espessura da camada limite
δ_{ij}	Delta de Kronecker
σ_k	Número turbulento de Schmidt k
σ_ω	Número turbulento de Schmidt ω
σ_{ω_2}	Número turbulento de Schmidt ω_2
ξ	Constante de modelo turbulento
F_1	Função mistura de modelo 1
F_2	Função mistura de modelo 2
F_d	Força de arrasto
k	Energia cinética turbulenta
κ	Constante de Von Kármán
L	Distâncias entre centros dos cilindros em Tandem
l	Comprimento característico
N	Número de camadas prismática
P	Pressão
ρ	Densidade
P_k	Termo de produção de energia cinética turbulenta
P_ω	Termo de produção dissipação específica
r	Taxa de crescimento dos elementos da camada prismática
r_{max}	Taxa máxima de crescimento dos elementos da camada prismática
R	Tensor tensão

Re	Número de Reynolds
S_{ij}	Tensor taxa de deformação
S_u	Fonte de momento
T	Escala de tempo
τ_{ij}	Tensores de Reynolds
τ_w	Tensão de cisalhamento na parede
U_0	Velocidade de escoamento livre
μ	Viscosidade dinâmica
μ_T	Viscosidade turbulenta
u_t	Velocidade de fricção
ν	Viscosidade cinemática
ν_T	Viscosidade cinemática turbulenta
ω	Dissipação específica
y^+	yPlus
γ	Coeficiente do modelo de turbulência
y_h	Altura da primeira célula
y_p	Distância até o centroide da célula adjacente a parede
y_t	Espessura das duas primeiras camadas
y^+	Razão entre influências laminares e turbulentas

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	11
1.1. OBJETIVOS	12
1.1.1. Objetivo Geral	12
1.1.2. Objetivos Específicos	13
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	14
2.1. ESCOAMENTOS EM CILINDROS EM TANDEM	14
2.2. MODELOS DE TURBULÊNCIA	15
2.2.1. Equacionamento do modelo– $k-\omega$ SST.	16
3. METODOLOGIA	20
3.1. PROGRAMAS DE CÓDIGO ABERTO	20
3.2. PARAMETRIZAÇÃO	21
3.2.1. Parametrização de dois cilindros em tandem.....	21
3.2.2. Esquemas de solução.....	22
3.2.3. Condições de contorno.	23
3.3. MALHAS DE ESTUDO.....	24
3.3.1. Métodos de análise.	25
3.4. O ALGORITMO.	27
3.4.1. Fluxograma.	27
3.4.2. Variáveis do algoritmo.	28
3.4.3. Equações.	29
<u>3.4.3.1. Cálculo das camadas prismáticas</u>	<u>29</u>
<u>3.4.3.2. Estimativas para os valores iniciais das variáveis da turbulência.....</u>	<u>32</u>
4 RESULTADOS	34
4.1. RESULTADOS DOS CASOS DE BASE.	34
4.2. RESULTADOS DO ALGORITMO.	35
4.3. TESTE DE REFINOS E CAMADAS PRISMÁTICAS.....	38
4.4. VALIDAÇÃO COM RESULTADOS EXPERIMENTAIS.	40
4.5. ANÁLISE DOS MAPAS DE CONTORNO.	44
4.6. VARIAÇÃO DA DISTÂNCIA ENTRE CILINDROS.	45
5 CONCLUSÃO	49
REFERÊNCIAS	51

1. INTRODUÇÃO

A mecânica dos fluidos computacional (CFD - *computational fluid dynamics*), consiste na análise de sistemas envolvendo escoamento de fluídos, transferência de calor e fenômenos associados, tais como reações químicas por meio de simulações computacionais (MALALASEKERA; VERSTEEG, 2007).

A simulação numérica pode ser dividida em definição de geometria, criação e geração da malha, simulação e pós processamento. Dessas, a geração é a mais demorada computacionalmente, tornando-se assim um objeto de estudos fundamental na otimização de malhas. Para Ferziger e Peric (2001), a malha é a representação discreta do domínio geométrico no qual o problema será resolvido, dividindo o domínio em um número finito de subdomínios. Suas configurações são inúmeras, podendo ser estruturadas, não estruturadas, em duas ou três dimensões (2D e 3D), tetraédrica, triangular, hexaédrica e dezenas outras mais, e ainda com combinações diferentes entre essas configurações.

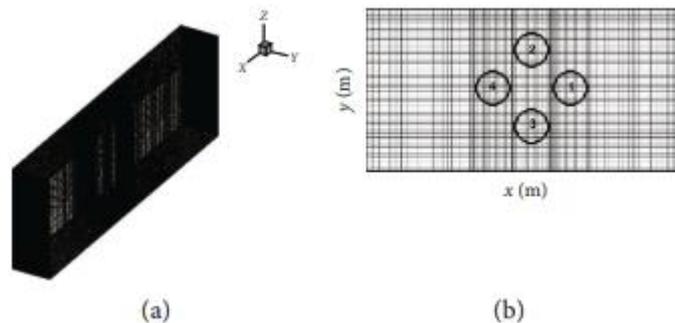
Dentro da simulação computacional, deve-se levar em conta a diferença do valor alvo encontrado em dados experimentais e a simulação computacional (MALALASEKERA; VERSTEEG, 2007). Quanto menor a diferença, mais próxima da realidade são os resultados. Para alcançar esse feito, o aumento do refino da malha, ou seja, aumentar o número de subdomínios, é essencial.

Com o aumento de subdomínios, conseqüentemente, há aumento de custo computacional, tempo de processamento, e também de erros onde, devido a elementos pontiagudos, camadas prismáticas com má formação e cantos vivos, a rotina de simulação tende a divergir da solução (MALALASEKERA; VERSTEEG, 2007). Uma solução para contornar esse problema são malhas padronizadas, onde serão geradas a partir de uma dimensão característica, gerando refinamentos locais e de camadas prismáticas que façam sentido ao problema.

O estudo de cilindros em escoamento cruzado tem grande importância na literatura, tendo aplicações em diversas áreas da engenharia, como: plataformas offshore, cabos de transmissão, torres de resfriamento, trocadores de calor, e afins (Dehkordi, 2011). Autores como Zdravkoich (1985) fizeram estudos de como a influência de tubos em tandem alteram o escoamento à jusante e à montante, chegando em conclusões de como a distância entre os cilindros influenciam na

geração de vórtices. Já outros autores como Nouri *et al.* (2021), fizeram estudos de plataformas semissubmersíveis, simulando quatro cilindros alinhados, usando uma malha computacional otimizada, como visto na Figura 1. Este estudo destaca a importância da configuração dos cilindros dentro da malha computacional para obter bons resultados.

Figura 1 – Malha para um estudo de uma plataforma semissubmersível com uso da técnica de simulação de cilindros.



Fonte: Nouri *et al.* (2021).

Dada a relevância do problema, é proposto um algoritmo escrito em linguagem Python que calcule os parâmetros necessários para gerar uma malha computacional que traga equilíbrio entre acurácia e custo computacional. Com o uso de ferramentas de código aberto como Opensource Field Operation And Manipulation (OpenFOAM) e snappyHexMesh, o algoritmo se torna uma ferramenta de uso geral, que poderá ser usada em diversas áreas da engenharia, como na análise de plataformas semissubmersíveis ou trens de pouso.

1.1. OBJETIVOS

Para resolver a problemática da geração de malha em arranjos de cilindro tandem alinhados em relação ao escoamento, propõe-se os seguintes objetivos.

1.1.1. Objetivo Geral

Desenvolver um procedimento para geração de malha em arranjos de cilindros tandem utilizando ferramentas de código aberto.

1.1.2. Objetivos Específicos

- Elaborar um algoritmo para automatização da geração de geometria e malha;
- Validar um modelo de simulação para um caso de cilindros alinhados em tandem, através de comparações com dados experimentais.
- Analisar o impacto dos refinamentos locais na malha, nas regiões das esteiras e da camada limite;

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Nestes capítulos, são discutidos os principais conceitos teóricos envolvidos no desenvolvimento do trabalho.

2.1. ESCOAMENTOS EM CILINDROS EM TANDEM

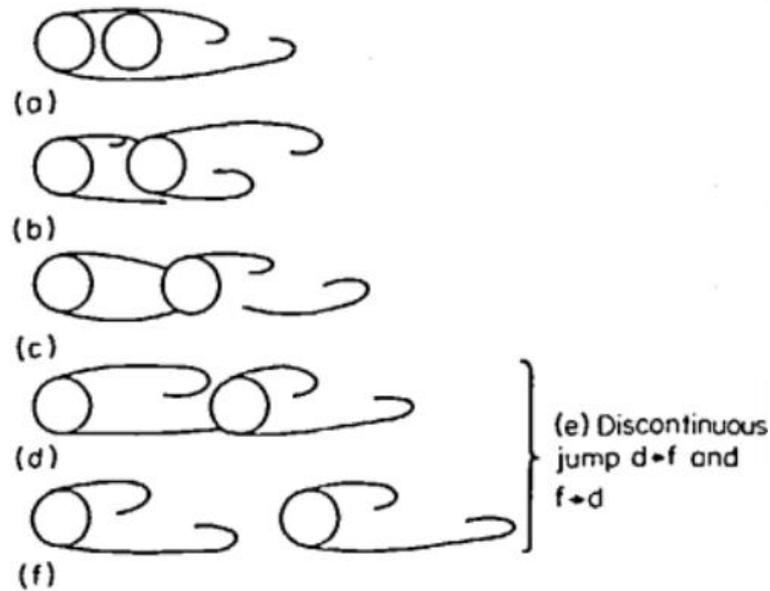
Podemos definir os cilindros tandem como dois cilindros de mesmo diâmetro D , posicionados em um escoamento em uma linha de mesma altura e separados entre si por uma distância L . Também podemos chamá-los de cilindros em linha.

A formação de vórtices entre dois cilindros em tandem é de alta complexidade, e a distância entre os centros L é um dos principais parâmetros que governam a dinâmica do escoamento ao redor dos cilindros (Alam; Meyer, 2011). Para entender a influência da distância L , Zdravkoich (1985) fez um estudo considerando diferentes afastamentos entre cilindros (L/D).

Na Figura 2 são mostrados os diferentes estudos feitos por Zdravkoich (1985). Na configuração (Figura 2a), em que há um espaçamento L/D menor do que 1,1, acontece desprendimento de vórtices apenas à jusante do cilindro traseiro. Quando o espaçamento fica na faixa $1,1 < L/D < 1,6$ (Figura 2b), ocorre um comportamento oscilatório no recolamento das camadas de cisalhamento da esteira do cilindro dianteiro, na região frontal do cilindro traseiro. Ainda nos estudos de Zdravkoich (1985), na configuração 2c ($1,6 < L/D < 2,4$) é observado um comportamento quase estável no recolamento das camadas de cisalhamento no cilindro traseiro.

Já para a configuração 2d, quando $L/D = 2,5$ ocasionalmente ocorre a interrupção de um dos recolamentos, porém sem desprendimento regular de vórtices à jusante do cilindro dianteiro. Na faixa $3,2D < L < 3,8D$ surge um comportamento biestável, onde o desprendimento de vórtices à jusante do cilindro frontal persiste por algum tempo e então é intermitentemente suprimido e substituído pela ocorrência de recolamento das camadas cisalhantes no cilindro traseiro.

Figura 2 – Configurações para diferentes distâncias L para cilindros em Tandem.



Fonte: Zdravkovich (1985).

2.1.1 Coeficiente de arrasto em cilindro.

O coeficiente de arrasto é uma quantificação adimensional que é usada para medir o arrasto ou resistência de um objeto em um escoamento (YUCE e KAREEM, 2016). Yuce e Kareem definem o coeficiente de arrasto como:

$$C_D = \frac{F_d}{\frac{1}{2}\rho U_0^2 A}, \quad (1)$$

onde F_d é a força de arrasto, ρ a densidade do fluido, U_0 a velocidade característica do escoamento e A é a área de seção transversal projetada. Os autores destacam a grande dependência do arrasto do cilindro com o valor de Reynolds do escoamento, que é diretamente ligado à natureza do cilindro a jusante do cilindro.

2.2. MODELOS DE TURBULÊNCIA

Em um escoamento, definimos o número de Reynolds como a medida das forças inerciais, em relação às forças viscosas (VERSTEEG; MALALASAKERA, 2007). Quando um escoamento apresenta um número de Reynolds superior ao

número de Reynolds crítico, o escoamento tem uma mudança drástica de características, tornando-se turbulento (VERSTEEG; MALALASAKERA, 2007).

O escoamento turbulento possui comportamento tridimensional (VERSTEEG; MALALASAKERA, 2007). As características caóticas das flutuações de velocidade do escoamento turbulento favorecem a mistura de diferentes regiões de fluido, intensificando, desta forma, a difusão de calor, quantidade de movimento, etc.

Escoamentos turbulentos apresentam flutuações com amplas faixas de escalas de comprimento e tempo, fazendo com que simulações numéricas desse tipo sejam de grande custo computacional (FERIZGER; PERIC, 2002). De fato, as simulações numéricas diretas, que resolvem diretamente todo o espectro de escalas da turbulência, apresentam custo computacional proibitivo na grande maioria dos problemas de engenharia. Por outro lado, as simulações de grandes escalas (LES - large eddy simulation), resolvem diretamente as grandes escalas e incluem o efeito das pequenas através de modelos.

Por fim, as simulações baseadas nas equações médias de Reynolds (RANS – Reynolds-averaged Navier Stokes), solucionam o escoamento médio, sem resolver diretamente nenhuma escala da turbulência. Neste caso, todo o efeito da turbulência sobre o escoamento médio é contabilizado através dos chamados modelos de fechamento. Um dos modelos usados em simulações é o $k - \omega$ SST (Shear Stress Transport), que é utilizado no presente trabalho. É um modelo híbrido que combina os modelos Wilcox (2006) $k - \omega$ e $k - \varepsilon$, contendo uma função que ativa o modelo Wilcox próximo a paredes e o $k - \varepsilon$ no escoamento livre (AUTODESK, 2019).

2.2.1. Equacionamento do modelo– $k-\omega$ SST.

Rahman *et al.* (2019) demonstra as equações que governam este modelo. O modelo consiste em resolver equações de transporte para a energia cinética turbulenta k e dissipação específica ω , junto às equações Reynolds Averaged Navier-Stokes (RANS) (Rahman *et al.*, 2019). As equações são apresentadas a seguir e suas variáveis descritas no Quadro 1,

$$\frac{D(\rho k)}{Dt} = \frac{\delta}{\delta x_j} \left[(\mu + \sigma_k \mu_T) \frac{\delta k}{\delta x_j} \right] + P_k - \rho \beta^* k \omega, \quad (2)$$

$$\frac{D(\rho\omega)}{Dt} = \frac{\delta}{\delta x_j} \left[(\mu + \sigma_\omega \mu_T) \frac{\delta\omega}{\delta x_j} \right] - \rho\beta\omega^2 + P_\omega + 2(1 - F_1)\rho\sigma_\omega \frac{1}{\omega} \frac{\delta k}{\delta x_i} \frac{\delta\omega}{\delta x_i}, \quad (3)$$

Quadro 1 – Descrição das variáveis das equações (2) e (3).

Variável	Descrição
ρ	Densidade
k	Energia cinética turbulenta total
μ	Viscosidade dinâmica
σ_k	Número de Schmidt turbulento
μ_T	Viscosidade turbulenta
P_k	Taxa de produção de k
β^*	Constante do modelo de turbulência
ω	Taxa específica de dissipação turbulenta
σ_ω	Número de Schmidt Turbulento
β	Constante do modelo de turbulência
P_ω	Taxa de produção de ω
F_1	Função de mesclagem do modelo

Fonte: Rahman et al. (2019)

onde o termo de produção $P_k = \tau_{ij}(\delta u_i/\delta x_j)$ e tensor de Reynolds τ_{ij} é relacionado ao tensor S_{ij} através da aproximação de Boussinesq:

$$\tau_{ij} = 2\mu_T \left(S_{ij} - \frac{1}{3} S_{kk} \delta_{ij} \right) - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij}, \quad (4)$$

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\delta u_i}{\delta x_j} + \frac{\delta u_j}{\delta x_i} \right), \quad (5)$$

onde δ_{ij} é o delta de Kronecker. A viscosidade cinemática turbulenta ν_T é calculada como:

$$\nu_T = \frac{\mu_T}{\rho} = \frac{a_1 k}{\max(a_1 \omega, S F_2)} \quad (6)$$

Na equação (6), temos que $a_1 = 0,31$ e $S = \sqrt{2S_{ij}S_{ij}}$ são invariantes do tensor. Outros parâmetros do modelo são dados a seguir:

$$P_\omega = \gamma \frac{P_k}{\nu_T} \quad (7)$$

$$F_1 = \tanh(\xi^4) \quad (8)$$

$$\xi = \min \left[\max \left\{ \frac{\sqrt{k}}{\beta^* \omega y}, \frac{500\nu}{\omega y^2} \right\}, \frac{4\sigma_{\omega 2} k}{CD_{\omega} y^2} \right] \quad (9)$$

$$CD_{\omega} = \max \left(\frac{2\sigma_{\omega 2}}{\omega} \frac{\delta k}{\delta x_i} \frac{\delta \omega}{\delta x_i}, 10^{-10} \text{sec}^{-2} \right) \quad (10)$$

$$F_2 = \tanh \left[\left\{ \max \left(\frac{2\sqrt{k}}{\beta^* \omega y}, \frac{500\nu}{\omega y^2} \right) \right\}^2 \right] \quad (11)$$

onde ν é a viscosidade cinemática. Os coeficientes do modelo nas equações 2 e 3 são obtidos a partir da equação:

$$(\sigma_k \sigma_{\omega} \beta)^T = F_1 (\sigma_k \sigma_{\omega} \beta)_1^T + (1 - F_1) (\sigma_k \sigma_{\omega} \beta)_2^T \quad (12)$$

Com os seguintes valores de coeficientes dados na Tabela 1.

Tabela 1 – Valores das variáveis da equação 12.

Variável	Valor
σ_{k1}	0,85
σ_{k2}	1,0
$\sigma_{\omega 1}$	0,5
$\sigma_{\omega 2}$	0,856
β_1	0,07
β_2	0,0827

Fonte: Rahman et al. (2019).

O coeficiente γ é calculado como:

$$\gamma = \frac{\beta}{\beta^*} - \frac{\kappa^2}{\sigma_{\omega} \sqrt{\beta^*}} \quad (13)$$

com $\kappa = 0,41$ e $\beta^* = 0,09$.

Rahman *et al.* (2019) explica que F_1 é igual a um na região da parede, e zero no restante do domínio, enquanto similarmente F_2 é um no escoamento da camada limite e zero para o escoamento de cisalhamento livre.

3. METODOLOGIA

3.1. PROGRAMAS DE CÓDIGO ABERTO

Para a resolução do caso de cilindros, um dos escopos de estudo será o de uso de programas de código aberto.

Neste caso, os programas que serão usados serão: snappyHexMesh para a geração da malha; e OpenFOAM, responsável pela resolução computacional do escoamento. Já para programação do algoritmo de automatização, a linguagem escolhida foi Python.

Segundo CFD Direct (2022), o OpenFOAM é uma ferramenta de código aberto para dinâmica dos fluidos computacional, pertencente à OpenFOAM Foundation. Dentre suas funcionalidades há a ferramenta que pode simular escoamentos turbulentos, incêndios em construções, combustões, eletromagnetismo e afins, incluindo ferramentas para geração de malhas, processamento e visualização de dados.

Já o Python é uma linguagem orientada à objeto com semânticas dinâmicas, tendo suporte para módulos e pacotes, permitindo programação modular e reuso (Python, 2022). Por ser uma linguagem de fácil compreensão e ter o auxílio de pacotes matemáticos, e ser de acesso livre, o Python se torna uma ferramenta apropriada para o algoritmo, usando principalmente sua função de programação modular.

Na geração de malhas o uso será da ferramenta snappyHexMesh, módulo presente dentro do pacote de funções do OpenFOAM. É gerado uma malha tridimensional a partir de um volume discretizado delimitado por uma superfície fornecida externamente ao algoritmo. Sua configuração se dá a partir da edição de um arquivo único na linguagem C++, editando campos como refinamentos específicos, volumes de controle, esquemas de resolução e afins.

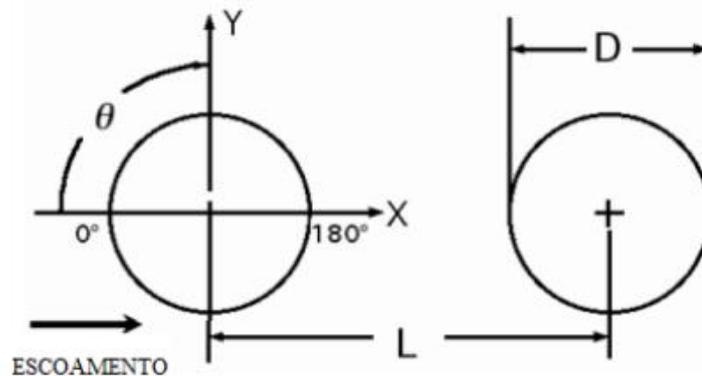
3.2. PARAMETRIZAÇÃO

Para a elaboração do algoritmo de automação, faz-se necessário parametrizar a malha e o caso de estudo definido na seção 3.2.1. Tais parametrizações são discutidas a seguir.

3.2.1. Parametrização de dois cilindros em tandem

Jenkins *et al.* (2005) e Lockard *et al.* (2007) utilizaram a seguinte configuração de experimento físico que será considerada nesse trabalho: diâmetro dos cilindros de $D = 0,05715$ m e largura de 16 diâmetros. A velocidade de entrada em ambos os casos é de $U = 44$ m/s, $Re = 1,66 \times 10^5$ e a distância entre os cilindros é de $3,7D$. Na Figura 3, é ilustrada a configuração dos cilindros tandem.

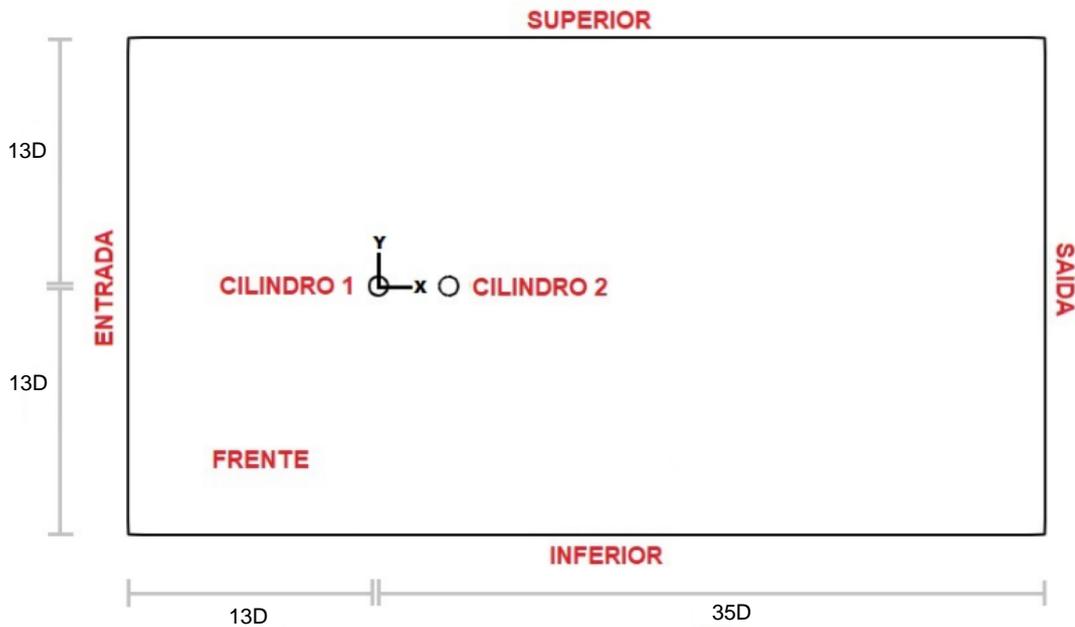
Figura 3 – Cilindros em tandem do experimento de Lockard *et al.* (2007).



Fonte: Lockard *et al.* (2007).

Para o caso apresentado, sua configuração se baseia nos casos de Chadlvski (2021) e Khorrami *et al.* (2005), onde foi definido uma malha com base no diâmetro de dois cilindros iguais em tandem. Assim, definiu-se as distâncias de fronteiras como: $13D$ para entrada, superior e inferior. $35D$ na saída, a profundidade tem a mesma extensão dos cilindros, $16D$ (Chadlvski, 2021). O domínio pode ser conferido na Figura 4.

Figura 4 – Domínio computacional do caso.



Fonte: Adaptado de Chadlvski (2021).

3.2.2. Esquemas de solução

Em todos os casos, irá ser empregado o algoritmo integrado do OpenFOAM, pisoFoam. Essa solução resolve problemas transientes, incompressíveis, turbulentos, usando o algoritmo PISO (OpenFOAM,2022), resolvendo a equação de continuidade (14) e quantidade de movimento (15),

$$\nabla \cdot \vec{u} = 0, \quad (14)$$

$$\nabla \cdot (\vec{u} \otimes \vec{u}) - \nabla \cdot \vec{R} = -\nabla p + S_u, \quad (15)$$

onde \vec{u} é a velocidade, p a pressão, \vec{R} o tensor tensão e S_u a fonte e quantidade de movimento. Em relação aos esquemas numéricos, o Quadro 2 sintetiza os esquemas utilizados para os termos de gradiente e divergente.

Os termos denominados *grad* são termos gradiente. Os definidos para o caso são utilizados para melhorar a estabilidade da simulação. O uso de gradientes do tipo *cellMDLimited* limita o gradiente de forma que quando os valores da célula são extrapolados, os valores não ultrapassem das células vizinhas (CFD Direct, 2022).

Quadro 2 – Parâmetros do arquivo “fvSchemes” para o caso.

Parâmetro	Valor
Grad (U)	cellMDLimited Gauss linear 0.5
Grad (k)	cellMDLimited Gauss linear 0.5
Grad (omega)	cellMDLimited Gauss linear 0.5
Div(phi,U)	linearUpwind grad(U)
Div(phi,k)	Gauss limitedLinear 1
Div(phi,omega)	Gauss limitedLinear 1

Fonte: Autor (2022).

Já para os termos *div*, denominados termos divergentes, incluem os termos advectivos e outros termos que são difusivos por natureza. O esquema *linearUpwind* é um esquema de segunda ordem que requer discretização do gradiente de velocidade. E para o esquema *limitedLinear* é definido como um esquema linear que limita regiões de rápida mudança de gradiente (CFD Direct, 2022).

As simulações dos casos foram realizadas utilizando os recursos computacionais do laboratório de computação científica (LabCC) e do laboratório de simulação naval (LaSIN), localizados na UFSC campus Joinville.

3.2.3. Condições de contorno.

As condições de contorno do caso são uma parte importante de qualquer simulação numérica. Essas condições são vitais para um bom resultado, e por isso são mantidas fixas para todos os casos desse trabalho. No Quadro 3, é descrito a variável, a fronteira e a condição de contorno usada em cada caso.

Aqui destaca-se o uso das funções parede nos cilindros 1 e 2. Na biblioteca do OpenFOAM essas funções são denominadas funções parede de baixo Reynolds e são usadas para as variáveis de k , ν e ω . Essa condição de contorno adapta a resolução de funções paredes conforme valores instantâneos de y^+ de cada célula.

Quadro 3 – Descrição das condições de contorno para as variáveis do caso.

Variável	Entrada	Saída	Frente e trás	Superior e Inferior	Cilindro 1	Cilindro 2
k	Escoamento Livre	Zero gradiente	Zero gradiente	Escoamento Livre	Função parede	Função parede
Nut	Calculado	Calculado	Zero gradiente	Calculado	Função parede	Função parede
omega	Escoamento livre	Zero Gradiente	Zero Gradiente	Escoamento livre	Função parede	Função parede
P	Pressão de escoamento livre de 0 Pa.	Valor prescrito de 0 Pa.	Zero gradiente	Pressão de escoamento livre de 0 Pa.	Zero Gradiente	Zero gradiente
U	Velocidade de escoamento livre de 44m/s	Zero gradiente	Escorregamento	Velocidade de escoamento livre de 44m/s	Sem escorregamento	Sem escorregamento

Fonte: Autor (2022).

3.3. MALHAS DE ESTUDO.

Para o estudo de malhas, inicialmente são propostas duas malhas ditas como malhas base, que irão ser geradas e simuladas como referência inicial ao trabalho. Essas malhas começam com configurações iguais de refinamentos locais, globais e de camada prismática, diferindo na sua dimensão no eixo Z.

A primeira malha, que será chamada de malha base 4, é composta de uma largura em Z de dezesseis diâmetros de cilindro, tendo 60 elementos nesse eixo. A malha possui um total de $8,25 \times 10^6$ elementos.

Já na segunda malha, denominada malha base 16, é proposto o domínio completo de 4 diâmetros em Z com 15 elementos nesse eixo. Essa diferenciação se dá para analisarmos o impacto do corte da largura no eixo Z nos resultados finais das simulações e no impacto do custo computacional. Para esse caso, o número de elementos é de $2,06 \times 10^6$.

3.3.1. Métodos de análise.

Com o caso base definido, é feita a variação nos refinamentos locais e de camadas prismáticas. Os níveis de refinamentos a serem aplicados em cada caso são definidos na Tabela 2.

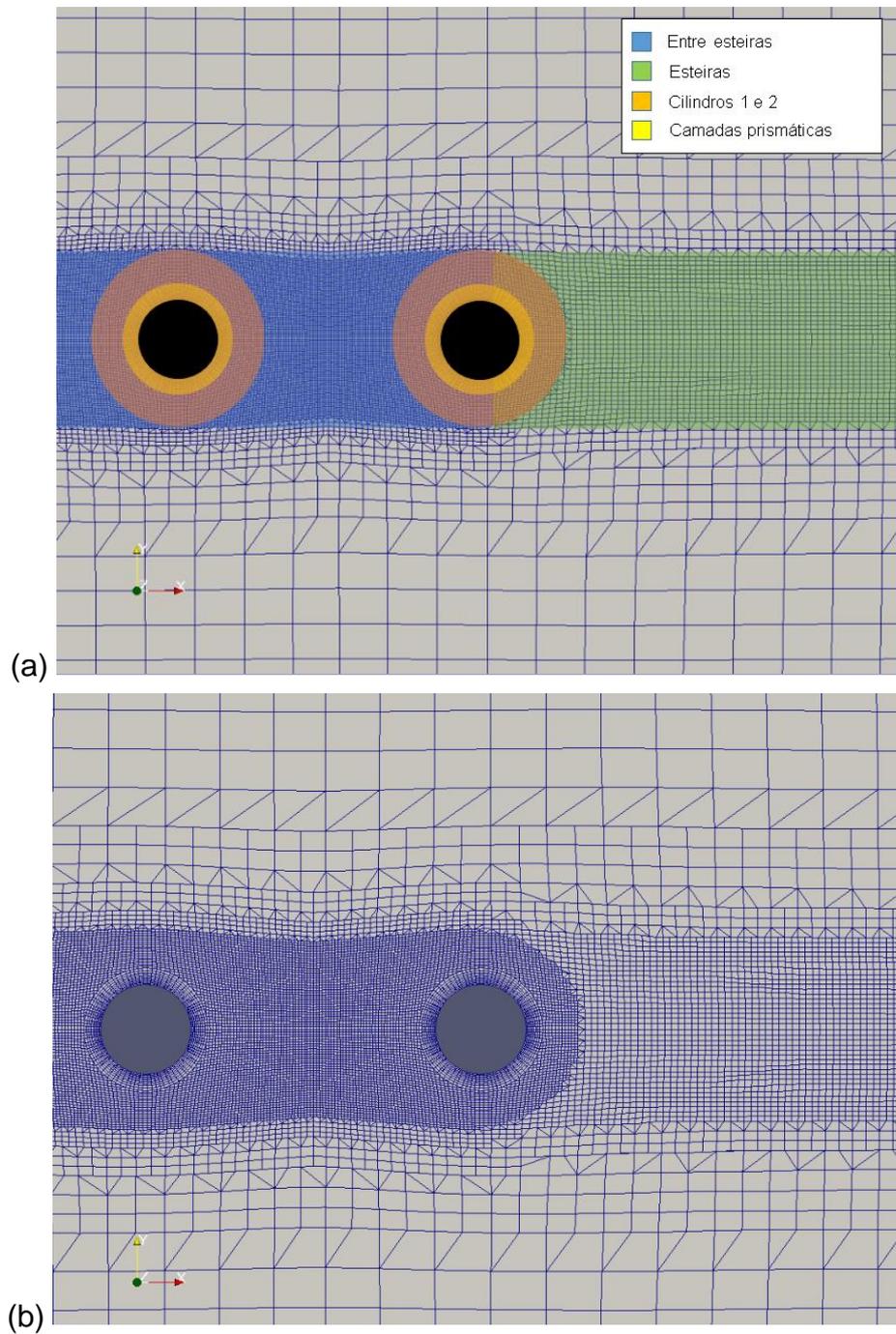
Tabela 2 – Nível de refinamentos locais para os casos definidos.

Região	Nível de refinamento - Malha A	Nível de refinamento - Malha B	Nível de refinamento - Malha C	Nível de refinamento - Malha D	Nível de refinamento - Malha E
Cilindro 1	3	3	4	4	4
Cilindro 2	3	3	4	4	3
Esteira	3	3	4	4	4
Entre cilindros	3	3	4	4	4

Fonte: Autor (2022).

Na Figura 5 (a) há a melhor definição das regiões locais a serem refinadas. Na Figura 5 (b) pode-se notar a diferença do refinamento 4, aplicado nos cilindros e também entre eles, e o nível de refinamento 3 aplicado na esteira para este caso. O nível de refinamento divide a célula base, que é a célula gerada globalmente, em 4^N células, onde N é o nível de refinamento definido.

Figura 5 – Áreas de refino local para uma malha genérica. (a) Com destaque das regiões. (b) Sem destaque das regiões.



Fonte: Autor (2022).

Na Tabela 3 é definido algumas variáveis que serão usadas no algoritmo desenvolvido.

Tabela 3 – Variáveis definidas para o algoritmo.

	Malha A	Malha B	Malha C	Malha D	Malha E
y^+ alvo	15	8	15	8	100
Número de camadas	12	12	12	16	12
Taxa de crescimento	1,1	1,1	1,1	1,1	1,05

Fonte: Autor (2022).

Para as malhas A e B, é utilizado um refino local mais grosseiro em todas as regiões. Nas malhas C e D o nível de refino é muito mais expressivo, apresentando um número maior de elementos finais. Já na malha E, opta-se por um refino menor na esteira e mais elevado nas outras áreas, tendo camadas prismáticas mais grosseiras pelo y^+ alvo de 100. Assim, poderá ser analisado a sensibilidade dos resultados ao refino local e ao refino das camadas prismáticas, ao fim podendo definir o caso base do algoritmo.

Tendo a malha base definida, é analisada a capacidade do algoritmo de gerar malhas para casos com diferentes configurações de cilindro. Assim, propõe-se a análise do caso de Jenkins *et al.* (2006), com velocidade de corrente livre de 44m/s, diâmetro de cilindros de $D = 0,05715$ m e uma distância de $L = 1,435D$ entre cilindros.

3.4. O ALGORITMO.

Nesta seção será detalhado o desenvolvimento do algoritmo responsável pela geração da malha computacional dos cilindros tandem.

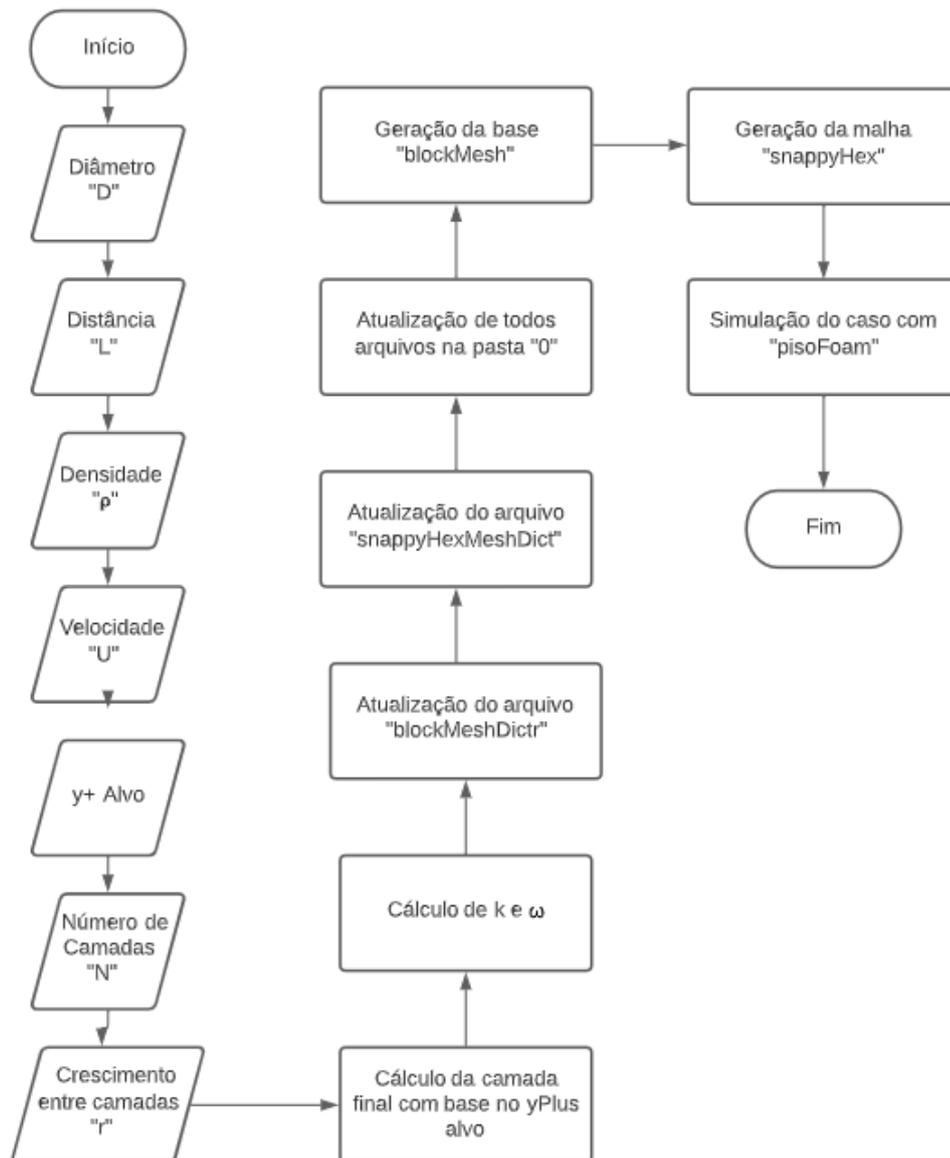
3.4.1. Fluxograma.

Para um melhor entendimento inicial do problema, é elaborado um fluxograma do processo de funcionamento do algoritmo de automação, mostrado na Figura 6.

O fluxo se inicia com uma caixa de inicialização, seguido por sete caixas, em formato de trapézio, de entrada de dados, sendo essas: diâmetro, distância, densidade, velocidade de escoamento livre, y^+ alvo, número de camadas e taxa de

crescimento. Seguido, então, por 8 caixas retangulares que simbolizam ações do sistema. Ao fim, é usada uma caixa de finalização.

Figura 6 – Fluxograma do processo.



Fonte: Autor (2022).

3.4.2. Variáveis do algoritmo.

Para o algoritmo resolver as equações descritas anteriormente, e gerar as superfícies e domínio de malha, é necessária a inserção de algumas variáveis manualmente pelo usuário. As variáveis, símbolos e descrição são dadas no Quadro 4.

Quadro 4 – Variáveis do algoritmo.

Variável	Nome	Descrição
D	Diâmetro	Diâmetro dos cilindros 1 e 2.
L	Distância	Distância entre os centros dos dois cilindros.
U	Velocidade	Velocidade de entrada do escoamento.
γ^+	yPlus	yPlus alvo, o valor que deve ser atingido na geração das camadas prismáticas.
N	Camadas	Número de camadas prismáticas
r	Taxa de crescimento	Taxa de crescimento entre duas camadas consecutivas.

Fonte: Autor (2022).

Ao fim, com a implementação das equações anteriores e a definição pelo usuário das variáveis do algoritmo, o programa gera a malha base com refino global a partir do blockMeshDict, em seguida gerando a malha com refinamentos locais e camadas prismáticas com o algoritmo snappyHexMesh. Com a malha finalizada, o algoritmo é capaz de inicializar e finalizar o caso com a solução “ pisoFoam”.

3.4.3. Equações.

O algoritmo desenvolvido tem como premissa resolver duas problemáticas: gerar a camada prismática, e encontrar os valores iniciais das variáveis de turbulência. Para estimar a altura da primeira camada de elementos prismáticos foi utilizada uma aproximação de placa plana turbulenta para cálculo de y^+ . O equacionamento utilizado para dimensionar as camadas prismáticas, assim como para prover estimativas iniciais das variáveis da turbulência são descritas nesta subseção.

3.4.3.1. Cálculo das camadas prismáticas

Shukla (2011) define o y^+ como um número adimensional, similar ao número de Reynolds. Aqui, do ponto de vista computacional, é referido o y^+ associado à

posição do centro dos volumes adjacentes à parede. Desta forma, pode-se estimar a posição destas células em relação às regiões da camada limite turbulenta:

- $y^+ < 5$ – Sub camada limite viscosa – Perfil linear.
- $5 < y^+ < 30$ – Região mista.
- $30 < y^+ < 300$ – Camada logarítmica.

Como visto anteriormente, no caso de cilindros tandem é utilizado as funções parede de baixo Reynolds, que se adaptam ao y^+ da célula.

Schlichting (1979) faz uma aproximação de placas planas turbulentas para o cálculo das camadas prismáticas, utilizando as equações de y^+ . Para calcular a altura da primeira camada prismática, inicia-se calculando o número de Reynolds.

$$Re = \frac{\rho UL}{\mu} \quad (16)$$

sendo ρ a densidade, U velocidade de entrada do escoamento, L é o comprimento de referência, sendo no neste caso o diâmetro do cilindro, e μ a viscosidade dinâmica. Então, se utiliza uma correlação para escoamentos turbulentos totalmente desenvolvidos sobre placa plana para poder estimar o coeficiente de fricção:

$$c_f = [2\log_{10}(Re) - 0,65]^{-2,3} \quad (17)$$

Assim, pode-se calcular a tensão de cisalhamento na parede:

$$\tau_w = \frac{1}{2}\rho U^2 c_f \quad (18)$$

Calculando a velocidade de fricção:

$$u_t = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}} \quad (19)$$

Agora rearranjando a equação de y^+ para obter a distância até o centroide da célula adjacente à parede (y_p):

$$y^+ = \frac{\rho y_p u_t}{\mu} \quad (20)$$

$$y_p = \frac{y^+ \mu}{u_t \rho} \quad (21)$$

Assim, a altura da primeira célula se dá por:

$$y_H = 2y_p \quad (22)$$

Para se calcular a taxa máxima de crescimento da camada prismática, usamos a correlação para espessura da camada limite dada por Cengel (2006). Essa taxa é dada pelo usuário, o cálculo demonstrado serve apenas para mostrar ao usuário qual o limite máximo da taxa a ser usada no caso escolhido. Caso seja um escoamento laminar, $Re < 5 \times 10^5$, é usada a seguinte correlação:

$$\delta_{99} = \frac{4,91L}{\sqrt{Re_L}} \quad (23)$$

Se o escoamento for turbulento, $Re > 5 \times 10^5$, é utilizada a seguinte correlação:

$$\delta_{99} = \frac{0,38L}{Re_L^{\frac{1}{5}}} \quad (24)$$

No próximo passo, é calculada a espessura total das camadas (y_T), para um dado número de camadas N e crescimento r . A taxa de crescimento r é definida como a razão entre duas células consecutivas. Assim, escrevemos a altura das duas primeiras camadas como:

$$y_T = y_H + y_H r_{max} \quad (25)$$

Podendo, então, generalizar para N camadas:

$$y_T = y_H + y_H r_{max} + y_H r_{max}^2 + \dots + y_H r_{max}^{N-1}, \quad (26)$$

que é substituída pela identidade da soma geométrica:

$$y_T = y_H \left(\frac{1 - r_{max}^N}{1 - r_{max}} \right) \quad (27)$$

Assim, é requerido que a altura total das camadas seja igual ou maior que a espessura da camada limite, podendo escrever:

$$\delta_{99} = y_H \left(\frac{1 - r_{max}^N}{1 - r_{max}} \right) \quad (28)$$

Rearranjando a equação:

$$r_{max}^N - r_{max} \left(\frac{\delta_{99}}{y_H} \right) + \left(\frac{\delta_{99}}{y_H} - 1 \right) = 0 \quad (29)$$

Assim, utilizamos o algoritmo de Newton-Raphson para resolver essa equação. Ao fim, encontrando o valor de r_{max} , que é o valor máximo de crescimento. O valor utilizado no algoritmo de taxa de crescimento, r , deve ser igual ou menor que r_{max} , para assegurar que a camada limite está toda contida dentro das camadas prismáticas.

3.4.3.2. Estimativas para os valores iniciais das variáveis da turbulência.

Dentro do modelo SST k-omega existem variáveis que devem ser inicializadas corretamente para o sucesso da simulação. São elas a energia cinética (k), a taxa específica de dissipação (ω). Menter (1992) descreve o cálculo dessas equações iniciando pelo cálculo da energia cinética turbulenta:

$$k = \frac{3}{2} U^2 I^2 \quad (30)$$

Onde U é a velocidade de entrada do escoamento e I a intensidade turbulenta do modelo. Neste trabalho adotou-se um valor de intensidade turbulenta de 10%. Em seguida, calcula-se a taxa específica de dissipação:

$$\omega = \frac{\sqrt{k}}{l}, \quad (31)$$

onde l é a escala de comprimento adotada, que neste trabalho é de 0,1m.

4 RESULTADOS

A fim de validar o algoritmo, foram feitos teste de malha, analisando a influência dos refinamentos no campo da esteira, entre cilindros e ao redor dos mesmos. Os dados são então comparados com dados experimentais disponíveis na literatura.

4.1. RESULTADOS DOS CASOS DE BASE.

Para poupar tempo e custo computacional das simulações numéricas, dois casos iniciais para análise são definidos. O primeiro caso (Base 16) replica o campo aplicado nos estudos de Jenkins *et al.* (2005) e Lockard *et al.* (2007) com sua largura total de 16 diâmetros. O segundo caso é uma tentativa de analisar o impacto quando se diminui a largura do domínio computacional (direção z) para 4 diâmetros. Vale ressaltar que a redução do domínio foi realizada mantendo o mesmo nível de refino em z, de forma a evitar a influência combinada do tamanho do domínio e o refino de malha nos resultados.

Na Tabela 4 mostra-se o resultado em termos do coeficiente de arrasto para cada caso. Nota-se que a distância dos valores entre os respectivos cilindros é pequena, ocorrendo uma diferença de 0,33% nos valores do cilindro 1 e 0,38% no cilindro 2.

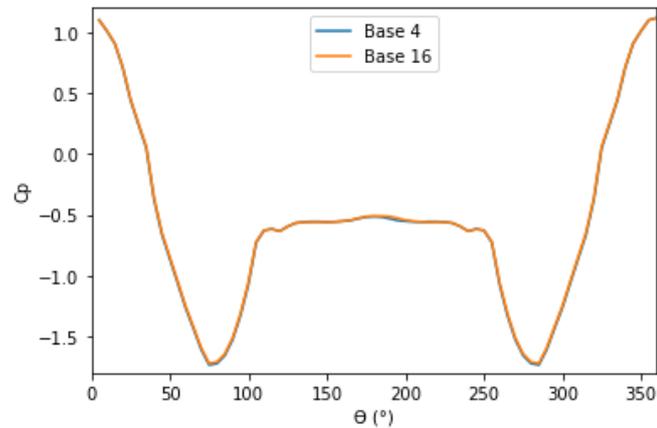
Tabela 4 – Comparações de arrasto entre os casos base.

Caso	Cilindro 1	Cilindro 2
Base 16	0,6223	0,40836
Base 4	0,6244	0,40678

Fonte: Autor (2022).

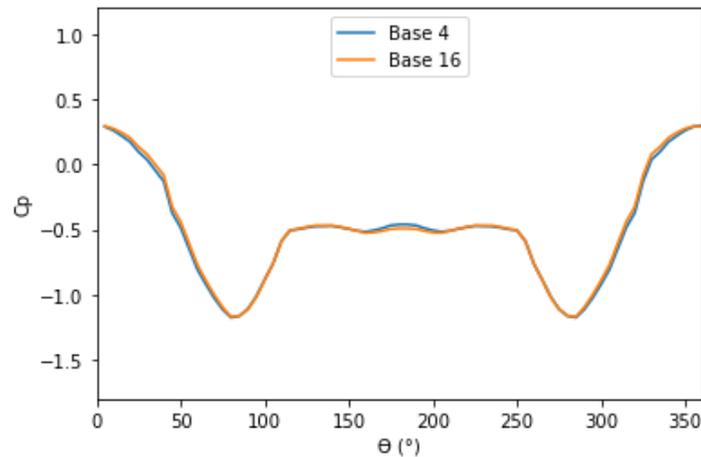
Já na Figura 7, é comparada a distribuição dos valores do coeficiente de pressão médio para o cilindro 1. Pode-se notar que as curvas se sobrepõem em toda circunferência do cilindro, mostrando pouca sensibilidade a largura. Na Figura 8, nota-se um comportamento semelhante para o cilindro 2, neste também com uma pequena disparidade entre os ângulos de 150 e 200.

Figura 7 – Coeficiente de pressão médio para o cilindro 1 nos casos base.



Fonte: Autor (2022).

Figura 8 – Coeficiente de pressão médio para o cilindro 2 nos casos base.



Fonte: Autor (2022).

Nota-se, assim, que o corte de 2/3 do domínio surtiu pouca diferença sobre os resultados, se comparado ao domínio completo. Desta forma, optou-se pelo domínio menor para as análises subsequentes.

4.2. RESULTADOS DO ALGORITMO.

Nessa seção, serão analisados os valores iniciais gerados pelo algoritmo do trabalho. A partir do caso base 4, definem-se quatro casos de trabalho, com variação de refinamentos locais e camadas prismáticas. Os resultados para número de elementos gerados e suas respectivas espessuras total da camada prismática são dados na Tabela 5.

Tabela 5 – Número de elementos e espessura total da camada prismática para as malhas estudadas.

	Malha A	Malha B	Malha C	Malha D	Malha E
Número de elementos	$2,063 \times 10^6$	$2,066 \times 10^6$	$10,15 \times 10^6$	$10,09 \times 10^6$	$5,94 \times 10^6$
Espessura total das camadas [m]	$2,46 \times 10^{-3}$	$1,31 \times 10^{-3}$	$2,46 \times 10^{-3}$	$2,22 \times 10^{-3}$	$1,22 \times 10^{-2}$

Fonte: Autor (2022).

Na Tabela 6, compara-se o y^+ mínimo, máximo e médio de cada malha.

Tabela 6 – Resultados de y^+ para as malhas estudadas.

Malha	Cilindro	y^+ Mínimo	y^+ Máximo	y^+ Médio	y^+ Alvo
A	1	1,5320	24,9575	12,2713	15
	2	1,1290	22,4411	11,3704	
B	1	0,6069	13,334	7,0332	8
	2	0,4893	12,3640	6,3208	
C	1	1,5996	24,9735	12,2823	15
	2	1,1600	22,4062	11,2621	
D	1	1,0619	13,6899	7,2786	8
	2	0,5730	12,5515	6,3866	
E	1	4,0905	153,1237	66,7411	100
	2	3,4451	145,0882	61,8759	

Fonte: Autor (2022).

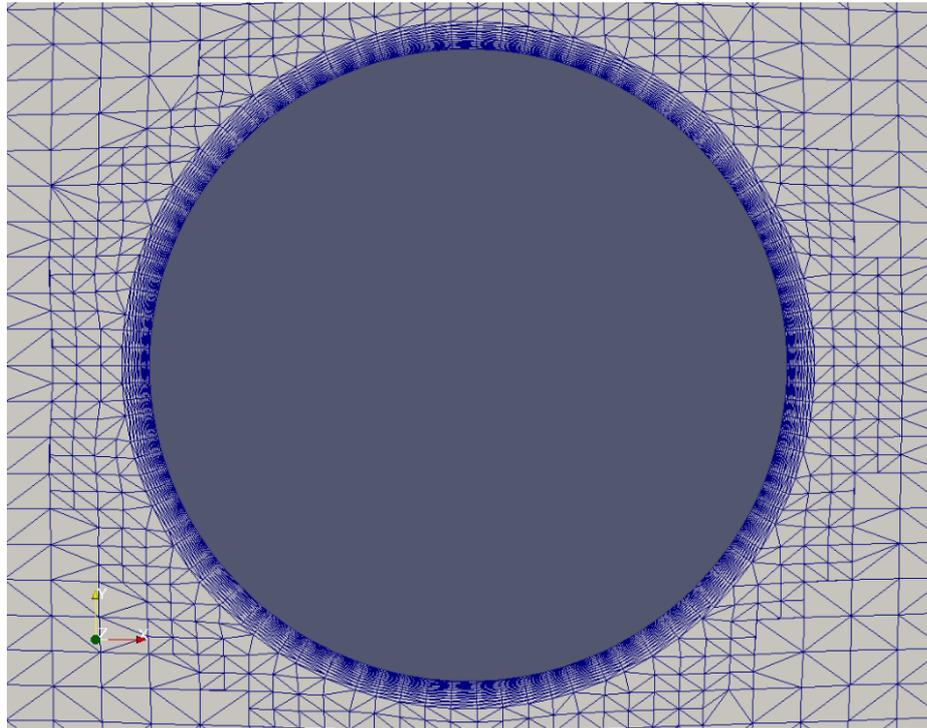
Analisando o y^+ médio de cada caso, nota-se que apesar de ter sido usada uma aproximação de placas plana para o caso, o equacionamento se adaptou bem para os casos dos cilindros tandem. Também se destaca a pouca diferença do y^+ médio entre as malhas A e C, que tem mesmo y^+ alvo. Ocorre pouca variação de valores entre as malhas B e D, que apesar de terem mesmo y^+ alvo de 8, apresentavam espessura total diferente.

Com isso, mostra-se a dependência do algoritmo com o valor do y^+ alvo, além de mostrar que o número de camadas pouco influência no valor final de y^+ médio,

desde que a relação de crescimento de camadas esteja dentro do valor máximo calculado pelo algoritmo para que esteja contido totalmente dentro da camada limite.

Na Figura 9 é mostrado o detalhamento da camada prismática para a malha A, visto numa superfície normal a Z. As camadas prismáticas são claramente geradas cobrindo a totalidade das superfícies dos cilindros.

Figura 9 – Detalhamento na camada prismática da malha A no cilindro 1.



Fonte: Autor (2022).

Os valores das variáveis iniciais dos campos da turbulência são calculados pelo algoritmo e dados na Tabela 7. Os valores resultantes são os mesmos para todas as malhas com $U_0 = 44$ m/s.

Tabela 7 – Valores das variáveis turbulentas.

k [m^2/s^2]	ω [1/s]
29,04	53,88

Fonte: Autor (2022).

4.3. TESTE DE REFINOS E CAMADAS PRISMÁTICAS.

Nesta seção são comparados os resultados obtidos pelas malhas A, B, C, D e E com parâmetros descritos na Tabela 4. Desta forma, será avaliada a sensibilidade dos resultados aos refinamentos locais de malha, considerando os coeficientes de arrasto, de pressão e perfis de velocidade na esteira.

A partir da Tabela 8, pode-se analisar o resultado do coeficiente de arrasto em ambos os cilindros obtidos por diferentes malhas.

Tabela 8 – Coeficientes de arrasto para as malhas A, B, C, D e E nos cilindros 1 e 2.

Malha	Cilindro 1	Cilindro 2	y^+ Alvo
A	0,6244	0,4068	15
B	0,5524	0,4060	8
C	0,6185	0,3905	15
D	0,5930	0,3848	8
E	0,9848	0,3397	100

Fonte: Autor (2022)

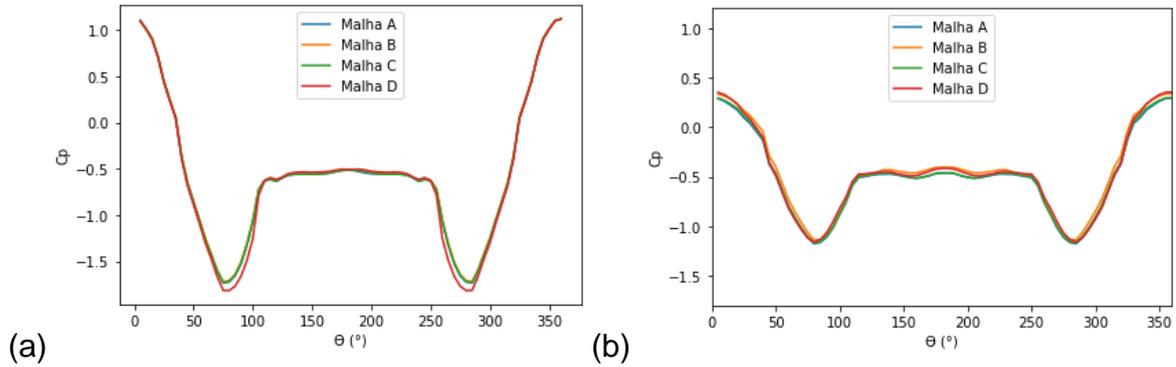
Vemos que entre a malha A e B há uma grande variação entre os valores, mostrando o impacto do refino e espessura das camadas prismáticas. Entre as malhas A e C vemos que a variação de refino local pouco influencia no valor de arrasto no cilindro 1, porém com maior número de elementos entre cilindros a assertividade na previsão de vórtices é maior, assim refletindo diretamente o valor de arrasto do cilindro 2 que é menor, tendo um valor ainda menor na malha D onde a primeira camada é a mais refinada entre esses casos. Já na malha E vemos que seus resultados divergem muito dos outros casos apresentados, essa discrepância deve-se a escolha de função parede usado no caso. Esta malha é então descartada para análises posteriores.

Na Figura 10(a), vemos os resultados de coeficiente de pressão médio entre os quatro casos no cilindro 1. Por razões de simetria, os dados foram analisados entre os ângulos de 0° e 180° , posteriormente espelhados para 180° a 360° . Nota-se uma semelhança em toda a circunferência dos cilindros entre as malhas A, B e C. Já por outro lado, a malha D difere das outras, tendo um valor inferior entre 60° e 100° .

Já na Figura 10(b), vemos que as 4 malhas geram resultados semelhantes em toda circunferência do cilindro. A principal diferença se apresenta nas regiões de

estagnação, onde a malha D mostra um valor superior aos demais, enquanto as malhas A e C tem um resultado quase que idêntico em todas as regiões.

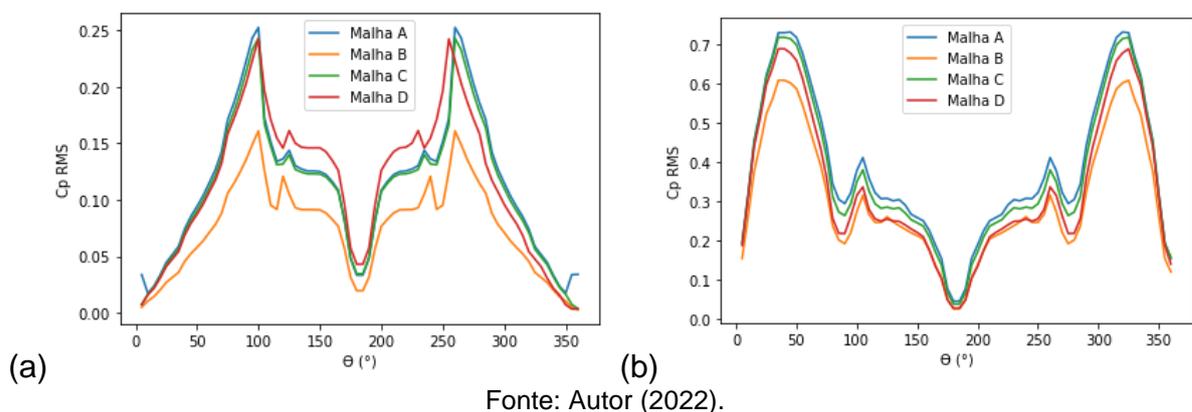
Figura 10 – Valores de coeficiente de pressão para os casos de validação. (a) Cilindro 1. (b) Cilindro 2.



Fonte: Autor (2022).

Calculou-se também o coeficiente de pressão quadrático médio, onde é calculado como $p'_{rms} = \sqrt{(p'_1{}^2 + p'_2{}^2 + \dots + p'_n{}^2)/n}$, onde os subíndices $1, 2, \dots, n$ são instantes de tempo gravado da simulação e sendo $p'(t) = p(t) - \bar{p}$ (Chadlvski, 2021). Os resultados de $C_{p,rms}$ são dados na Figura 11.

Figura 11 – Valores de C_p RMS para os casos de validação (a) Cilindro 1. (b) Cilindro 2.



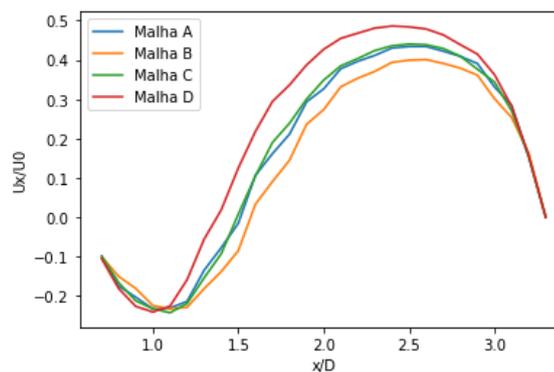
Fonte: Autor (2022).

No cilindro 1 (Figura 11(a)) as malhas A e C novamente apresentam um comportamento muito semelhante em toda circunferência. Já nas malhas de y^+ alvo 8 o comportamento tende a diferir mais dos anteriores, tendo a malha B apresenta resultados menores em toda circunferência. Para o cilindro 2 (Figura 11(b)), o

comportamento é mais próximo entre os casos, com a malha B apresentando valores mais baixos que os demais.

Na Figura 12, vemos os resultados das velocidades em X normalizada pela velocidade de corrente livre $U_0 = 44m/s$, as medidas foram tomadas no espaço entre os cilindros. Nota-se o comportamento do decréscimo da velocidade logo após o primeiro cilindro, tendo um aumento e uma nova queda ao se aproximar do segundo cilindro se aproximando então de zero. Vemos neste que a variação de refino não surtiu diferenças significativas entre as malhas A e C. Enquanto que para os casos com refino de camada prismática mais expressivo, o nível de refino trás grande impacto.

Figura 12 – Perfil da velocidade média na direção do escoamento medida entre os cilindros.



Fonte: Autor (2022).

Nota-se por esses resultados, que nos casos A e C os resultados foram muito próximos em todas as análises, diferentemente dos casos B e D que mostrou maior sensibilidade para o nível de refino local.

4.4. VALIDAÇÃO COM RESULTADOS EXPERIMENTAIS.

Para validação, é analisada os resultados da malha A. Vimos que entre a malha A e C a sensibilidade ao refino local é baixa, enquanto as outras duas malhas apresentaram resultados mais distantes. Além disso, a malha A é pega para referência por ter cinco vezes menos elementos que as malhas B e D, sendo um fator importante para redução de custo computacional.

Para os valores de arrasto os resultados são demonstrados na Tabela 9. Os valores experimentais foram obtidos por Neuhart *et al.* (2009).

Tabela 9 – Comparações de arrasto entre os casos de validação.

Caso	Cilindro 1	Cilindro 2
Malha A	0,624	0,406
Neuhart <i>et al.</i> (2009).	0,65	0,31

Fonte: Autor (2022).

Nota-se que o cilindro 1 teve resultados satisfatórios, próximos ao experimental. O mesmo não acontece no cilindro 2, que apresenta um resultado mais distante, onde uma malha com um maior refino de camadas poderia ser mais adequada. Apesar disso, os resultados são satisfatórios para o trabalho proposto.

Na Figura 13 é feita uma comparação com experimentais obtidos por Jenkins *et al.* (2005) de coeficiente de pressão médio na circunferência dos cilindros 1 e 2. Podemos notar na Figura 13(a) que os resultados são muito próximos aos obtidos por Jenkins *et al.* (2005), mostrando o mesmo valor constante dos resultados entre 100° e 250°. Já na Figura 13(b), vemos que os resultados foram mais próximos na parte frontal do cilindro, entre 0° e 50°. Já para parte a traseira e inferior do cilindro as os resultados numérico e experimental diferem mais, porém o resultado numérico ainda apresentou o comportamento de valores esperado.

Já para C_p RMS, na Figura 14(a), vemos que a previsão chega a ser próxima, mas não exata. No cilindro 2 (Figura 14b), vemos que os valores entre 0° e 50° são subestimados, enquanto entre 50° e 100° os resultados são mais próximos. Próximo de 180° os resultados são superestimados em relação ao experimental, mas ainda apresentando tendências similares.

Quando é analisada a velocidade na direção do escoamento entre os cilindros normalizada pela velocidade de corrente livre, na Figura 15, nota-se que há boa proximidade entre o numérico e experimental. Apesar dos resultados terem sido subestimados em $1,0 \leq x/D \leq 3,0$ considera-se a concordância satisfatória.

Figura 13 – Comparação de C_p do caso de validação com dados experimentais para (a) Cilindro 1. (b) Cilindro 2.

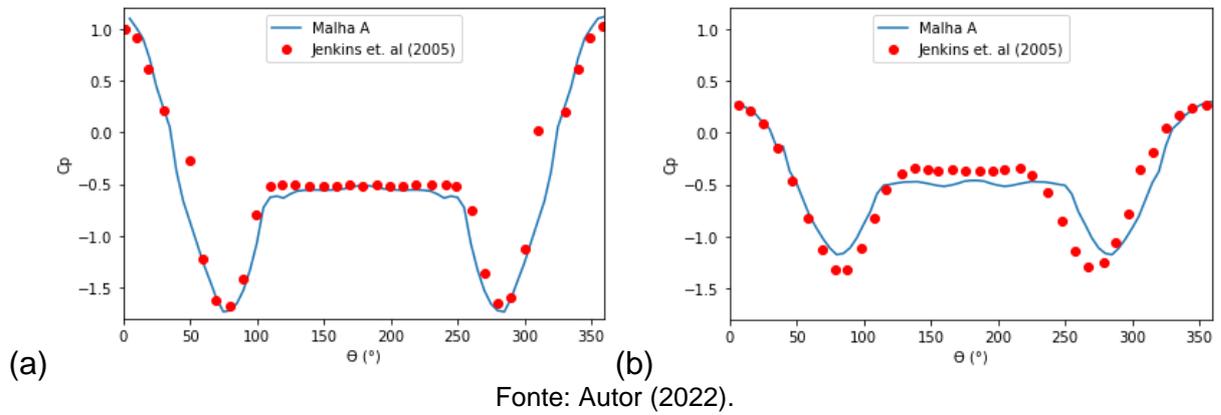


Figura 14 – Comparação de C_p_{RMS} do caso de validação com dados experimentais para (a) Cilindro 1. (b) Cilindro 2.

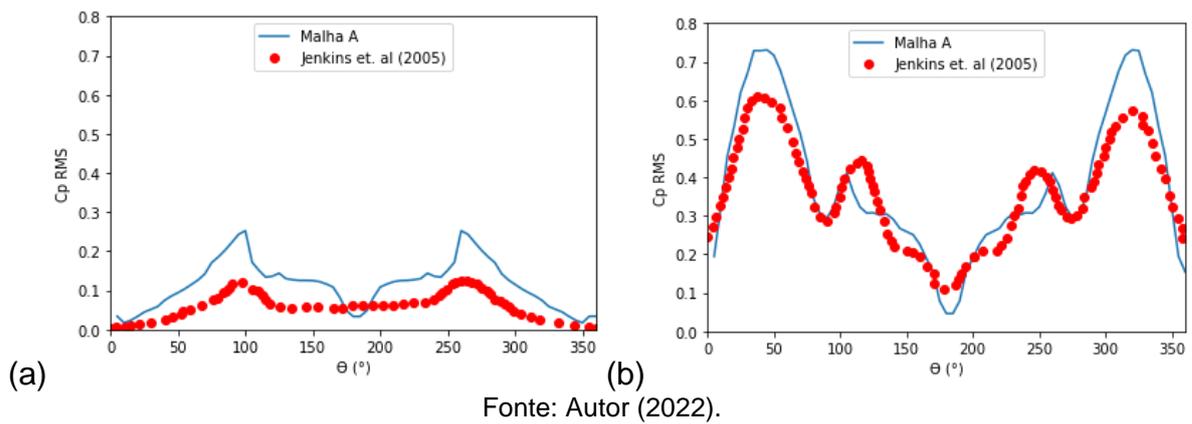
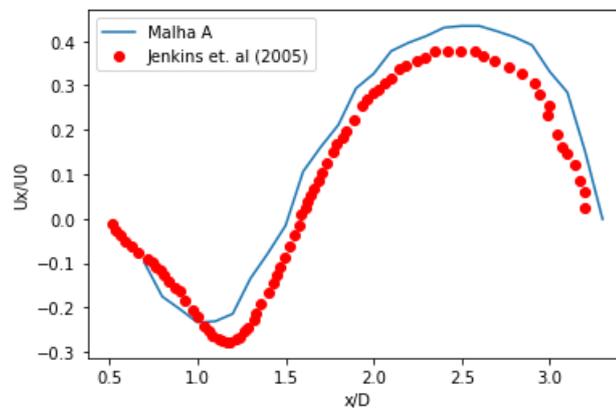
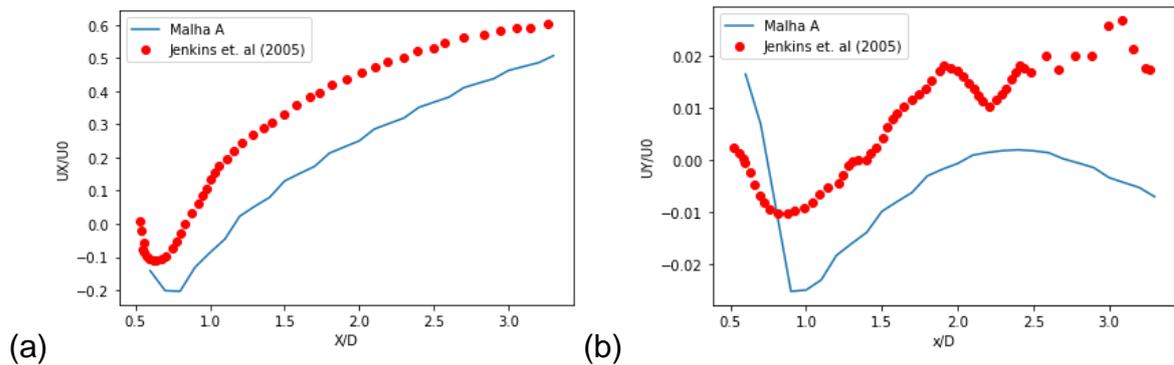


Figura 15 – Média da velocidade na direção do escoamento medida entre os cilindros para a malha A comparados a dados experimentais.



Para o caso de validação, é analisada a capacidade de previsão do perfil de velocidades na esteira. Na Figura 16 são mostradas as velocidades de corrente livre em X e Y, normalizadas pela velocidade de corrente livre U_0 . Essa medição é feita na linha de centro ($y = 0$), imediatamente a jusante do cilindro 2.

Figura 16 – Perfil de velocidades normalizadas pela velocidade U_0 medidas na linha de centro $y = 0$ comparados a dados experimentais com zero do sistema de coordenadas no centro do segundo cilindro. (a) U_X/U_0 . (b) U_Y/U_0 .

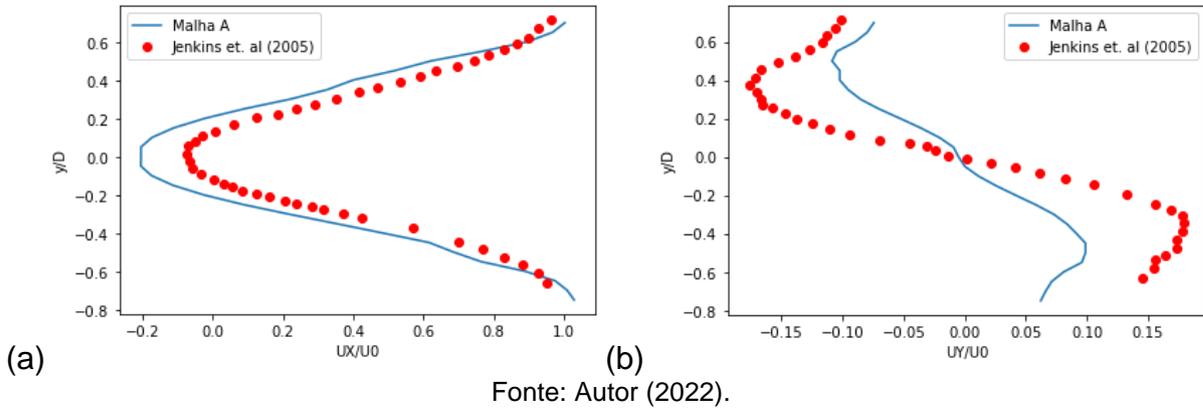


Fonte: Autor (2022).

Para as velocidades na direção do escoamento, apresenta corretamente o comportamento dos valores, porém o tendo subestimado em todo domínio quando comparado ao caso experimental. Já para as velocidades em Y, o caso não obteve resultados próximos do experimental, mas apresentou o comportamento de decaimento da velocidade entre $0,5 \leq x/D \leq 1$ e tendo o mesmo crescimento apresentado no experimental para distâncias de $x/D \geq 1$.

Em sequência, é obtido o perfil de velocidades em $x = 4,45D$ localizado a jusante do cilindro 2, na esteira. Os resultados são apresentados na Figura 17. Nota-se que para as velocidades em X, o caso apresenta números mais próximos do experimental para $\pm 0,2 \leq y/D \leq \pm 0,6$, enquanto apresenta números mais distantes no centro da esteira ($y/D = 0$). Para velocidades em Y, Figura 17(b), os resultados foram subestimados em relação ao experimento no túnel de vento, porém prevendo a forma do perfil em S, com a velocidade na linha de centro sendo zero.

Figura 17 – (a) Perfil de velocidades normalizado pela velocidade U_0 medido em $X = 4,45D$ e comparados a dados experimentais de Jenkins *et al.* (2005). (a) na direção do escoamento. (b) Normal ao escoamento.

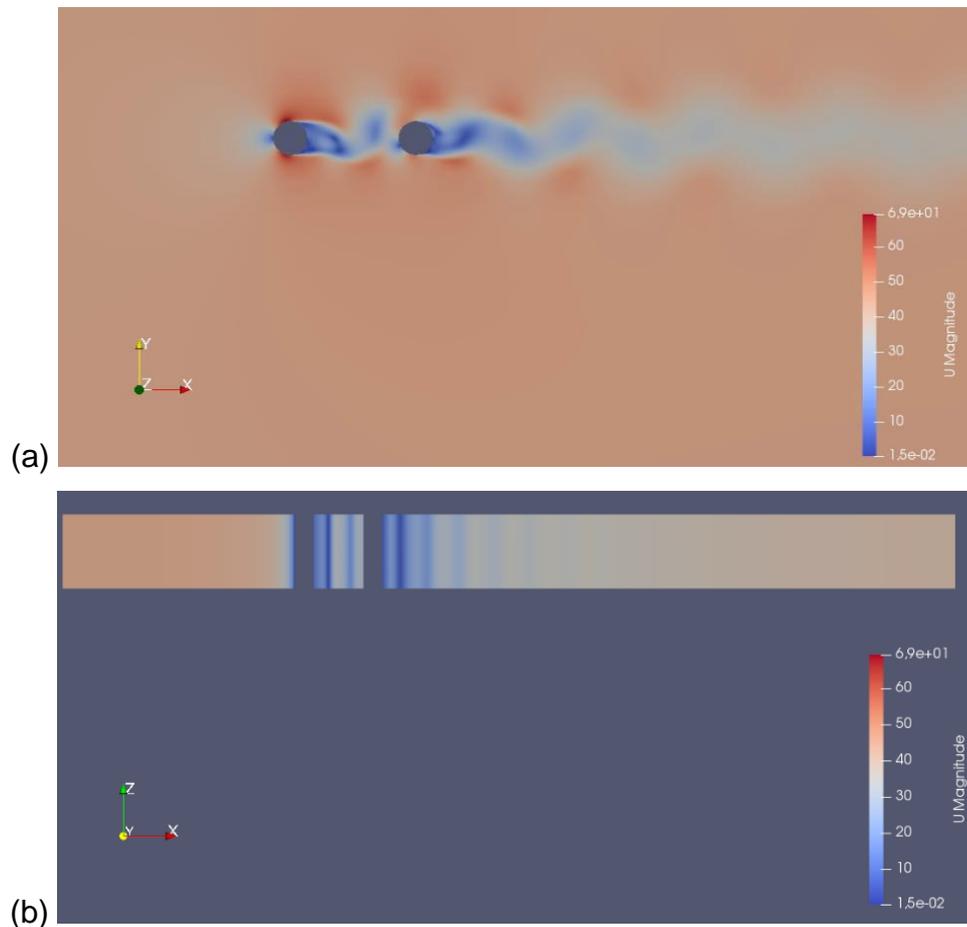


Assim, a malha A obteve bons resultados nas análises de pressão e velocidade entre cilindros, juntamente com bons resultados de previsão de arrasto. Com isso, a malha apresenta números condizentes com a realidade, com um número menor de elementos, em comparação às outras malhas, poupando custo computacional. Ao fim, define-se a malha A como caso base do algoritmo, preservando seus refinamentos e tamanho de domínio com modificações feitas conforme configuração do código desenvolvido.

4.5. ANÁLISE DOS MAPAS DE CONTORNO.

A Figura 18 mostra contornos de magnitude de velocidade instantânea do caso. Nota-se a proeminência de vórtices gerados entre os dois cilindros, comportamento que gera consequências no escoamento que são perpetuadas em toda sua esteira. Entre os cilindros, cabe ressaltar o comportamento descrito na Figura 15, tendo uma baixa velocidade logo a jusante do cilindro 1, aumentando conforme se aproxima do cilindro 2. Na Figura 18(b) se destaca o comportamento da velocidade no eixo Z, onde mostra a influência da variação da velocidade com o tempo nesta direção.

Figura 18 (a) – Magnitude de velocidade instantânea no plano YX. (b) Magnitude de velocidade instantânea no eixo plano para um corte feito ao centro dos cilindros.



Fonte: Autor (2022).

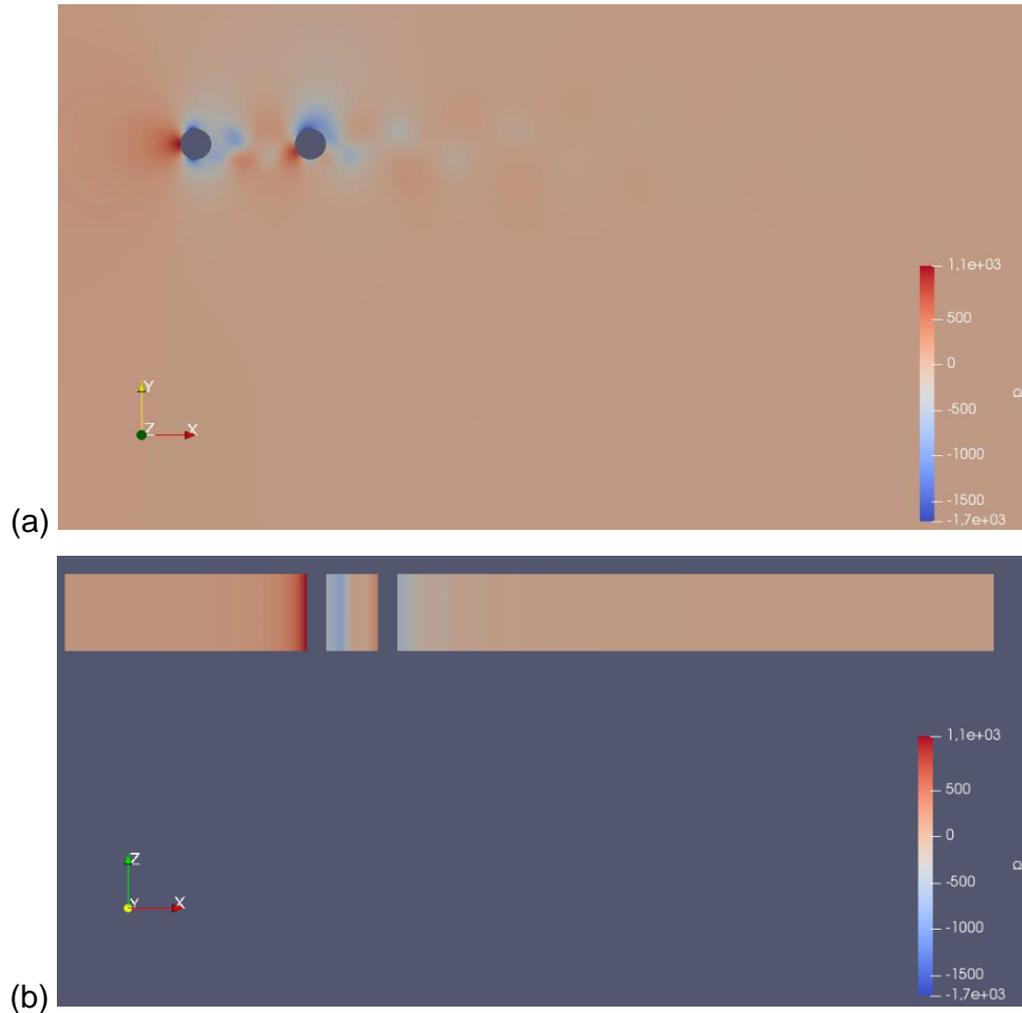
Seguindo para Figura 19, onde é mostrada a pressão instantânea do caso. Aqui há o destaque do acúmulo de pressão no ponto de estagnação do cilindro 1. Também pode ser visto os pontos de flutuação de pressão entre os cilindros e na esteira, associados aos vórtices.

4.6. VARIAÇÃO DA DISTÂNCIA ENTRE CILINDROS.

De forma a avaliar as capacidades de previsão do modelo de simulação em outras configurações, foram realizadas simulações para uma outra situação de distância entre cilindros ($L/D = 1,435$). Para validação, foram utilizados os resultados de Lockard (2009).

Na Tabela 10, são mostrados os resultados de arrasto comparado aos dados experimentais obtidos por Jenkins *et al.* (2006).

Figura 19 – Pressão instantânea no plano (a) YX. (b) ZX.



Fonte: Autor (2022).

Como visto nas análises anteriores, o algoritmo gera uma malha que obtém bons resultados no primeiro cilindro, onde é obtido um resultado médio final muito próximo da malha de estudos A. Da mesma forma, o arrasto do segundo cilindro apesar de ser satisfatório, apresenta um valor um pouco distante do obtido em experimento.

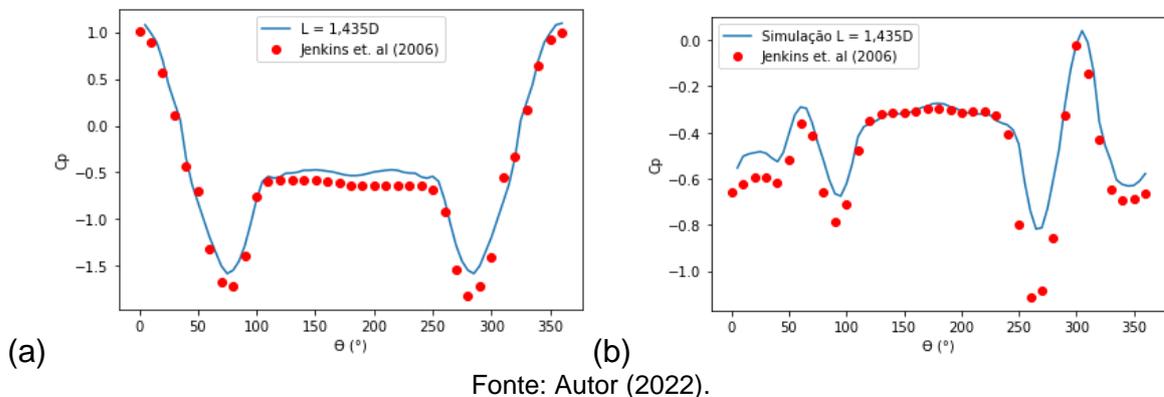
Tabela 10 – Arrasto para simulação de malha com distância entre cilindros de $L = 1,435D$ comparado aos dados experimentais.

Caso	Cd cilindro 1	Cd cilindro 2
Malha $L = 1,435D$	0,5961	-0,1004
Jenkins <i>et al.</i> (2006)	0,62	-0,18

Fonte: Autor (2022).

Na Figura 20, são apresentados os resultados de $\overline{C_p}$ da simulação comparados a dados experimentais. No cilindro 1, pode-se notar o comportamento quase idêntico ao caso anterior de 3,7D de distância, o que era esperado pois a distância tem maior influência nos resultados do segundo cilindro. Vemos então na Figura 20(b), que a simulação obteve resultados satisfatórios entre 120° e 240°. Para as demais regiões, a simulação não prevê com exatidão os resultados experimentais, porém apresenta o comportamento gráfico esperado.

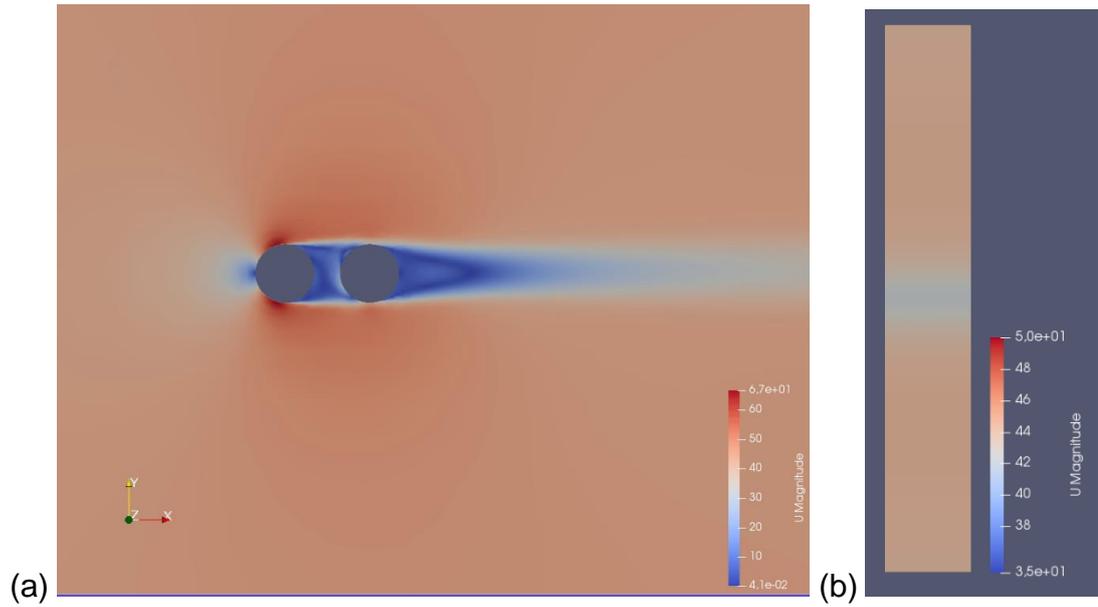
Figura 20 – Coeficiente de pressão médio analisado a partir da circunferência. (a) Cilindro 1. (b) Cilindro 2.



Nas Figuras 21 e 22, vemos os resultados em termos de mapas de contornos. Neste caso, diferente do caso de distância de 3,7D, nota-se a ausência de desprendimento de vórtices entre os cilindros. Em seu experimento Lockard (2009) concluiu que o fenômeno se deve a curta distância entre os cilindros, fazendo com que a camada de cisalhamento do cilindro a montante ligue-se imediatamente ao cilindro a jusante, suprimindo o desprendimento de vórtices.

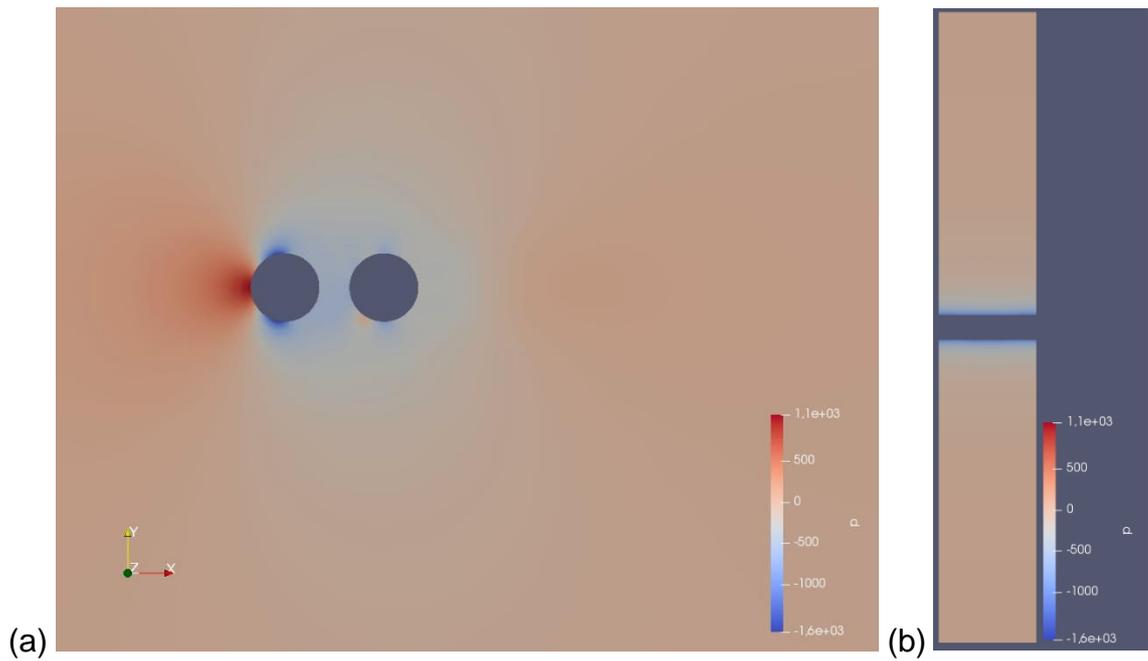
Já para Figura 22, notamos o aumento característico de pressão a montante do cilindro 1. Também se nota um pequeno ponto de pressão na parte inferior do cilindro 2, responsável pelo pico de $\overline{C_p}$ entre 300° e 350° como demonstrado no gráfico da Figura 20(b). Assim, pode-se concluir que o algoritmo foi capaz de gerar uma malha e simular com êxito novas configurações a partir do caso base definido.

Figura 21 – Magnitude da velocidade instantânea vista no plano (a) YX. (b) ZY.



Fonte: Autor (2022).

Figura 22 – Pressão instantânea no plano (a) YZ. (b) YZ.



Fonte: Autor (2022).

5 CONCLUSÃO

Neste trabalho foi desenvolvido um algoritmo em Python para automatizar a geração de malhas computacionais para o caso de cilindros tandem, aliado ao uso do programa de código livre OpenFOAM e o gerador de malhas integrado snappyHexMesh. O problema de cilindros em tandem foi escolhido devido a sua aplicação em diferentes áreas da engenharia como aeroespacial, naval e automotiva.

O algoritmo usa do equacionamento de y^+ para calcular campos importantes da simulação, como as camadas prismáticas. Assim, definindo variáveis de inicialização, o programa desenvolvido calcula altura do primeiro elemento, espessura total das camadas prismáticas, altura da última camada e crescimento máximo, tendo em vista o y^+ alvo definido. Além de calcular valores iniciais para as variáveis turbulentas do caso, como ω e k .

Para avaliar o modelo de simulação, foi preciso definir um domínio base de trabalho. De início, propõe-se dois casos variando o tamanho do domínio na direção Z. Após análises de arrasto e coeficientes de pressões, conclui-se que o corte no domínio pouco influência nos resultados finais, sendo um ponto positivo no custo computacional.

Com o domínio definido em quatro diâmetros de profundidade, iniciam-se análises de refinamentos locais e de camada prismática. Notou-se que para y^+ mais baixos, ocorreu valores menores de coeficiente de arrasto para ambos os cilindros, com refino local tendo menos impacto nesses valores. Para os coeficientes de pressão médio nota-se o comportamento parecido entre todos os quatro casos, tendo uma variação maior entre os valores apenas quando comparado o coeficiente de pressão RMS.

A partir dessas análises, pode-se definir uma malha base, tendo esta 2 milhões de elementos, sendo um fator positivo para o custo computacional. Esta malha apresentou um coeficiente de arrasto próximo ao experimental para o cilindro 1, porém com um arrasto superestimado para o segundo cilindro. Para as análises de coeficiente de pressão e velocidade entre os cilindros a malha se mostrou satisfatória em todas as análises propostas. O mesmo não acontece nas velocidades na esteira a jusante do segundo cilindro, que apesar de mostrarem tendências próximas ao experimental, não apresentaram valores em boa concordância.

Ao variar a distância entre cilindros, os valores dos coeficientes de pressão se mostraram próximos ao experimental, com um resultado gráfico próximo ao previsto na literatura. Também foram obtidos resultados satisfatórios para arrasto nos cilindros.

A divergência que ocorre entre os casos numéricos e experimentais em algumas análises muito se deve a problemas enfrentados para gerar camadas prismáticas refinadas para os cilindros. Ao não se utilizar um y^+ menor que 1 para os elementos adjacentes à parede, os mesmos ficam na região chamada camada tampão em $5 < y^+ < 30$, sendo uma região de incertezas na previsão numérica. A falta de previsibilidade na esteira das velocidades também se deve a limitação de refinamentos locais, que acabam aumentando significativamente o número de elementos e tendo impacto direto no tempo e custo de processamento.

Caso objetivo seja análises mais exatas, cabe o aprimoramento de alguns pontos deste trabalho. Pode-se destacar a necessidade de atenção aos refinamentos locais, principalmente na esteira do problema. Também deve-se procurar meios de obter malhas ainda mais refinadas próximo à parede, já que a métrica de y^+ é essencial para bons resultados.

Com o objetivo desse trabalho alcançado, há de se continuar a expandir as análises. Nos estudos subsequentes, pode-se expandir o algoritmo para quatro ou mais cilindros, estudando o arrasto para casos além dos cilindros alinhados em tandem. Com isso, pode-se estudar casos diversos como estruturas offshore, onde pode ser generalizado com uso de quatro cilindros. Outro passo seguinte é também o acoplamento do processo automatizado de geração de malha e simulação com códigos de otimização.

Apesar das possíveis melhorias, o caso proposto mostrou grande potencial na análise preliminar de cilindros tandem. Ao unir bons resultados e baixo custo computacional, o algoritmo atinge as necessidades propostas inicialmente, assim obtendo uma ferramenta que gera malhas para casos variados, utilizando ferramentas de código livre gerando malhas com baixo número de elementos.

REFERÊNCIAS

ALAM, M., MEYER, J. P., Two interacting cylinders in cross flow. **Physical Review E**, v. 84, p. 056304-056316, 2011.

AUTODESK. Autodesk Help. **SST K-Omega Turbulence Models**, 2019. Disponível em: <https://knowledge.autodesk.com/support/cfd/learn-explore/caas/CloudHelp/cloudhelp/2014/ENU/SimCFD/files/GUID-0F5C4828-9F91-46B6-A16A-2578D72DCFCC-htm.html>. Acesso em: 26 jul. 2022.

CENGEL, Y., CIMBALA, J. **Fluid Mechanics: Fundamentals and Applications**, McGraw-Hill Education, 2006

CFD Direct. **OpenFOAM® and the OpenFOAM Foundation**, 2022. Disponível em: <https://cfd.direct/openfoam/>. Acesso em: 27 jul. 2022.

CHADLVSKI, J. V. V. M., **Análise e validação de modelo de simulação numérica para previsão de ruído aerodinâmico utilizando OpenFOAM e Libacoustics**. 2021. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Aeroespacial) – Centro Tecnológico de Joinville, Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2021.

DEHKORDI, B. G., MOGHADDAM, H. S., JAFARI, H. H., Numerical simulation of flow over two cylinders in tandem arrangement. **ScienceDirect – Journal of Hydrodynamics**, v. 23, p. 114-126, 2011.

FERZIGER, J. H, PERIC, M., **Computational methods for fluid dynamics**, 3. Ed. Stanford: Springer-Verlag, 2001.

JENKINS, L. N. et al. Characterization of unsteady flow structures around tandem cylinders for component interaction studies in airframe noise. In: **AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference, 11**. Monterey: AIAA, 2005.

JENKINS, L. N. et al. Measurements of unsteady wake interference between tandem cylinders. In: **AIAA Fluid Dynamics Conference, 36**. São Francisco: AIAA, 2006.

KHORRAMI, M. R. et al. Unsteady flowfield around tandem cylinders as prototype for component interaction in airframe noise. In: **AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference, 11**. Monterey: AIAA, 2005.

LOCKARD, D. P. et al. Tandem cylinder noise predictions. In: **AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference, 13**. Roma: AIAA, 2007.

MALALASEKERA, W., VERSTEEG, H. K. **An introduction to computational fluid dynamics: the Finite Volume Method**, 2ª edição, Pearson, 2007.

MENTER, F. R. Influence of Freestream Values on k-u Turbulence Model Predictions. **AIAA Journal**, v. 30, No. 6, 1992, p. 1651-1659. (Bruschi et al., 2003).

NEUHART, D. H. et al. Measurements of the flowfield interaction between tandem cylinders. In: **AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference, 15**. Miami: AIAA, 2009.

NOURI, S., HAFSIA, Z., BOULAARAS, S. M., ALLAHM, A., ALKHALAF, S., VAZQUEZ, A. M., Three-dimensional simulations of offshore oil platform in square and Diamond arrangements. **Advances in Mathematical Physics**, 2021. Disponível em: <https://www.hindawi.com/journals/amp/2021/5578391/>. Acesso em: 25 jul. 2022.

OpenFOAM. **4.4 Mesh generation with the snappyHexMesh utility**, 2022.

Disponível em: <https://www.openfoam.com/documentation/user-guide/4-mesh-generation-and-conversion/4.4-mesh-generation-with-the-snappyhexmesh-utility>. Acesso em: 27 jul. 2022.

PYTHON. **What is Python? Executive Summary**, 2022. Disponível em:
<https://www.python.org/doc/essays/blurb/>. Acesso em: 27 jul. 2022.

RAHMAN, M. M., VOURINEN, V., TAGHINIA, J., LARMI, M., Wall-distance free formulatio for SST $k - \omega$ model. **European Journal of Mechanics / B Fluids**, v. 75, p. 71-82, 2019. Disponível em:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0997754616303557>. Acesso em: 20 jul. 2022

SCHLICHTING, H., GERSTEN, K. **Boundary-layer Theory**, 7th Edition, 1979.

SCHUKLA, I. et al. Wall Y plus Approach for dealing with Turbulent Flow Through a Constant Area Duct. **The 4th International Meeting of Advances in Thermofluids**. Melaka, 2011.

WILCOX, D. C. **Turbulence modeling for CFD**. 3. ed. San Diego: Dcw Industries, 2006.

YUCE, M. I., KAREEM, D. A. A Numerical Analysis of Fluid Flow Around Circular and Square Cylinders. **Journal - American Water Works Association**, v. 108:10, p. E546–554, 2016.

ZDRAVKOVICH, M. M. Flow induced oscillations of two interfering circular cylinders. **Journal of Sound and Vibration**, v. 4, p. 511–521, 1985.