

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE TECNOLOGIA
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

**USO DO MODELO NUMÉRICO OPENFOAM NA SIMULAÇÃO
HIDRODINÂMICA DE FLOCULADORES TUBULARES HELICOIDAIS**

Daniel Ramos Nachtigall

**Santa Maria, RS
2021**

Daniel Ramos Nachtigall

**USO DO MODELO NUMÉRICO OPENFOAM NA SIMULAÇÃO
HIDRODINÂMICA DE FLOCULADORES TUBULARES HELICOIDAIS**

Trabalho de Conclusão de Curso a ser apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Civil, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **Bacharel em Engenharia Civil**.

Orientador: Prof. Dr. Leandro Conceição Pinto

Santa Maria, RS
2021

USO DO MODELO NUMÉRICO OPENFOAM NA SIMULAÇÃO HIDRODINÂMICA DE FLOCULADORES TUBULARES HELICOIDAIS

Trabalho de Conclusão de Curso a ser apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Civil, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **Bacharel em Engenharia Civil**.

Banca Examinadora:

Leandro Conceição Pinto (UFSM)
(Presidente/Orientador)

Elvis Carissimi, Prof. Dr. (UFSM)

Débora Missio Bayer, Prof. Dr. (UFSM)

Santa Maria, RS

2021

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais Claudio Nachtigall e Marisa Ramos Nachtigall pelo apoio incondicional e suporte ao longo dos anos de engenharia e de minha vida. Graças a vocês o sonho de cursar engenharia acabou sendo possível de se realizar.

Agradeço às minhas avós Romilda Nachtigall (*in memorium*) e Círia Ramos e ao meu irmão Davi Ramos Nachtigall por terem sido meus companheiros à distância nesses dias de graduação.

Agradeço aos meus amigos Ricardo Xavier, Fábio Walter, Marcos Coradini, Ígor Lindemaier, Letícia Felix, Hevêncio Henrique Dias e Leonardo Felipeto pela companhia frente aos desafios que foram vencidos em conjunto por nós, cada um do seu jeito. Com vocês fui mais forte, espero ter sido de positiva influência a vocês como vocês foram para mim.

Agradeço ao meu padrinho Roberto Nachtigall e ao meu primo Fernando Nachtigall, por terem promovido a minha inspiração inicial pelo mundo da engenharia.

Agradeço à minha madrinha Sônia pelas contribuições na preparação deste texto.

Agradeço ao meu orientador Leandro Conceição Pinto pela paciência e disposição na orientação deste Trabalho de Conclusão de Curso.

RESUMO

No projeto e dimensionamento de uma estação de tratamento de água são muitos os equipamentos implementados, e um desses, em um sistema convencional, é o floculador. Dentre os floculadores eficientes e validados, os floculadores tubulares helicoidais (FTH) constituem uma categoria ainda pouco implementada e com poucos estudos na área de modelagem numérica computacional. Os estudos relativos aos floculadores do tipo FTH indicam uma eficiência de floculação que viabiliza seu uso em estações de tratamento de pequena escala. Contudo, para que essa implementação ocorra é necessário que se encontrem caminhos práticos para o dimensionamento adequado. Dessa maneira, o presente trabalho se propõe a contribuir para a solução dessa dificuldade através da modelagem computacional, utilizando *softwares* gratuitos e de código aberto. O objetivo principal foi desenvolver um modelo hidrodinâmico computacional ajustável, gratuito, funcional e validado, tanto para uso acadêmico quanto profissional. Para ser ajustável e gratuito foram usados apenas *softwares* de uso livre e *open source*. Buscou-se verificar a funcionalidade do *software* através dos *outputs* de estabilidade das simulações, os quais são fornecidos pelo *software* e a validação foi desenvolvida através da análise de independência de malha e da comparação com modelos hidrodinâmicos elaborados com *software* pago, bem como experimentos de laboratório de características semelhantes. Neste trabalho foram analisados dois modelos hidrodinâmicos, um que utiliza maior demanda computacional, mas que conta com um código mais completo e possivelmente mais próximo da realidade física, e outro código mais simplificado de menor demanda computacional, mas que também poderia vir a apresentar resultados assertivos. A geometria criada foi simulada com sucesso, os indicadores internos de erro do *software* de processamento hidrodinâmico apresentaram estabilidade na simulação. Os modelos hidrodinâmicos utilizados apresentaram diferença percentual baixa em comparação com o modelo hidrodinâmico desenvolvido com o *software* pago e com as mesmas configurações e geometria semelhante. Contudo, os resultados do modelo computacional hidrodinâmico foram de diferença percentual significativa na comparação com o modelo experimental de laboratório usados para a validação. A comparação com outros modelos experimentais, bem como possíveis ajustes e calibrações das configurações da geometria usada na simulação são promissores para a validação do modelo computacional desenvolvido neste trabalho.

Palavras-chave: Floculador Tubular Helicoidal. Dinâmica dos Fluidos Computacional. Validação.

ABSTRACT

In the design project of a water treatment plant, a lot of equipment is implemented, being one of them, in a conventional system, the flocculator. Among the different types commonly used, the helical tubular flocculator (FTH) constitutes a category not frequently implemented, as well as with few conclusive studies on its numerical computational hydrodynamics. Studies about the FTH indicate an efficiency of the flocculation that may be viable on the implementation of a minor water treatment plant, however, such implementation is necessary to find reasonable ways to properly design the equipment. The present work goal is to contribute to the solution of this problem through the computational modeling of hydrodynamics. The main goal is to develop a hydrodynamical model adjustable, free, functional, and validated, that could be used for academic and professional purposes. The software functionality was verified through the output's parameters of the stability of the simulations, provided by the software post-processing. The validation was developed through the analysis of the mesh independence, as well as the comparison of the results with similar computational and experimental models. Two different models were developed and analyzed being one more costly on time and computational capacity, but with a more complete governing equations formulation and another less expensive in terms of computational time but with promising results as well. The created geometry was simulated successfully, the error indicators were presented by the processing software with great stability. The comparison of the result with another similar commercial computational model from the literature presented low percentual differences. However, the results of the model confronted with the results from an experimental analysis were somehow of a significant percentual difference value. A future confrontation with other experimental models of the same geometry, as well as calibration and adjustment on the present simulations, are promising for the development of a validation of the computation model.

Keywords: Helical tube flocculator. Computational Fluid Dynamics. Validation.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	7
1.1 Objetivos	8
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	9
2.1 Tratamento de água para consumo humano	9
2.2 Floculadores	10
2.3 Hidrodinâmica da floculação	13
2.4 Equações governantes da hidrodinâmica	16
2.5 Modelagem da turbulência	17
2.6 Dinâmica dos fluidos computacional (CFD)	18
2.7 Estratégia de solução das equações governantes	20
2.8 Etapas das simulações	22
3 MATERIAIS E MÉTODOS	25
3.1 Pré-Processamento	25
3.2 Processamento	30
3.3 Pós-processamento	31
3.4 Cálculo do gradiente de velocidade	32
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	33
4.1 Indicadores de convergência das simulações	33
4.2 Testes de independência de malha	33
4.3 Comparação entre os resultados dos algoritmos SimpleFOAM e InterFOAM	37
4.4 Comparação dos resultados do OpenFOAM com os resultados do Ansys-CFX	38
4.5 Comparação dos resultados do OpenFOAM com resultados experimentais	40
5. CONCLUSÕES	42
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	43

1. INTRODUÇÃO

A inovação na aplicação de metodologias computacionais para o desenvolvimento da engenharia em geral vem se tornando uma possibilidade cada vez mais usada atualmente. O aprimoramento dos projetos vem sendo cada vez mais importante na redução de custos de execução bem como na melhoria da eficiência dos seus elementos constituintes. Especificamente para os sistemas de tratamento de água, um dos pontos de projeto fundamentais é o entendimento dos fenômenos físicos ligados à hidrodinâmica dos fluidos que ocorrem no interior dos equipamentos usados. A análise dos resultados obtidos de modelos numéricos computacionais pode auxiliar na escolha dos métodos mais eficientes de concepção e evitar o superdimensionamento das estruturas hidráulicas que compõem tais projetos.

Um sistema de tratamento convencional de água é constituído das seguintes etapas: coagulação, floculação, decantação, filtração, desinfecção, fluoretação, correção da acidez, armazenamento e distribuição (FERREIRA, 2011). A coagulação é a etapa onde se adiciona sulfato de alumínio na água, que promoverá a agregação do material em suspensão. Na etapa da floculação é promovida a agitação das partículas do conjunto, formando os flocos. A partir da decantação os flocos formados são separados pela ação da gravidade em tanques geralmente retangulares (CAESB, 2021).

Nesta etapa de floculação, os sistemas convencionais utilizam flocladores mecanizados, que usam energia elétrica para promover a agitação com a rotação de pás, ou flocladores hidráulicos de chicanas, que usam a energia hidráulica e a geometria com curvas de 90°, para promover a agitação da água. Um outro tipo de floclador, menos utilizado, é o tubular helicoidal, que conta com uma geometria de curvaturas mais sutis que o floclador de chicanas (CARISSIMI, 2003). Este floclador tem apresentado bons resultados de eficiência de floculação em laboratório, possui custo de implantação interessante, porém tem a hidrodinâmica em seu interior ainda pouco explorada (OLIVEIRA, 2014, pág. 93).

Tendo em vista esta realidade, o presente trabalho se dedica a desenvolver uma metodologia gratuita e viável no estudo da hidrodinâmica do processo de floculação em sistema tubular helicoidal, fazendo uso de ferramentas computacionais da dinâmica dos fluidos.

1.1 Objetivos

O objetivo geral deste trabalho é desenvolver e validar um método computacional para o estudo da hidrodinâmica de um Floculador Tubular Helicoidal (FTH), utilizando *softwares* gratuitos e de código aberto. Dentre os objetivos específicos destacam-se:

a) Verificar se o método usado na simulação da hidrodinâmica de floculadores tubulares tem indicadores de convergência assertivos.

b) Comparar os resultados obtidos pelo presente método com um modelo computacional de *software* comercial e geometria equivalente.

c) Comparar os resultados do presente método com os de um modelo experimental de FTH desenvolvido em laboratório de geometria similar.

Para que a metodologia proposta possa vir a ser aplicada em um futuro projeto ou pesquisa, esta precisa contar com indicadores de funcionalidade positivos, bem como contar com resultados próximos de experimentos que possuam condições impostas equivalentes.

2.REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Tratamento de água para consumo humano

Considerando que as águas de abastecimento têm diferentes origens, suas características podem variar bastante em termos de composição geral, sabor, odor, cor e turbidez por micro-organismos patogênicos (CORNICIUC; SILVA 2008).

A turbidez é a medição da resistência da água à passagem de luz. Com materiais suspensos e finos a turbidez aumenta e a potabilidade diminui. Já a cor depende da quantidade de substâncias dissolvidas na água e, assim como a turbidez, é um parâmetro estético (SABESP, 2021).

Nesse contexto, alguns limites devem ser respeitados para que a água seja considerada potável. Esses limites são definidos no Anexo XX da Portaria de Consolidação nº 5 do Ministério da Saúde (Brasil, 2017) e alterada pela Portaria GM/MS 888 (2021) e pela Portaria GM/MS 1421 (2021) (BRASIL, 2021).

O tratamento convencional da água compreende normalmente a sequência coagulação, floculação, sedimentação, filtração e desinfecção (HILL, 1999). A coagulação e a floculação atuam principalmente na redução da turbidez e da cor, podendo complementarmente contribuir na redução da carga orgânica e de metais pesados (BRASIL, 2017, anexo 3). As etapas de um tratamento convencional estão representadas na Figura 1.

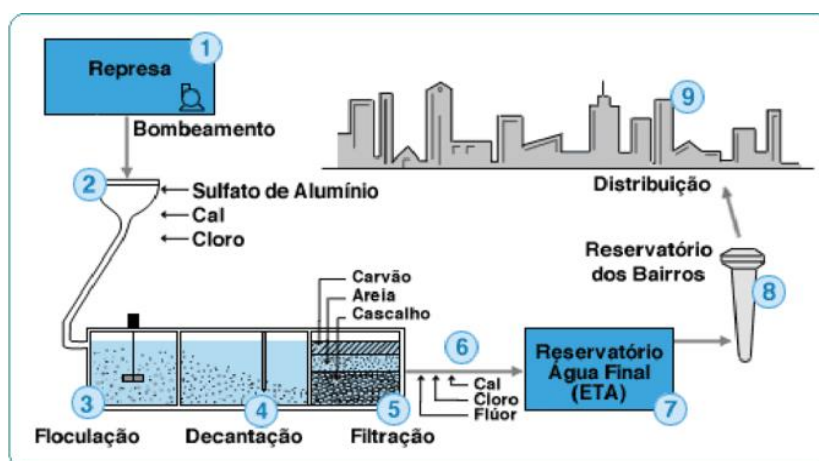


Figura 1 - Fases do Tratamento de Água (SABESP, 2021).

Antes da coagulação, em geral, a água carrega sólidos de baixa granulometria e baixa velocidade de sedimentação (OLIVEIRA, 2014, p. 23). A etapa de coagulação consiste

em resolver a questão desses sólidos, através da adição de um coagulante que contribuirá na etapa de floculação para a aglomeração desses sólidos, resultando em maiores velocidades de sedimentação. Geralmente o coagulante é um sal de alumínio ou de ferro (SANTOS, 2007, p. 361).

A floculação é o processo que envolve a colisão e agregação das partículas de água, sólidos e coagulante, formando flocos facilmente sedimentáveis. O objetivo desta etapa é promover agitação no fluido proporcionando fluxo pelo reator, que com a aglutinação e a sedimentação reduzirá a turbidez e a cor do elemento em tratamento. Essa etapa é feita em um reator, por meio de uma mistura lenta e intensa, que visa a aglutinação em flocos e a preservação dos flocos formados (CORNICIUC, 2015, p. 9). Neste processo, a eficiência se dá em função do tempo de detenção, do gradiente de velocidade e da geometria das câmaras, bem como da densidade, tamanho e resistência ao cisalhamento dos flocos formados (MANFIO, 2018, pág. 18).

Através da floculação é possível aumentar o tamanho do material em suspensão, de acordo com o gradiente de velocidade imposto, que representa a agitação do sistema (SILVA, 2008, p. 14).

2.2 Floculadores

Os floculadores são reatores onde ocorre a floculação, tendo em vista o objetivo de promover a aglutinação das partículas sólidas, formando flocos sedimentáveis. Esses reatores podem ser de contato ou de potência. Os de contato funcionam através do contato de manta de lodo. Os de potência se dividem em 3 grandes grupos: os floculadores pneumáticos, os mecanizados e os hidráulicos (REIS, 2017, pág. 9).

Nos floculadores de contato a floculação ocorre através da retenção de flocos em forma de lodo na região inferior do floculador, fazendo uso da energia hidráulica proveniente do peso dos mesmos para essa aglomeração (JÚNIOR, 2009, pág. 20).

Nos floculadores pneumáticos a formação dos flocos ocorre pela introdução de ar no sistema (CARISSIMI, 2003, pag. 50). A diferença de densidade entre as bolhas de ar e a água faz com que as bolhas subam à superfície, provocando o deslocamento da água e a mistura necessária para a floculação. O gradiente de velocidade de mistura, um importante

parâmetro que será abordado detalhadamente a seguir, pode ser controlado pela regulagem do fluxo de ar.

Os floculadores mecanizados, exemplificados na Figura 2, são equipamentos constituídos de pás ou paletas, que por meio da alimentação com energia elétrica promovem a agitação (PELISSARI, 2006, p. 28). Para este floculador, o gradiente de velocidade de mistura pode ser controlado alterando-se a intensidade de rotação ou variando-se a geometria das pás dos agitadores. A vantagem do floculador mecanizado se dá pela liberdade operacional que o equipamento fornece. Isso implica em fácil variação da agitação, que viabiliza o tratamento em diferentes qualidades de água bruta. São desvantagens do floculador do tipo mecanizado o alto custo operacional, devido à demanda pela energia elétrica, e um custo elevado de instalação. Existe também, nesse tipo, muitas zonas mortas e regiões de curto circuito (OLIVEIRA, 2014, p. 37). Zonas mortas são regiões do reator com tempo de detenção muito além da média, implicam em menor troca de massa e pequena quantidade de movimento. Curtos-circuitos são caminhos preferenciais de fluxo que acabam implicando em tempo de detenção médio inferior ao tempo de detenção teórico (CESTARI, 2012, p. 96-97).

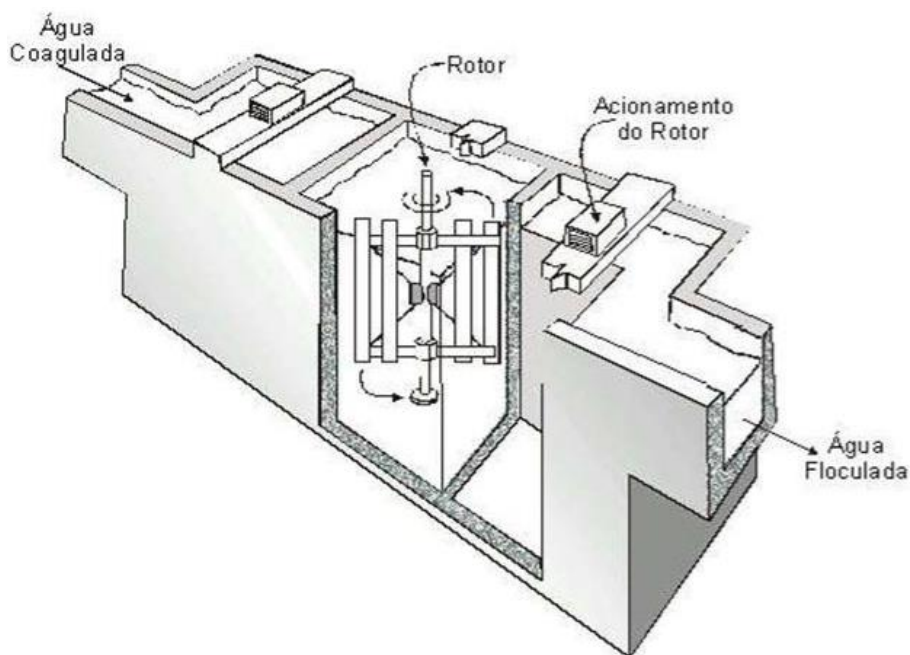


Figura 2 - Exemplo de floculador mecânico (SANEAGO, 2006, p. 45).

Os floculadores hidráulicos fazem uso da energia da corrente líquida dissipada durante o fluxo através do reator. O fluido percorre caminhos, através de canais ou

tubulações, com sucessivas mudanças de direção, transferindo a energia hidráulica da própria corrente para a massa líquida (SOARES, 2014, p. 23-24).

Comparando os dois últimos tipos de flocladores, os mecânicos apresentam maior flexibilidade operacional, menor perda de carga e limpeza mais facilitada. Porém, os flocladores hidráulicos têm um menor custo de implantação, operação e consumo de energia.

Um exemplo de floclador hidráulico muito utilizado é o de chicanas (Figura 3). As chicanas são obstáculos inseridos no interior de um tanque, os quais proporcionam mudanças na direção de fluxo do fluido.

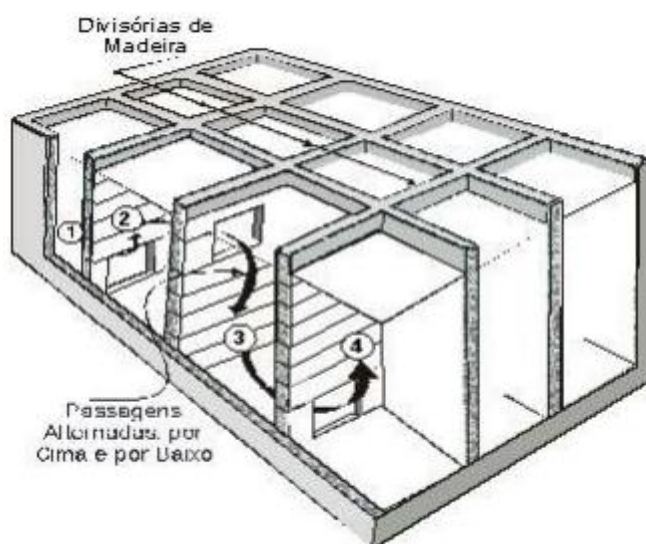


Figura 3 - Exemplo de floclador de chicanas (SANEAGO, 2006, p. 45).

Por volta de 1981, um novo tipo de floclador hidráulico foi proposto, apresentando configuração tubular helicoidal (MANFIO, 2018, pag. 36). O desenvolvimento desse floclador teve como objetivo um esquema de tratamento em linha e compacto. Os flocos são gerados ao longo do reator, conforme seu traçado helicoidal (CARISSIMI, 2003, p. 10). A geometria é obtida com o enrolamento de uma tubulação flexível em um tubo rígido, conforme a Figura 4.

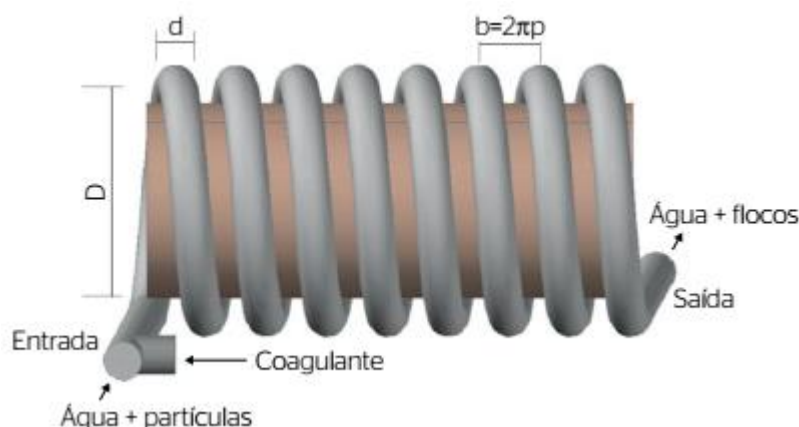


Figura 4 - Flocoador tubular helicoidal (VANALI; TEIXEIRA, 2019, p. 775), sendo D o diâmetro de enrolamento, d o diâmetro da tubulação, p o passo do helicóide e b a distância entre os eixos da tubulação.

Os estudos têm demonstrado que os flocoadores tubulares helicoidais apresentam grande eficiência de floculação, com baixos tempos de detenção, sem precisar de equipamentos para mistura, sem consumo de energia elétrica, sendo ideais para instalações de pequeno porte, por serem sistemas compactos (OLIVEIRA, 2017, p. 378). A logística, implantação e manutenção do reator helicoidal é de significativa viabilidade e muitos estudos indicam altos valores de gradiente de velocidade para curtos tempos de processo. Dessa maneira, os autores desses estudos indicam o uso da tubulação helicoidal no processo de floculação (OLIVEIRA, 2017, p. 378).

Contudo, são tímidas as aplicações em escala real desses flocoadores tubulares helicoidais. Uma justificativa possível para essa pouca recorrência de aplicação pode ser as muitas dúvidas a respeito do dimensionamento das unidades desse tipo (SARTORI, 2015, p. 21).

2.3 Hidrodinâmica da floculação

Alguns parâmetros e conceitos físicos importantes que devem ser considerados no estudo da hidrodinâmica de flocoadores tubulares helicoidais são a perda de carga hidráulica, a turbulência, o número de Reynolds, o gradiente médio de velocidade e o tempo teórico de detenção.

Um fluido em deslocamento conta com uma energia que pode ser proveniente de diferentes fontes, como a diferença de nível entre reservatórios ou uma estação de

bombeamento. A perda de carga é a perda dessa energia quando o fluido se desloca no interior do conduto. Está relacionada com a turbulência do escoamento, a rugosidade da superfície, a vazão e o percurso.

SOUZA et al. (2010) define turbulência como a característica de um fluxo de fluidos, onde as velocidades instantâneas variam irregularmente e aparentam serem aleatórias, a tal ponto que apenas propriedades estatísticas podem ser reconhecidas e submetidas a uma análise.

Uma boa forma de se entender um regime turbulento pode ser abordando inicialmente o fenômeno a partir do regime laminar. O regime laminar, diferentemente do turbulento, exibe flutuações regulares e previsíveis. O regime onde um fluxo laminar torna-se turbulento pode ser descrito como de transição laminar-turbulenta, conforme representado na Figura 5.

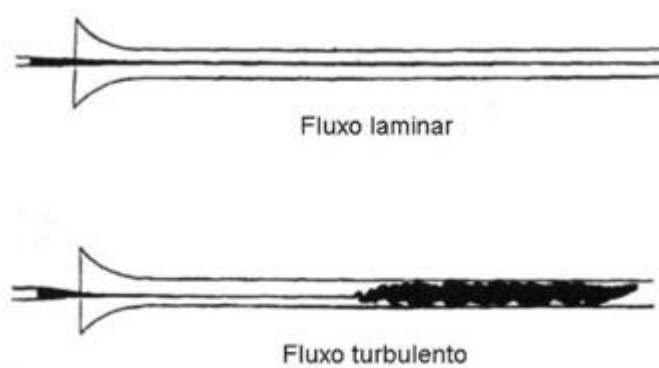


Figura 5 - Experimento de Reynolds sobre a natureza do fluxo (Scientia, 2021).

O número de Reynolds é um parâmetro adimensional desenvolvido em 1883 por George Gabriel Stokes e posteriormente popularizado pelos estudos experimentais de Osborne Reynolds. É o principal parâmetro que correlaciona o comportamento viscoso com o inercial de todos os fluidos newtonianos (WHITE, 2011), sendo expresso por:

$$Re = \frac{\rho \times V \times L}{\mu}. \quad (1)$$

Neste parâmetro, V e L são escalas de velocidade e de comprimento características do escoamento, ρ é a massa específica do fluido e μ a viscosidade dinâmica. Um valor de Número de Reynolds (Re) muito baixo indica movimento muito lento, onde as forças viscosas são importantes e os efeitos da inércia desprezíveis. Já um valor de Re moderado implica escoamento laminar com variação suave e previsível. Para valores de Re altos, o

escoamento poderá se tornar turbulento, impondo fortes flutuações randômicas de alta frequência (WHITE, pag. 40).

A definição do número de Reynolds baseou-se no experimento realizado por Osborn Reynolds em 1883 representado aqui pela Figura 5.

Nesse experimento, Reynolds procurou visualizar o padrão de escoamento de água através de um tubo de vidro, com o auxílio da injeção de um traçador a base de corante, no interior da tubulação. O pesquisador observou que, para pequenas vazões, o traçador formava um filete contínuo, paralelo ao eixo do tubo. Vazões crescentes induziam oscilações, que eram amplificadas com o aumento da vazão, terminando com o desaparecimento completo do filete, isto é, com uma mistura completa do traçador com o fluido no interior do tubo de vidro, indicando uma diluição total. Essa experiência demonstrou a existência de dois regimes de escoamento: o escoamento laminar e o escoamento turbulento.

O número de Reynolds encontra seu fundamento na relação entre as forças inerciais e as forças viscosas atuantes no escoamento, sendo este fator importante na análise da turbulência (Scientia, 2021).

Dentro do contexto de flocladores tubulares helicoidais, SREENIVASAN e STRYKOWSKI (1983) desenvolveram um estudo sobre as transições e oscilações de turbulência na tubulação helicoidal. Os autores observaram que para um escoamento numa tubulação helicoidal, ocorre um processo de laminarização do escoamento turbulento a partir da quarta volta.

Para o escoamento em tubulação helicoidal, segundo apresentado em WEBSTERE e HUMPHREY (1997), valores de Reynolds menores que 2300 indicam escoamento laminar, valores entre 2300 e 8000 correspondem ao regime de transição e a partir de 8000 o escoamento passa a ser turbulento.

Enquanto o número de Reynolds é um parâmetro voltado ao entendimento da turbulência em diferentes geometrias, o gradiente de velocidade serve ao entendimento e determinação do grau de agitação das partículas em diferentes situações de fluxo. O gradiente de velocidade está associado com a possibilidade de ocorrer contato entre as partículas. Valores pequenos desse gradiente implicam em baixa chance de contato, enquanto altos valores implicam em perigo de ruptura dos flocos já formados devido ao

excesso de agitação (SILVA, 2008, pág. 14). O gradiente de velocidade é um conceito fundamental do qual, através de simplificações de cálculo, se desenvolveu o gradiente médio de velocidade (G), que se torna o termo utilizado na avaliação da intensidade de floculação das unidades de tratamento, sendo parâmetro básico de projeto (OLIVEIRA, 2014, pág. 30).

A equação deduzida por Camp e Stein (1943), a partir do conceito de viscosidade, para o cálculo de G em s^{-1} para misturadores hidráulicos é dada por:

$$G = \left(\frac{\gamma \times Q \times hf}{\mu \times Vol} \right)^{0,5}, \quad (2)$$

onde $\gamma(N/m^3)$ se refere ao peso específico da massa líquida, $Q(m^3/s)$ é a vazão de alimentação, $hf(m)$ é a perda de carga e $Vol(m^3)$ o volume da câmara de mistura.

Outro importante parâmetro usado no dimensionamento de unidades de floculação é o tempo teórico de detenção hidráulico (DTH), que corresponde ao intervalo de tempo que as partículas permanecem dentro do reator.

O DTH deve ter valor tal que não seja alto a ponto de haver tempo para desestruturação dos flocos já formados e ao mesmo tempo não ser baixo a ponto de não haver tempo satisfatório para os flocos se formarem (SOARES, 2014, pág. 33).

A expressão do DTH é dada pela seguinte equação (LIBÂNIO, 2010):

$$t = \frac{Vol}{Q}. \quad (3)$$

2.4 Equações governantes da hidrodinâmica

Os fluxos hidrodinâmicos podem ser representados por um conjunto de equações denominadas de equações de Navier-Stokes. Estas são compostas pela equação da continuidade (4) (WHITE, 2011, pág. 52) e a equação da quantidade de movimento (5) (PASKIN, 2016, pág. 1):

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0, \quad (4)$$

$$\rho \frac{d\mathbf{u}}{dt} = -\nabla p + \nu \nabla^2 \mathbf{u} + \rho \mathbf{g} + \mathbf{F}, \quad (5)$$

apresentadas neste caso para a condição de fluido incompressível ($\rho = constante$). Nestas equações, \mathbf{u} representa o vetor campo de velocidade, que é basicamente a atribuição da velocidade para todo o ponto no espaço. Já o operador $\nabla \cdot$ indica a divergência aplicada a \mathbf{u} . A equação da continuidade expressa o divergente de \mathbf{u} que é igual a zero, como

apresentado em (4), e ultimamente infere matematicamente que o volume se conserva no sistema.

Na equação (5), ρ representa a massa específica do fluido, p a pressão, t o tempo e g o vetor aceleração da gravidade. A equação é um desenvolvimento da 2ª lei de Newton para fluidos, sendo que $\rho \frac{du}{dt}$ representa o termo de variação de quantidade de movimento por unidade de volume, enquanto os termos do lado direito da igualdade representam as forças instantâneas atuantes no sistema. O termo $-\nabla p$ contabiliza os esforços associados com o gradiente de pressão cinemática atuante no fluido, $\nu \nabla^2 u$ contabiliza os esforços devido às tensões viscosas, e o termo ρg contabiliza o esforço gravitacional atuante no elemento diferencial de fluido. O termo final, F , representa qualquer outra força externa atuante no sistema.

2.5 Modelagem da turbulência

Via de regra, os engenheiros desejam prever o comportamento dos sistemas envolvendo fluidos para entender a relação entre suas variáveis, permitindo otimizar as operações. Tipicamente, podem ser realizados experimentos para entender os sistemas diretamente, ou então podem ser construídos modelos matemáticos para representar esses sistemas através das equações de Navier-Stokes (SAYMA, pag. 9), e dependendo do caso, a turbulência deverá ser contabilizada na forma de um modelo estatístico. A modelagem da turbulência pode ter diferentes abordagens, tendo dessa maneira diferentes modelos de turbulência.

O modelo k-epsilon foi um dos primeiros modelos de turbulência idealizados. É um modelo ideal para previsão de comportamento de fluxo em regiões afastadas de superfícies sólidas (AutoDesk, 2019). Este modelo soluciona o problema de fechamento das equações aproximadas de Reynolds através da solução de duas variáveis principais, a energia cinética da turbulência (k) e a taxa de dissipação da turbulência (ϵ). A variável k determina a energia contida nas escalas da turbulência enquanto ϵ determina a dissipação desta energia ao longo das escalas representadas no modelo (CFD Online, 2021).

O modelo k-ômega é um modelo mais recente de uso muito comum em modelagens de turbulência. Conta também com duas variáveis, a energia cinética da turbulência (k) e a taxa de dissipação específica da turbulência (ω) (CFD Online, 2021). O

modelo k-ômega tem boa aplicabilidade para simular fluxo em subcamadas viscosas, mesmo que próximas a paredes (AutoDesk, 2019).

O modelo k-ômega SST é uma combinação entre os modelos de turbulência k-ômega e k-epsilon. Essa combinação ocorre de uma maneira que k-ômega é usado na região próxima à superfície sólida (próxima à parede da tubulação), enquanto k-epsilon é usado na região livre do escoamento (afastada da parede do conduto), dessa maneira resolvendo limitações associadas ao modelo k-epsilon quando usado singularmente (CFD Online, 2021).

2.6 Dinâmica dos fluidos computacional (CFD)

Com promissor custo-benefício, vêm sendo desenvolvidas atualmente soluções numéricas das equações governantes do escoamento que, a partir do advento dos computadores digitais, definem a metodologia conhecida como Dinâmica dos Fluidos Computacional, CFD (do inglês, *Computational Fluid Dynamics*) (SAYMA, 2009, pág. 8). O uso desta técnica pode implicar em redução de tempo necessário para desenvolvimento de soluções, bem como estudar problemas relacionados a grandes dimensões geométricas sem aumento de custos de projeto (ANDRÉ, 2010, pág. 58).

São exemplos de aplicações práticas dessa técnica a previsão de desempenho de componentes de aeronaves em projetos do nicho aeroespacial, comparação entre sistemas auxiliares automotivos em projetos de automóveis e avaliações preliminares de comportamento de medicamentos na rede sanguínea de seres humanos em pesquisas biomédicas (SAYMA, 2009).

Para essas análises existem diversos modelos disponíveis, porém nenhum deles pode ser aplicado adequadamente a todos os tipos de escoamento, exigindo do pesquisador ou projetista definir o modelo mais adequado ao caso de estudo (REZENDE, pag. 51). De acordo com a exigência computacional, os modelos de análise de turbulência podem ser dos seguintes tipos:

a) Simulação numérica de escoamentos turbulentos via equações aproximadas de Reynolds (RANS - Reynolds Averaged Navier-Stokes): As equações desse modelo são resultado da substituição nas equações de Navier-Stokes das grandezas do escoamento decompostas em duas parcelas, uma média no tempo e outra que representa as

flutuações devidas à turbulência. Como resultado deste procedimento surge um termo chamado tensor de tensões de Reynolds que será modelado matematicamente.

b) Simulação de grandes escalas (LES – Large Eddy Simulation): Nesta técnica, as grandes escalas são calculadas diretamente pela solução das equações completas e para as pequenas escalas utilizam-se modelos de escalas sub-malha. A formulação é transiente e tridimensional.

c) Simulação numérica direta (DNS – Direct Numerical Simulation): Neste caso as equações são resolvidas para todas as escalas do escoamento, exigindo muito refinamento e passos muito pequenos (REZENDE, 2009, pág. 75).

A Figura 6 ilustra um comparativo entre as três técnicas, onde é possível verificar a relação custo computacional *versus* grau de aplicação do modelo na solução das escalas turbulentas.

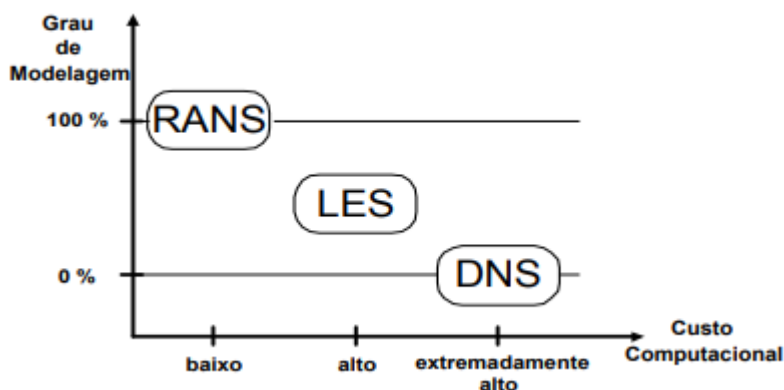


Figura 6 - Relação do grau de modelagem da turbulência versus o custo computacional empregado (REZENDE, 2009).

Considerando a maior acessibilidade computacional e financeira na verificação da validade dos resultados em uma simulação, optou-se no presente trabalho pela modelagem RANS. Para a aplicação da RANS no processo de solução de escoamentos turbulentos, diferentes modelos de turbulência podem ser utilizados para modelar as escalas do escoamento. Este método pode ser promissor para o problema aqui abordado, visto que as médias das flutuações das variáveis do escoamento podem ser consideradas nulas, oscilando em torno de um escoamento médio que é resolvido pelo modelo.

2.7 Estratégia de solução das equações governantes

O *software* selecionado para o desenvolvimento deste trabalho foi o de código aberto OpenFOAM (GREENSHIELDS, 2012; WELLER, 1998). A seleção entre os algoritmos disponíveis neste *software* baseou-se nas características do problema estudado, o qual admite a incompressibilidade do fluido, que o escoamento ocorre em conduto forçado, que o fluido é homogêneo e está sob regime turbulento. Foram definidos dois algoritmos que mais se aproximam do problema, um de maior eficiência computacional devido ao seu funcionamento em regime permanente, sem solução no domínio do tempo, o SimpleFOAM, e outro de maior riqueza de detalhes no resultado devido ao código contemplar a ação da gravidade, denominado InterFOAM. Essas características dos dois *solvers* se dá devido às diferentes estratégias usadas por cada um na solução das equações governantes.

O SimpleFOAM usa o algoritmo SIMPLE na solução das simulações. SIMPLE é a sigla na língua inglesa para Método Semi Implícito das Equações relacionadas pela Pressão (*Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations*) (OpenFOAM User Guide, 2021).

As equações (4) e (5) ficam descritas da seguinte forma no algoritmo SIMPLE:

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0, \quad (6)$$

$$\mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u} - \nabla \cdot (\nu \nabla \mathbf{u}) = -\nabla p + S\mathbf{u}. \quad (7)$$

A equação da continuidade permanece inalterada no código, contudo a equação de momento acaba tendo algumas adequações. Nessas novas alterações $S\mathbf{u}$ representa uma fonte de quantidade de movimento (OpenFOAM User Guide, 2021). O termo de derivada total no tempo é suprimido, uma vez que o SimpleFOAM foi idealizado para o estudo de escoamentos permanentes. As equações (6) e (7) correspondem a um sistema com 4 equações e quatro incógnitas, sendo três equações de quantidade de movimento nas direções cartesianas e a equação da continuidade, enquanto as variáveis são as componentes de velocidade nas direções cartesianas e a pressão. A dificuldade de solução analítica deste sistema de equações está no fato de que não existe uma equação para a pressão pois a equação (7) na verdade corresponde a uma restrição na equação (6) das componentes de velocidade. Isso quer dizer que a solução das equações de quantidade de movimento deve satisfazer à condição de divergência livre imposta pela equação (6). Portanto, a estratégia de solução do problema consiste resumidamente em:

- 1 - Isolar o campo de velocidades na equação de quantidade de movimento;
- 2 - Substituir o resultado do passo anterior na equação da continuidade, o que resulta na equação de Poisson;
- 3 - Resolver a equação de Poisson, determinando a pressão;
- 4 - Corrigir o campo de velocidades na equação de quantidade de movimento e verificar qual o resíduo resultante;
- 5 - Repetir o processo de forma iterativa até que se atinja um resíduo mínimo aceitável.

O InterFOAM usa o algoritmo PIMPLE na solução das simulações. PIMPLE é uma mescla entre o algoritmo PISO (Pressão Implícita com divisão do Operador) e o algoritmo SIMPLE. Para a simulação deste trabalho foi configurado para uso apenas o algoritmo PISO.

A equação de momento do algoritmo PISO pode ser melhor entendida se apresentada por extenso, compreendendo os três eixos:

$$\rho g_x - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) = \rho \frac{du}{dt}, \quad (8)$$

$$\rho g_y - \frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) = \rho \frac{dv}{dt}, \quad (9)$$

$$\rho g_z - \frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) = \rho \frac{dw}{dt}, \quad (10)$$

sendo u , v e w as componentes da velocidade nas direções x , y e z , respectivamente.

Nestas equações, as variáveis g_x e g_y representam as componentes da aceleração gravitacional nas direções x e y , que no presente estudo são nulas pois a aceleração gravitacional foi configurada para ocorrer na direção z .

Em comparação com a equação de momento do SIMPLE, a equação de momento do PISO é mais completa por incluir o termo da força de gravidade (g) no conjunto de forças atuantes no fluido, além da solução no domínio do tempo. Um processo iterativo similar é usado como estratégia de solução, sendo que teremos um resultado para cada intervalo de tempo.

No processo de modelagem da turbulência, três parâmetros principais devem ser determinados inicialmente: k , ε e ω . Esses parâmetros estão em função do número de Reynolds (Re), do diâmetro da tubulação (d) e da velocidade de entrada do fluido (U). Outros parâmetros intermediários também são usados na determinação destes

parâmetros principais, eles são a intensidade da turbulência (I), a escala de comprimento de turbulência (L), e a constante C_μ do modelo de turbulência que é usualmente estimada no valor de 0,09 (Simscale, 2021).

As fórmulas usadas para a determinação dos parâmetros principais de turbulência são as seguintes (Simscale, 2021):

$$i = 0,1 \times Re^{-\frac{1}{8}}, \quad (11)$$

$$l = 0,07 \times d \text{ (m)}, \quad (12)$$

$$k = \frac{3}{2} \times (U * I)^2, \quad (13)$$

$$\varepsilon = C_\mu \times \left(\frac{k^2}{L} \right)^{\frac{3}{4}}, \quad (14)$$

$$\omega = C_\mu \times \left(\frac{k}{L} \right)^{\frac{3}{4}}. \quad (15)$$

2.8 Etapas das simulações

As simulações numéricas são feitas em três etapas (VARGAS, 2015, pág. 73), que são descritas a seguir:

Etapa 1) Pré-processamento: envolve definição dos parâmetros de entrada, como vazão e pressões iniciais, da malha e o seu refinamento (que influencia diretamente na precisão dos resultados e na demanda computacional), e do modelo matemático adequado ao caso.

Etapa 2) Processamento: utilização do algoritmo, que é um modelo matemático computável, que modela e soluciona as equações a partir das configurações definidas.

Etapa 3) Pós-processamento: interpretação utilizando programas de pós-processamento e análise dos resultados.

Os *softwares* usados no pré-processamento são de modelagem geométrica, que com a sua aplicação viabilizam a criação das geometrias estudadas e a sua exportação em forma de matrizes, para assim serem manipuladas pelos *softwares* de processamento. Muitas vezes os pacotes comerciais contam com um conjunto de *softwares contendo* o pré-processamento, processamento e pós processamento no mesmo produto. No caso

desse estudo foi utilizado para o pré-processamento o *software* de uso livre Salome v9.6 (EDF et al., 2001). Nesta etapa, as geometrias têm sua resolução ajustável, onde resoluções maiores exigem maior esforço computacional e implicam em resultados mais precisos, enquanto geometrias com menores resoluções são mais rápidas de simular, porém os resultados ser imprecisos.

Tendo em vista essa questão, usualmente em simulações CFD existe a prática de se verificar a independência de malha. Para essa verificação se criam malhas de mesma geometria e diferentes resoluções, simulando-as sobre mesmas condições. Os resultados das simulações dessas diferentes malhas são então comparados, visando verificar a partir de qual número de células já se apresenta independência da resolução da malha em relação aos resultados (LEAP, 2021).

Na etapa do processamento três técnicas são as mais utilizadas para a resolução dos problemas CFD. A primeira é o método dos elementos finitos, que se dá pela discretização do sistema em elementos de dimensão finita, que usam um processo de interpolação para resolver as equações diferenciais (Bathe, 2008). A segunda é o método das diferenças finitas, que tem como princípio a discretização do domínio em forma de malha, e aproximação das derivadas pelas diferenças discretas entre os pontos da malha. A terceira é o método dos volumes finitos, que se trata de um domínio decomposto em volumes finitos de controle, onde equações algébricas discretas são usadas para representar as variáveis dentro do volume (Moukalled et al, 2016).

São diversos os *softwares* de CFD disponíveis, cada um usando a sua técnica específica, sendo a vasta maioria deles comerciais. Entre estes se destacam os *softwares* ANSYS CFX v19 (SWANSON, 1970) e o SIMSCALE (HEINY, 2013). Já o *software* de código aberto OpenFOAM versão 2.1.1 (GREENSHIELDS, 2012; WELLER, 1998) é de uso gratuito e consiste em um conjunto de diferentes algoritmos (*solvers*) que foram desenvolvidos cada um para problemas de tipos específicos. O OpenFOAM baseia-se no método dos volumes finitos em sua programação (OPENFOAM WIKI, 2021).

Como descrito anteriormente, para a etapa de processamento foram selecionados os algoritmos SimpleFOAM e InterFOAM, disponíveis no pacote OpenFOAM, para avaliar a hidrodinâmica dentro do floculador tubular helicoidal. O SimpleFOAM é um algoritmo de menor demanda computacional, que promete resultados mais acessíveis, além de não

contar com o termo de derivada temporal. Em contrapartida o InterFOAM apresenta maior complexidade, em função da inclusão do termo de derivada temporal, sendo então de caráter transiente (HOLZMANN, 2020). Por isso se espera deste último algoritmo resultados mais precisos e simulações em períodos mais longos.

Nesta etapa de processamento, os algoritmos apresentam indicadores de convergência importantes ao longo das simulações, como o resíduo final das variáveis de velocidade, pressão e turbulência e o número de Courant. O indicador de resíduo final representa o erro no balanço dos termos das equações de conservação a partir de cada interação, e devem apresentar valores abaixo de 10^{-6} em uma simulação estável (DMS, 2021). Já o número de Courant, que faz parte de simulações de caráter transiente, representa o grau de precisão na solução das escalas do escoamento, para o intervalo de tempo (Δt) estabelecido na simulação. Dessa maneira, um Δt adequado ao caso determina a estabilidade na solução da simulação em questão (CFD-ONLINE, 2021; IDEALSIMULATIONS, 2021). Vale ressaltar que o Número de Courant é um indicador existente apenas para o algoritmo do InterFOAM e não para o algoritmo do SimpleFOAM, tendo em vista sua utilidade apenas para a simulação de caráter transiente (HOLZMANN, 2020).

A partir do pré-processamento e da computação matemática, é desenvolvida a etapa de pós-processamento. O pós-processamento geralmente conta com um *software* que lê os resultados da simulação e gera sua representação gráfica (MALALASEKERA, 2007). O OpenFOAM (GREENSHIELDS, 2012; WELLER, et al. 1998) em sua instalação nativa já contém um *software* para tal, o Paraview v5.91 (KITWARE; ALAMOS, 2002). Neste estudo foi utilizado este mesmo *software* para o pós-processamento.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são apresentados os procedimentos metodológicos para o desenvolvimento do trabalho, sendo estes organizados segundo as três etapas de simulação descritas no capítulo anterior.

3.1 Pré-Processamento

As seguintes configurações foram utilizadas para cumprir os objetivos específicos *a* e *b*: vazão de entrada $Q = 6,67 \times L/\text{min}$, diâmetro da tubulação $d = 0,0125 \text{ m}$, diâmetro de enrolamento $D = 0,1125 \text{ m}$, passo do helicoide $p = 0,003978874 \text{ m}$, número de Reynolds $Re = 7608$ e um total de 4 voltas.

Para cumprir com o objetivo específico *c* foram usadas as configurações: Vazão de entrada do experimento $Q = 1,11 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{h}$, diâmetro da tubulação $d = 0,0125 \text{ m}$, diâmetro de enrolamento $D = 0,1125 \text{ m}$, número de Reynolds $Re = 109790$ e um total de 4 voltas.

A geometria original física de um reator helicoidal em escala piloto é composta de muitas voltas ao redor de um cilindro de maior diâmetro. Por questões de limitação computacional e conforme SARTORI (2015), é uma alternativa viável estudar uma geometria com apenas 4 voltas, pois segundo este autor os resultados mostram que, já após a segunda volta o escoamento no interior de unidades tubulares helicoidais não apresenta grandes variações dos parâmetros médios, mantendo-se praticamente constante até a saída do reator. Essa redução, a princípio, favorece a eficiência computacional da análise, sem comprometer os resultados.

Tendo em vista que a geometria de MANFIO (2018) é constituída de 32 voltas, se estimou parâmetros por volta na comparação entre a simulação deste trabalho e o experimento, e se multiplicou esses parâmetros pelo número de voltas da geometria de MANFIO (2018).

A criação digital da geometria se deu a partir do *software* SALOME versão 9.6 (EDF et al., 2001). A geometria é então exportada em formato de matrizes, representando os volumes infinitesimais, possibilitando o processamento da simulação do fluxo no *software* de processamento (SALOME, 2021).

Na Figura 7 são apresentadas as etapas do processo de criação da geometria e da malha de cálculos, sendo que a Figura 7a diz respeito à criação da curva tridimensional helicoidal, a 7b ao desenho do perímetro do que será a borda da tubulação, a 7c corresponde à criação da seção de entrada do fluido (*inlet*), a 7d à criação da parede da tubulação (*pipe*) e da seção de saída de fluido (*outlet*) a partir do comando de extrusão (comando *extrusion along path*) e a 7e corresponde à geração da malha de cálculos com as coordenadas traduzíveis na forma de uma matriz.

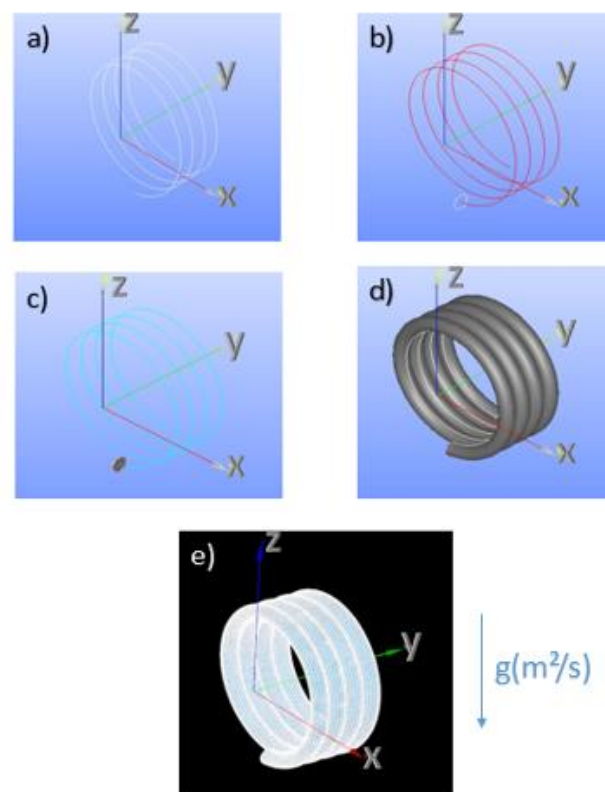


Figura 7: Processo de criação da malha.

Para a elaboração da geometria e da malha de cálculos, inicialmente foi criada a curva que determina o eixo central da tubulação. Tal curva é inserida no *software* através das seguintes equações parametrizadas pela variável independente t :

$$x(t) = 0,05625 \cos(t), \quad (16)$$

$$y(t) = 0,00225 t, \quad (17)$$

$$z(t) = 0,05625 \sin(t), \quad (18)$$

com t variando entre os valores 4,8 e 29,8. Aplicando-se no *software* um total de 100 interações dentro dessa faixa de variação chega-se a uma interação a cada 0,25 t .

Partindo dessa configuração, na Figura 7b, foi definido um círculo de raio $r = 0,00625\text{m}$ de centro concomitante com o ponto inicial da curva. A partir dessas duas linhas tridimensionais construídas anteriormente, conforme a Figura 7c, se definiu a seção computacional de entrada de fluido (*inlet*). A criação da parede da tubulação (*pipe*) e da seção de saída do fluido (*outlet*) é representada na Figura 7d. E, finalmente, a transformação da geometria em uma malha de cálculos está representada na Figura 7e, onde o tipo de elemento de malha usado foi o tetraédrico.

A partir da estrutura geométrica construída, a malha de cálculos pode ser gerada de forma que o sistema possa ser computado pelo OpenFOAM (GREENSHIELDS, 2012; WELLER, 1998). Para a mesma geometria foram criadas malhas com diferentes refinamentos, com a finalidade posterior de avaliar a independência da malha neste estudo.

A geometria resultante dessa metodologia de criação foi um helicóide de 4 voltas, com diâmetro interno $d = 0,0125\text{ m}$, diâmetro de enrolamento $D = 0,113\text{ m}$ e passo $p = 0,004\text{ m}$, totalizando uma distância $e = 0,012486\text{ m}$ entre as bordas da tubulação de cada volta. Os detalhes geométricos são representados na Figura 8.

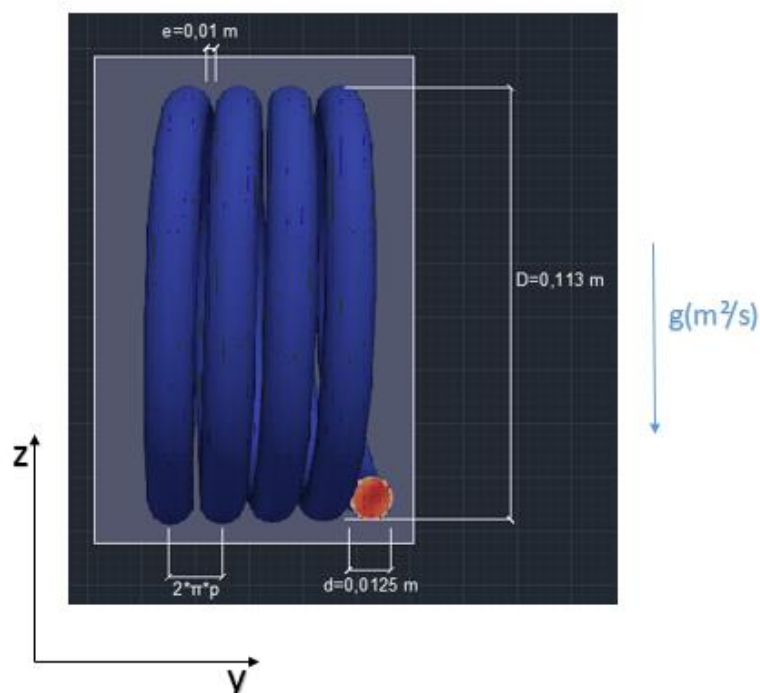


Figura 8: Dimensões finais do modelo.

Para a geração das malhas, foram impostas as condições de células tetraédricas, onde as configurações da dimensão linear máxima e mínima das células são definidas (Figuras 9 e 10). Ao todo foram construídas 8 malhas, com um número total de células variando entre 13.184 e 938.417, conforme a Tabela 1.

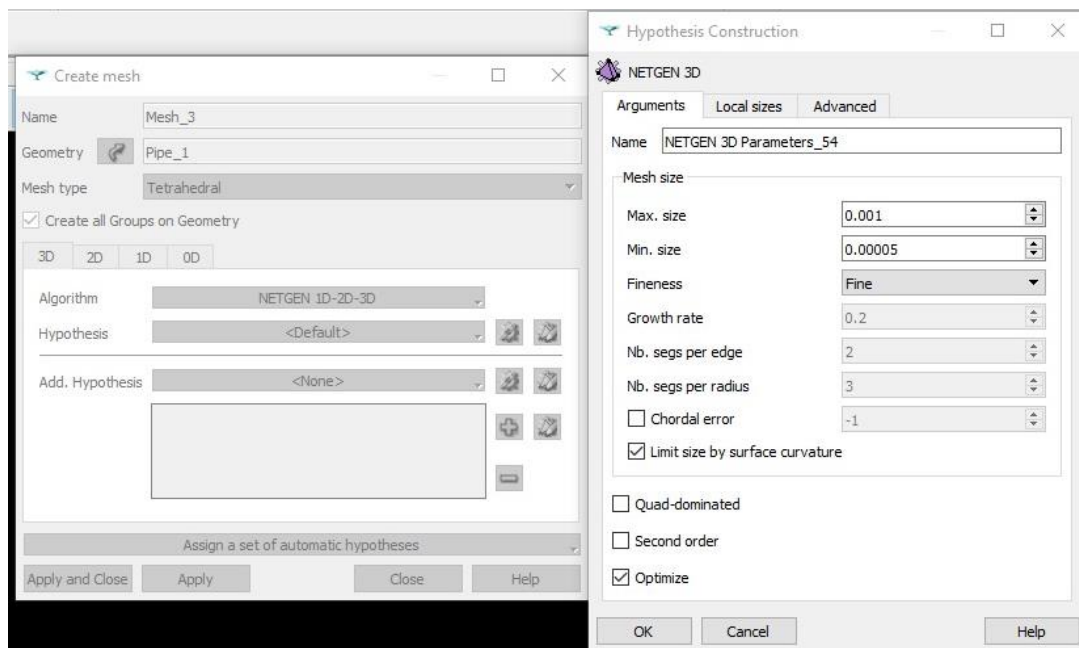


Figura 9: Limites e configurações de criação da Malha 8.

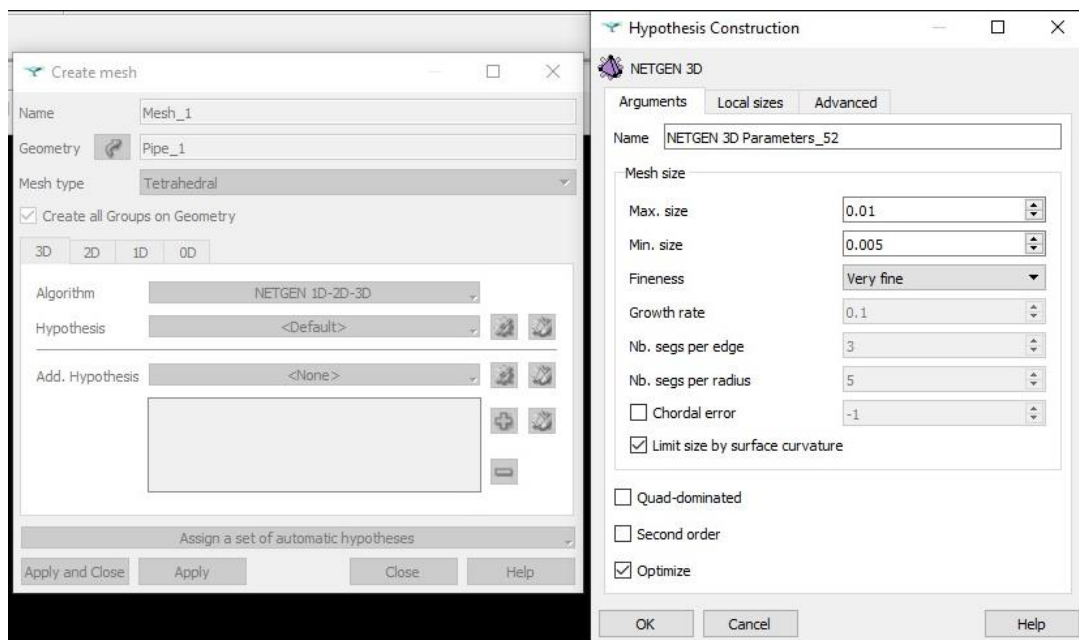


Figura 10: Limites e configurações de criação da Malha 1.

Tabela 1 – Relação entre os nomes, os tamanhos e as configurações de criação das malhas.

	Nº de Células	Min.	Máx.	Fineness
--	<i>Tempos muito longos para InterFOAM com os computadores usados</i>			
Malha 8	938417	0,00005	0,001	Fine
Malha 7	551690	0,00050	0,001	Fine
Malha 6	411075	0,00050	0,010	Very Fine
Malha 5	349411	0,00100	0,010	Very Fine
Malha 4	128159	0,00150	0,010	Very Fine
Malha 3	74591	0,00100	0,010	Fine
Malha 2	30148	0,00250	0,010	Fine
Malha 1	13184	0,00500	0,010	Very Fine
--	<i>Inviabilidade de criação pelo software</i>			

Malhas com valores de células inferiores ao da Malha 1 foram inviáveis de serem criadas pelo *software*, e malhas com mais células do que a Malha 8 implicaram em tempos muito longos de simulação no InterFOAM. O SimpleFOAM apresentou tempos de simulação bastante aceitáveis até mesmo para a Malha 8.

O processamento computacional foi realizado em dois computadores, sendo as simulações mais rápidas (tempos necessários na ordem de horas) no computador mais simples, que foram a maioria delas, e as mais demoradas (tempos necessários na ordem de dias), que foram as com InterFOAM e malhas de alta resolução, no computador de memória mais robusta. Especificamente, os computadores usados foram um *notebook*, com processador *intel core i5-4200 U* de 4 núcleos de processamento e com 6 Gb de memória RAM na maioria dos casos e um *desktop* com processador *AMD Ryzen 7* de 8 núcleos de processamento e 16 Gb de memória RAM nas simulações usando o *solver* InterFOAM com as Malhas 5, 6, 7 e 8.

O número total de núcleos do computador usado é bastante importante, tendo em vista que é possível realizar uma simulação mais rápida fazendo o uso simultâneo de todos os núcleos durante a simulação. Este procedimento é possível devido a utilização de uma técnica denominada decomposição em paralelo, ela divide o domínio do problema em subdomínios, onde os cálculos são realizados simultaneamente por cada núcleo computacional, aumentando a eficiência de processamento o que implica em menores tempos de simulação.

Em relação às condições de contorno, para todas as simulações, na seção de entrada (*inlet*) e nas paredes do conduto (*pipe*) foi adotada a condição de contorno de gradiente nulo (função *zeroGradient*) para a pressão, enquanto a seção de saída (*outlet*) foi

prescrita com um valor constante e igual a zero. A condição de contorno de vazão de saída foi estabelecida com o comando “*pressureInletOutletVelocity*”, o qual estabelece a condição de continuidade no final do trecho do conduto. Para impor a condição de contorno de não deslizamento nas paredes, a velocidade foi prescrita nesta região foi definida como constante e igual a zero.

As condições de contorno para as variáveis de pressão e velocidade são resumidas na Tabela 2.

Tabela 2 - Resumo das configurações de condições de contorno.

	velocidade (m/s)			pressão (kN/m ²)		
	inlet	outlet	pipe	inlet	outlet	pipe
Configuração no SimpleFOAM	<i>flowRateInletVelocity</i>	<i>zeroGradient</i>	<i>fixedValue</i>	<i>zeroGradient</i>	<i>fixedValue</i>	<i>zeroGradient</i>
Configuração no InterFOAM	<i>flowRateInletVelocity</i>	<i>zeroGradient</i>	<i>fixedValue</i>	<i>fixedFluxPressure</i>	<i>totalPressure</i>	<i>fixedFluxPressure</i>
Valor definido para a Etapa 1	0,546	Calculado pelo Software	0	Calculado pelo Software	0	Calculado pelo Software
Valor definido para a Etapa 2	0,546	Calculado pelo Software	0	Calculado pelo Software	0	Calculado pelo Software
Valor definido para a Etapa 3	0,905875	Calculado pelo Software	0	Calculado pelo Software	0	Calculado pelo Software

3.2 Processamento

Nas simulações com o algoritmo SimpleFoam foi usado um intervalo de tempo $\Delta t = 0,01s$. Para o interFoam foi adotado o valor de $\Delta t = 0,0001s$. Esses intervalos de tempo apresentaram baixo erro residual, estabilidade de simulação e tempos totais coerentes com a disponibilidade de recurso computacional.

Para a primeira etapa os valores de condições iniciais e de contorno foram: vazão de entrada $Q = 6,67 \times 10^{-5} \left(\frac{m^3}{s}\right)$, viscosidade cinemática $\nu = 10^{-6} \left(\frac{m^2}{s}\right)$, e valores dos parâmetros iniciais da modelagem da turbulência calculados a partir da geometria proposta e do valor de $Re = 6,82 \times 10^3$.

Para a segunda etapa, as condições de vazão e viscosidade foram as mesmas que as da primeira, contudo a modelagem da turbulência foi desligada com a finalidade de comparação fiel às configurações da simulação de SARTORI (2006).

Para a terceira etapa, os valores das condições iniciais e de contorno são: vazão de entrada $Q = 1,11 * 10^{-5} \left(\frac{m^3}{s}\right)$, viscosidade dinâmica calculada a partir das informações disponíveis no trabalho de MANFIO (2018), referentes ao reator FTH3, usando valor de viscosidade cinemática $\nu = 1,03137 * 10^{-7} \left(\frac{m^2}{s}\right)$, estimado através de cálculos usando os

dados do trabalho de MANFIO (2018). Para a determinação dos valores iniciais de k , ϵ e ω foi usado o valor de Reynolds do reator FTH3, $Re = 1,098 \times 10^5$

Os dados de configuração de processamento são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 - Resumo das configurações das simulações de cada etapa.

	Descrição	Q (m ³ /s)	nu(m ² /s)	Re	k	épsilon	ômega
Etapa 1	Validação de independência de malha	0,0000667	0,000001	6820	0,001213	0,007938	6,541533
SARTORI (2006)	Realizado computacionalmente	0,0000667	0,000001	6820	-	-	-
MANFIO (2018)	Realizado experimentalmente	0,0001111	-	109790	-	-	-
Etapa 2	Comparação com o modelo computacional de SARTORI	0,0000667	0,000001	6820	-	-	-
Etapa 3	Comparação com o experimento físico de MANFIO	0,0001111	0,0000001	109790	0,001731	0,135258	7,813349

3.3 Pós-processamento

Para este trabalho foi usado o *software* Paraview v5.9 (KITWARE; ALAMOS, 2002) no pós-processamento, usando a função *slice* para a extração de seções transversais do conduto, as funções *select cells* e *extract variables* para selecionar as células da seção e a função *integrate variables* para a determinação da vazão em cada seção transversal extraída, visando determinar a variação da vazão ao longo da tubulação.

Na Figura 11 é apresentada uma sequência de imagens exemplificando a maneira como o pós-processamento da velocidade média e da pressão nas seções transversais ao longo do conduto é realizado. A função “slice” é aplicada com o vetor normal na direção x.

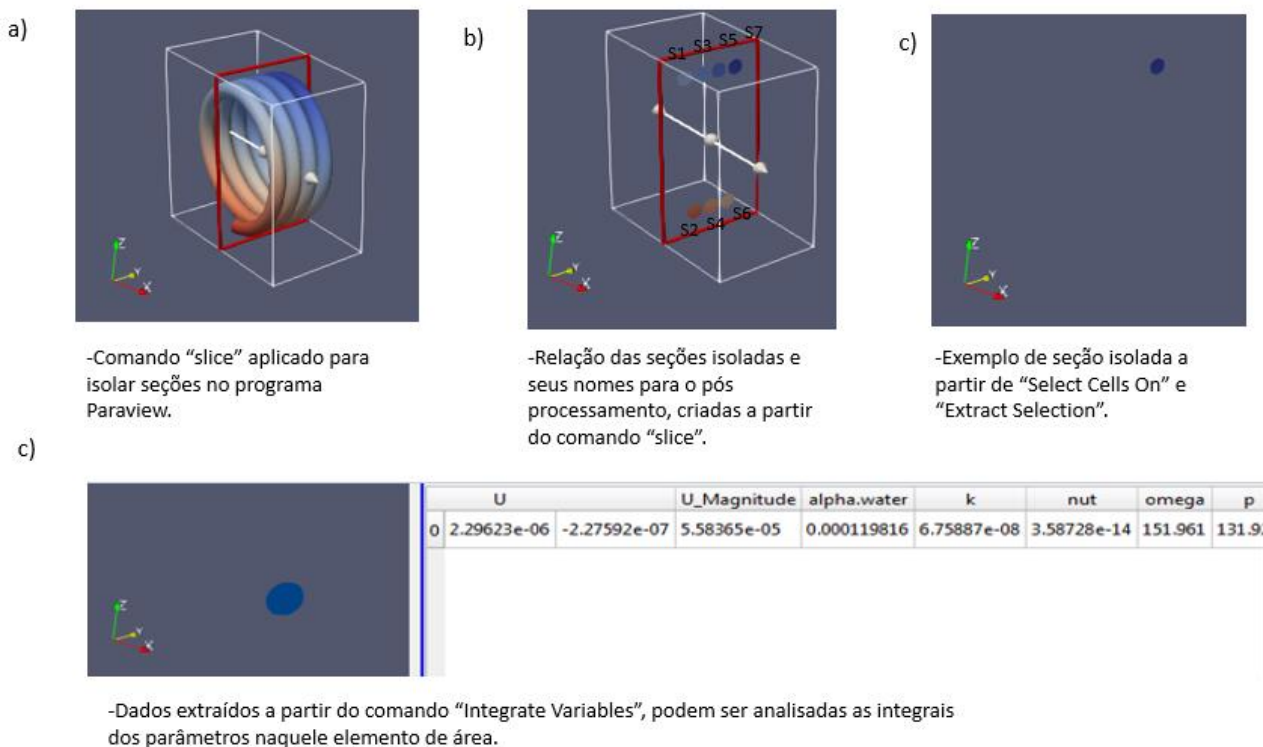


Figura 11: Metodologia de pós processamento.

Na figura 11c, a coluna “U_Magnitude” se refere à integral da velocidade na área; a coluna “p” se refere à integral da pressão dividida pela massa específica naquele elemento de área no caso do simpleFoam, enquanto no caso do interFoam “p” se refere apenas à integral da pressão. Então, o valor de “p” em uma tabela como essa no pós-processamento do simpleFoam se refere à força aplicada pelo fluido naquela seção dividida pela massa específica, e em um pós-processamento de interFoam se refere apenas à força aplicada naquela seção pelo fluido.

Desta maneira, a análise das velocidades médias das seções é feita dividindo-se o resultado da coluna U da tabela pela área da seção, enquanto a análise das pressões exige a multiplicação pela massa específica do fluido e divisão pela área da seção no caso do simpleFoam e apenas divisão pela área da seção no caso do interFoam.

3.4 Cálculo do gradiente de velocidade

O gradiente de velocidade foi calculado usando os dados de pressão, determinados com a metodologia de pós processamento.

A perda de carga é determinada então a partir da aplicação da Equação de Bernoulli, conforme a equação 19:

$$\left(\frac{V_4^2}{2} + \frac{p_4}{\rho}\right) - \left(\frac{V_6^2}{2} + \frac{p_6}{\rho}\right) = \Delta h \quad (19)$$

Sendo V_4 e p_4 a velocidade e a pressão na seção S_4 e V_6 e p_6 a velocidade e a pressão na seção da S_6 , onde as seções são apresentadas na Figura 11b.

Como a geometria é de número de voltas limitado, devido ao esforço computacional que seria empregado para simular o mesmo número de voltas usadas nos experimentos físicos, e como a variação dos parâmetros por voltas consecutivas é pequeno (SARTORI, 2006), foi estabelecida uma perda de carga por volta $\left(\frac{\Delta h}{\text{Volta}}\right)$, essa perda de carga por volta foi multiplicada pelo número de voltas do experimento então comparado (MANFIO, 2018) com a finalidade de determinar a perda de carga, conforme a equação 20:

$$\left(\frac{\Delta h}{\text{Volta}}\right) \cdot 32(\text{Voltas}) = \Delta h \quad (20)$$

Considerando o Δh calculado, foi utilizada a expressão da equação 2 (MANFIO, 2018), para a determinação do gradiente de velocidade do reator.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Indicadores de convergência das simulações

Tendo em vista maior praticidade, e como os parâmetros de entrada para esta etapa são arbitrários, foram usados os mesmos parâmetros usados no trabalho de SARTORI (2006).

Se estabeleceu como critério de convergência valores residuais inferiores a 10^{-6} (DMS, 2021). Quanto ao número de Courant, existe divergência na literatura se um valor maior que 1 de fato indica instabilidade nas simulações (IDEALSIMULATIONS, 2021), para este trabalho se estabeleceu como aceitáveis valores inferiores a 1.2, contudo todas as simulações usando o InterFOAM apresentaram, após 1 segundo de simulação, valores de Número de Courant inferiores a 1. A tabela 4 resume os indicadores para cada malha, bem como os valores limites arbitrados para caracterizar convergência, que ficaram todos dentro de valores limite bastante conservadores.

Tabela 4 – Indicadores de estabilidade e convergência das simulações para todas as malhas.

		Valor Limite	Malha 1	Malha 2	Malha 3	Malha 4	Malha 5	Malha 6	Malha 7	Malha 8
SimpleFOAM	Nº de Células	--	13184	30148	74591	128159	349411	411075	551690	938417
	Ux	1,0E-05	5,2E-06	7,6E-06	6,6E-06	7,1E-06	7,7E-06	8,6E-06	8,4E-06	7,9E-06
	Uy	1,0E-05	6,1E-06	7,6E-06	6,3E-06	8,0E-06	8,1E-06	8,6E-06	8,7E-06	8,9E-06
	Uz	1,0E-05	5,4E-06	7,7E-06	6,3E-06	7,1E-06	9,9E-06	9,4E-06	8,2E-06	7,9E-06
	p	1,0E-05	4,0E-07	5,9E-07	5,7E-07	2,7E-07	6,7E-07	4,2E-07	6,2E-07	5,2E-07
	Ω	1,0E-05	5,5E-06	5,4E-06	9,6E-06	7,8E-06	1,0E-25	1,1E-18	6,1E-06	5,7E-26
	k	1,0E-05	6,1E-06	1,0E-05	6,1E-06	6,1E-06	6,9E-07	5,5E-29	5,5E-06	6,3E-25
	Tempo Estimado Necessário para Simular 1 Segundos (horas)	12	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	0,18	0,44	0,66	2,8
	Timestep necessário para estabilidade	--	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01

InterFOAM	Número de Courant Médio	1,2	0,05	0,0579	0,065	0,09	0,128	0,135	0,15	0,2
	p	1,0E-05	5,09E-06	7,80E-07	6,40E-07	9,03E-07	2,14E-06	2,88E-06	2,54E-06	3,44E-06
	Ω	1,0E-05	7,81E-08	1,32E-08	2,45E-08	1,76E-07	1,11E-08	1,27E-08	2,22E-08	2,51E-08
	k	1,0E-05	1,56E-08	1,15E-09	1,65E-08	2,43E-08	1,29E-07	1,39E-07	1,25E-07	1,58E-07
	Tempo Estimado Necessário para Simular 1 Segundos (horas)	12	0,465	1,3	2,7	7,7	46	57	62	84
	Timestep necessário para estabilidade	--	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001

4.2 Testes de independência de malha

O teste de independência de malha foi desenvolvido a partir das velocidades médias de todas as seções apresentadas na Figura 11 e das diferenças de pressão nas voltas intermediárias do helicóide (S4 e S6), comparando-as com os resultados da malha de maior resolução (Malha 8).

O teste de independência de malha de velocidade média apresentou resultados de convergência a partir da Malha 5. Malhas com número de células abaixo da malha 4 apresentaram diferenças maiores que 10% nos resultados em relação à malha de maior resolução simulada (Malha 8), enquanto a partir da quarta malha o pós-processamento indicou diferenças menores ou iguais a 3%. As análises foram feitas por seções de 1 a 7, conforme a Figura 11. Os resultados estão exemplificados nas Tabelas 5 e 6 e nas Figuras 12 e 13.

Tabela 5 - Resultados de Independência de Malha. Os valores representam a diferença percentual das velocidades médias das seções para o *solver* SimpleFOAM

	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7
Malha 8	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Malha 7	1,57%	1,02%	1,42%	0,89%	1,97%	1,93%	1,96%
Malha 6	2,41%	2,44%	2,85%	1,18%	2,62%	3,90%	2,83%
Malha 5	1,71%	2,16%	1,86%	2,13%	2,50%	2,01%	3,02%
Malha 4	11,14%	10,67%	12,18%	11,04%	11,69%	11,53%	12,06%
Malha 3	16,19%	15,94%	19,00%	15,90%	17,94%	18,55%	16,92%
Malha 2	26,78%	26,93%	29,40%	21,92%	24,45%	25,25%	21,80%
Malha 1	41,08%	45,43%	48,94%	52,84%	33,55%	41,01%	44,43%

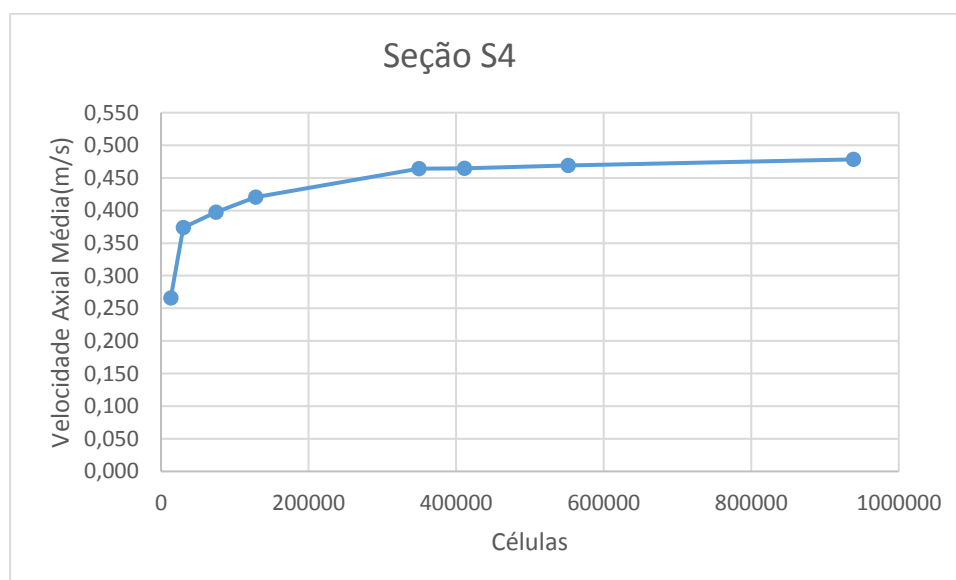


Figura 12 - Gráfico indicando convergência de resultados aproximadamente a partir de 300000 células (Malha 5) no SimpleFOAM.

Tabela 6 - Resultados de Independência de malha do InterFOAM

	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7
Malha 8	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Malha 7	1,90%	0,79%	1,46%	0,96%	1,42%	0,20%	1,22%
Malha 6	2,36%	2,22%	2,65%	1,79%	1,73%	2,10%	1,84%
Malha 5	2,60%	2,56%	2,63%	3,08%	2,01%	1,18%	3,00%
Malha 4	12,11%	11,53%	13,15%	12,72%	12,33%	11,78%	12,28%
Malha 3	18,58%	17,90%	20,28%	17,58%	18,60%	19,00%	18,29%
Malha 2	28,56%	29,47%	31,80%	24,80%	26,49%	25,97%	26,96%
Malha 1	43,55%	45,56%	50,15%	52,81%	34,91%	42,44%	45,44%

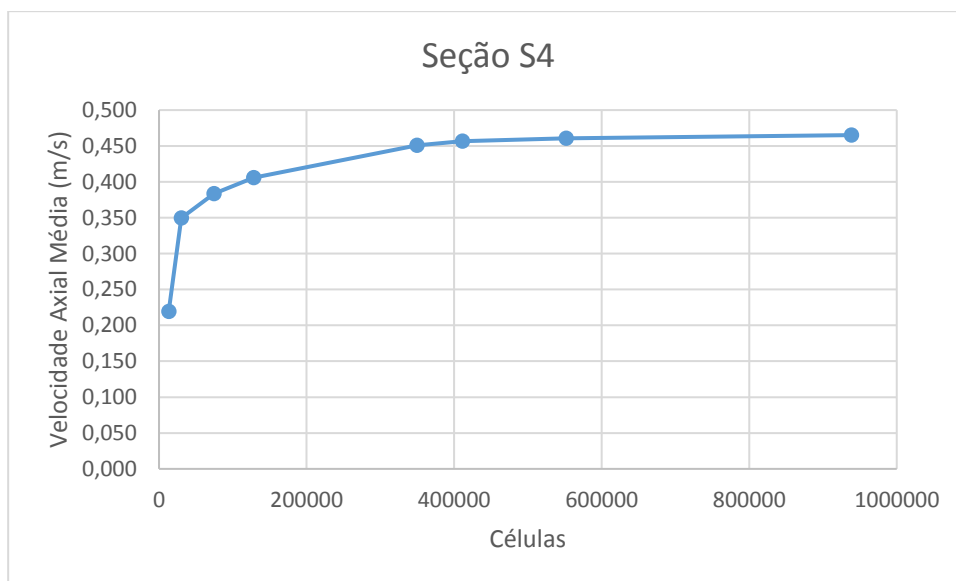


Figura 13 - Gráfico indicando convergência de resultados aproximadamente a partir de 300000 células (Malha 5) no InterFOAM.

Já o teste de independência de malha, de acordo com os dados de diferença de pressão nas seções S4 e S6 (as mesmas pressões usadas na determinação da perda de carga por volta) apresentou sinais de independência (abaixo de 5% de erro) a partir da Malha 7 para SimpleFOAM e a partir da Malha 5 para InterFOAM, que já foram malhas de simulação

e exigência temporal significativas, conforme representam as Tabelas 7 e 8, e conforme as Figuras 14 e 15.

Tabela 7 - Diferenças percentuais de pressão no SimpleFOAM para malhas de diferentes resoluções

	S4 (Pa)	S6 (Pa)	diferença S4 (%)	diferença S6 (%)
Malha 8	317,88	160,33	0,00%	0,00%
Malha 7	302,79	153,16	4,75%	4,47%
Malha 6	295,70	147,25	6,98%	8,16%
Malha 5	286,71	145,02	9,81%	9,55%
Malha 4	239,36	116,87	24,70%	27,11%
Malha 3	226,20	106,35	28,84%	33,67%
Malha 2	309,49	147,04	2,64%	8,29%
Malha 1	300,69	138,79	5,41%	13,43%

Figura 14 - Gráfico indicando convergência de resultados aproximadamente a partir de 500000 células (Malha 7) no SimpleFOAM.

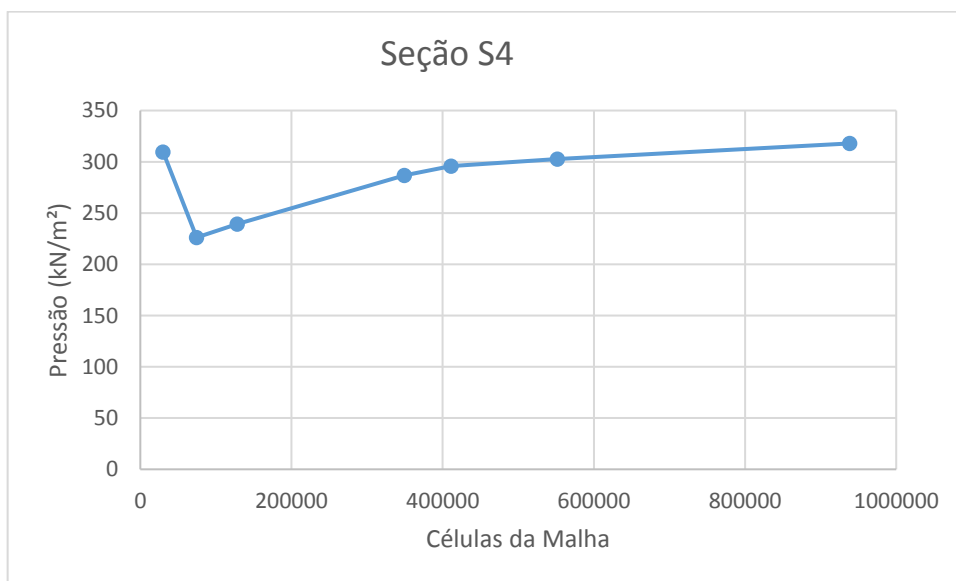


Tabela 8 - Diferenças percentuais de pressão InterFOAM para malhas de diferentes resoluções.

	S4 (Pa)	S6(Pa)	diferença S4 (%)	diferença S6 (%)
Malha 8	475,83	237,96	0,00%	0,00%
Malha 7	457,56	232,18	3,84%	2,43%
Malha 6	459,87	234,17	3,35%	1,59%
Malha 5	457,08	232,41	3,94%	2,33%
Malha 4	349,79	175,22	26,49%	26,36%
Malha 3	350,85	175,50	26,27%	26,25%
Malha 2	253,49	128,68	46,73%	45,92%
Malha 1	553,93	285,37	16,41%	19,93%

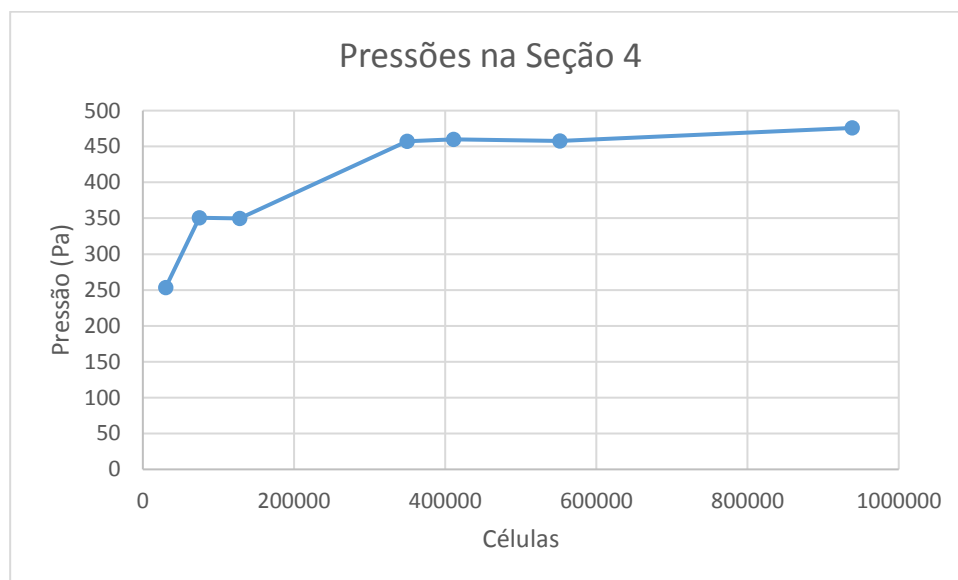


Figura 15 - Gráfico indicando convergência de resultados aproximadamente a partir de 300000 células (Malha 5) no InterFOAM.

Com base nesses resultados foi escolhida a Malha 7 para as simulações usando SimpleFOAM e a Malha 5 para as simulações usando InterFOAM.

4.3 Comparação entre os resultados dos algoritmos SimpleFOAM e InterFOAM

As diferenças percentuais foram definidas a partir do resultado do InterFOAM. Eram esperados resultados de diferença significativa entre os dois algoritmos (SimpleFOAM e InterFOAM), bem como tempos de simulação maiores em InterFOAM. A Tabela 9 indica a comparação dos resultados e tempo de simulação dos dois algoritmos:

Tabela 9 - Comparação entre os algoritmos

	InterFOAM	SimpleFOAM
Tempo necessário de simulação para convergência de resultados	22 horas	1 hora
Velocidade Axial Média em S1	0,51	0,52
Diferença de velocidade	-	4,00%
Δp média por volta	225,00	150,00
Diferença da pressão média por volta (%)	0,00	33,00
Gradiente Médio de Velocidade	2585,00	2228,00
Diferença de gradiente (%)	-	14,00%

As variáveis apresentaram valores relativamente próximos entre si quando determinadas pelos dois algoritmos. Sendo dessa maneira mais recomendado o uso do SimpleFOAM em futuros projetos de caráter prático, tendo em vista sua menor exigência computacional.

4.4 Comparação dos resultados do OpenFOAM com os resultados do Ansys-CFX

Os resultados obtidos neste trabalho, utilizando os algoritmos de OpenFOAM (GREENSHIELDS, 2012; WELLER, 1998), foram comparados com os resultados obtidos por SARTORI (2006), que utilizou o *software* Ansys-CFX. A comparação foi feita utilizando os resultados das velocidades médias das seções.

No modelo de análise do Paraview (KITWARE; ALAMOS, 2002), usado neste trabalho, foram analisadas, em equidistância, duas seções por volta. Dessa maneira, estão computadas nos gráficos as velocidades correspondentes às seções nas voltas a 0.5, 1, 1.5, 2, 2.5, 3 e 3.5 dos dados de SARTORI (2006). A Figura 16 apresenta os resultados obtidos usando SimpleFOAM e InterFOAM e a comparação com os resultados de SARTORI (2006), enquanto a Tabela 10 apresenta a relação da diferença percentual do SimpleFOAM e do InterFOAM em relação aos resultados de SARTORI.

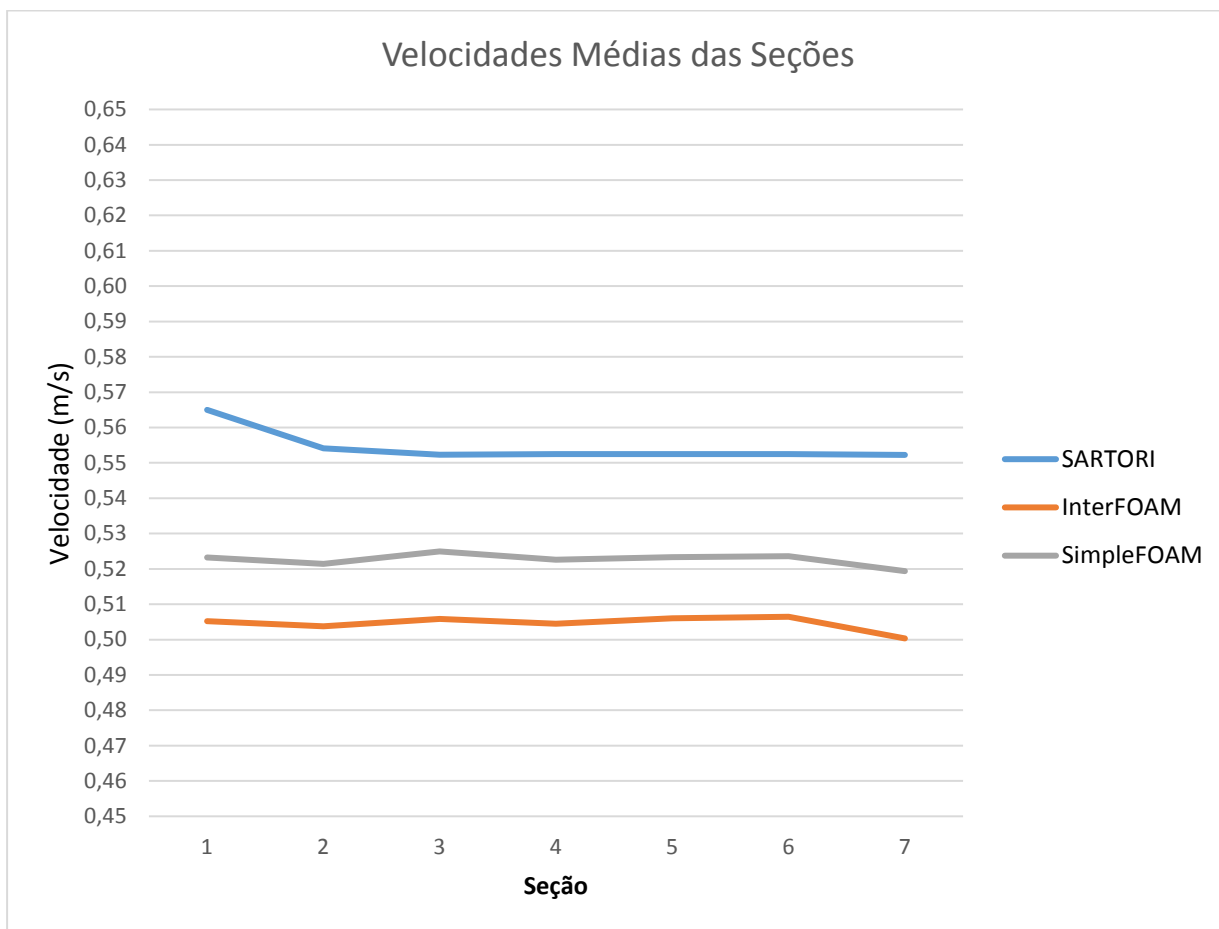


Figura 16 - Relação das velocidades médias das seções dos diferentes algoritmos.

Tabela 10 - Diferenças percentuais dos resultados de velocidade média nas seções em relação aos resultados apresentados por SARTORI (2006).

	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7
InterFOAM	10,58%	9,08%	8,41%	8,69%	8,41%	8,33%	9,40%
SimpleFOAM	7,39%	5,90%	4,95%	5,41%	5,28%	5,22%	5,95%

Tendo em vista as possíveis divergências de código e configurações de *software*, a diferente metodologia de criação de malhas e outras possíveis configurações específicas diferentes, é muito promissora a indicação de que as velocidades médias das seções dos três algoritmos apresentaram valores relativamente próximos.

No seu trabalho, SARTORI aprofundou o tema, estudando os gradientes de velocidade por seção. No presente trabalho de conclusão de curso, esse estudo não foi realizado. Porém, os experimentos feitos apresentam-se promissores para o uso desse modelo nessa linha de pesquisa.

4.5 Comparação dos resultados do OpenFOAM com resultados experimentais

Buscando validar o modelo proposto, foram comparados os resultados computacionais obtidos com os resultados experimentais do trabalho de MANFIO (2018). A comparação foi feita utilizando os gradientes de velocidade médios. Dessa maneira a comparação final é feita entre três valores. Dois desses valores provém de análises de pressão no Paraview (KITWARE; ALAMOS, 2002), e o outro provém de análises de pressão com manômetros. Os resultados estão apresentados na Tabela 11.

Tabela 11 - Gradientes de velocidade média e diferença percentual

	Valor de G (s^{-1})	diferença (%)
Manfio:	1381,00	-
InterFOAM:	2506,21	81,48%
SimpleFOAM:	2228,13	61,34%

Como se pode observar, os resultados computacionais foram relativamente diferentes dos valores experimentais, chegando a mais de 80% de diferença com o uso do InterFOAM. Observou-se que a perda de carga foi maior no modelo computacional que no modelo experimental de MANFIO (2018).

Uma possibilidade considerada como provável causa dessa diferença em relação ao modelo experimental é de que a malha da geometria criada tenha face de entrada muito próximas da região estudada (S4 e S6), gerando refletividade de resultados devido à proximidade das regiões com imposições de condições de contorno (FERZIGER; PERIC, 2002, pág. 255).

Assim, poderia ser promissor aumentar os números de voltas ou acrescentar tubulações retas na entrada e saída para minimizar possíveis erros proporcionados pelas condições de contorno no interior da tubulação.

Vale ressaltar que a vazão para a qual foi estabelecida a independência de malha no presente trabalho foi inferior à vazão usada no experimento de MANFIO (2018), conforme mostrado na Tabela 2.

Os modelos desenvolvidos neste trabalho apresentaram indicadores de estabilidade de simulação satisfatórios. A independência de malha apresentou sinais de convergência.

Comparando os dois algoritmos usados, as velocidades médias e as diferenças de pressão das seções foram muito próximas. O tempo de simulação de InterFOAM foi muito alto demonstrando que simular com um computador convencional em um ambiente de pesquisa e de projeto é pouco viável. Já o SimpleFOAM apresentou resultados satisfatórios, sem demandar muito tempo de simulação.

Os resultados obtidos para a velocidade média das seções ao longo do reator que foram comparados com os resultados obtidos utilizando o *software* Ansys-CFX (SARTORI, 2006) ficaram próximos entre si.

Os resultados de gradiente de velocidade média obtidas utilizando o *software* OpenFoam (GREENSHIELDS, 2012; WELLER, 1998) foram relativamente diferentes dos resultados experimentais, onde a pressão foi medida com manômetros (MANFIO, 2018). O próximo passo a partir dessas diferenças é estudar um helicóide com mais voltas, ou com tubulações retas na entrada e na saída do reator. É possível ainda a calibração de uma malha mais adequada aos resultados experimentais, bem como o uso de outras configurações de malha.

O modelo se encontra em um estágio inicial, e foi parcialmente validado. Os indicadores de simulação foram satisfatórios para Δt 's aceitáveis, principalmente no caso do algoritmo SimpleFOAM. A acessibilidade desse modelo é universal, podendo ser revisitado de diferentes maneiras e com diferentes objetivos.

5. CONCLUSÕES

Neste trabalho foram desenvolvidos dois modelos computacionais para estudar a hidrodinâmica de flocladores tubulares helicoidais, a partir do pacote de algoritmos disponíveis no *software* de código aberto OpenFOAM.

Os modelos foram validados na etapa de processamento através da análise dos indicadores de estabilidade da simulação e na etapa de pós-processamento através da análise de independência de malha.

Na comparação com um modelo descrito na literatura e desenvolvido com o *software* Ansys-CFX, os resultados obtidos foram satisfatórios. O modelo com SimpleFOAM apresentou bons resultados com tempo de simulação atraente. O modelo com InterFOAM também apresentou bons resultados, porém com tempo de simulação maior.

Os resultados obtidos apresentaram uma diferença significativa com relação aos resultados experimentais. Alguns ajustes são propostos para aproximar os resultados computacionais dos experimentais.

De modo geral, o uso do SimpleFOAM mostrou-se como a alternativa mais interessante para um estudo preliminar da hidrodinâmica de flocladores tubulares helicoidais, em termos de confiabilidade e tempo de processamento.

Sendo assim, é sugestão principal para trabalhos futuros no tema desenvolver simulações com geometria envolvendo maior número de voltas no helicóide ou tubulações retas na entrada e na saída do helicóide, visando estudar o efeito dessa alteração de geometria nos resultados de pressão.

Outra continuação interessante pode ser trocar o tipo da malha usada de tetraédrica para hexagonal, visando entender exatamente como o tipo da malha interfere nos resultados.

Uma terceira alternativa de continuidade é simular malhas de maiores resoluções com o SimpleFOAM, visando entender até que ponto maiores resoluções poderiam trazer resultados mais precisos de pressão.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDRÉ, R. A. A. **Modelação de Um Sistema de Conversão de Energia das Ondas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2010.

ASSIS, A. C. R. **Tratamento de Água: Gradiente de Velocidade na Coagulação – Floculação**. 2017. 42 f. Monografia (Graduação em Engenharia Química) - Universidade de Uberaba, Uberaba, 2017.

AUTODESK KNOWLEDGE NETWORK. **SST K-Omega Turbulence models**. Disponível em www.knowledge.autodesk.com/support/cfd/learn-explore/caas/CloudHelp/cloudhelp/2014/ENU/SimCFD/files/GUID-0F5C4828-9F91-46B6-A16A-2578D72DCFCC-htm.html. Acesso em: 15 jan. 2021.

BRASIL. Ministério da Saúde. Anexo XX da Portaria nº5. Dispõe sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade. **Diário da União**, Brasília, DF, 14 nov. 2011. Disponível em https://bvsmis.saude.gov.br/bvs/saudelegis/gm/2017/prc0005_03_10_2017.html. Acesso em: 15 jul. 2021.

BRASIL. Ministério da Saúde. Portaria GM/MS Nº 888. **Diário da União**, Brasília, DF, 07 maio. 2021. Disponível em <https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/portaria-gm/ms-n-888-de-4-de-maio-de-2021-318461562>. Acesso em: 30 out. 2021.

BRASIL. Ministério da Saúde. Portaria Nº 1.421. **Diário da União**, Brasília, DF, 28 junho. 2021. Disponível em [in.gov.br/en/web/dou/-/portaria-n-1.421-de-28-de-junho-de-2021-328557069](https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/portaria-n-1.421-de-28-de-junho-de-2021-328557069). Acesso em: 30 out. 2021.

CAESB **Como a Água é Tratada**. Disponível em <https://www.caesb.df.gov.br/como-a-agua-e-tratada.html>. Acesso em: 21 jul. 2021.

CAMP, T. R.; STEIN; P. C. Velocity Gradient and Internal Work in Fluid Motion. **Journal of Boston Society of Civil Engineering**, v. 30, p. 219-237, 1943.

CARISSIMI, E. **Reator Gerador de Flocos – RGF: Concepção e Desenvolvimento Básico**. Dissertação (Mestrado em Engenharia), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.

CFD ONLINE. **K-epsilon Models**. Disponível em https://www.cfd-online.com/Wiki/K-epsilon_models. Acesso em: 28 abril. 2021.

CFD ONLINE. **K-omega Models**. Disponível em https://www.cfd-online.com/Wiki/K-epsilon_models. Acesso em: 28 abril. 2021.

CFD Online **SIMPLE: Difference Between Initial and Final Residuals**. Disponível em <https://www.cfd-online.com/Forums/openfoam-solving/173964-simple-difference-between-initial-final-residuals.html>. Acesso em: 19 jun. 2021.

CESTARI, J.L. et al. Avaliação Hidrodinâmica de Unidade Piloto de Floculação Mecanizada. **Engenharia Sanitária Ambiental**, v. 17, n.1, p. 95-106, jan-mar, 2012.

CORNICIUS, C.M. **O Tratamento Convencional Coagulação/Floculação na Remoção de Nanopartículas**. Tese (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Universidade do Algarve, 2015.

DMS **Practical CFD Modeling: Judging Convergence**. Disponível em <https://dmsonline.us/practical-cfd-modeling-judging-convergence/> . Acesso em: 05 set. 2021.

EDF et al. **Where does SALOME come from?**. Disponível em <https://www.salome-platform.org/user-section/about/history>. Acesso em: 30 out. 2021.

FEFFERMAN, C.L. **Existence and Smoothness of the Navier-Stokes Equation**. Department of Mathematics, Princeton University, New Jersey, 2006.

GREENSHIELDS, C. **Openfoam v2.1.1 Release**. Disponível em <https://openfoam.org/release/2-1-1/>. Acesso em 26 out. 2021.

HEINY, D. **Our Story**. Disponível em <https://www.simscale.com/about-us/>. Acesso em 30 out. 2021.

HOLZMANN, T. **Mathematics, Numerics, Derivations and OpenFOAM: 7^a edição**, editora Holzman CFD, 2019.

JÚNIOR, J. M. **Uso de Floculador Hidráulico de Manta de Lodo Acoplado a Flotador Por Ar Dissolvido no Tratamento de Água de Abastecimento**. Tese (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2009.

KOT Engenharia. **Métodos dos elementos finitos, volumes finitos e elementos discretos: Quais as diferenças?** Disponível em <https://kotengenharia.com.br/diferencas-metodos-elementos-volumes-finitos-elementos-discretos/>. Acesso em: 15 maio. 2021.

KITWARE, I. ALAMOS, N. L. **The History of Paraview**. Disponível em <https://www.paraview.org/overview/>. Acesso em: 30 out. 2021

IDEALSIMULATIONS **Courant Number in CFD Simulations**. Disponível em <https://www.idealsimulations.com/resources/courant-number-cfd/>. Acesso em: 19 jun. 2021.

LEAP **Tips and Tricks: Convergence and Mesh Independence Study**. Disponível em <https://www.computationalfluidynamics.com.au/convergence-and-mesh-independent-study/>. Acesso em: 11 set. 2021.

LIBÂNIO, M. **Fundamentos de Qualidade e Tratamento de Água**. 3^a edição, editora Átomo, Campinas, 2010.

MANFIO, J.C. **Avaliação do Efeito do Gradiente de Velocidade na Agregação de Partículas em Unidades de Mistura Completa e de Fluxo Pistonado.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2018.

OLIVEIRA, D.S. **Proposição de Modelo de Previsão de Desempenho de Unidades de Floculação Tubulares Helicoidais.** Tese (Doutorado em Engenharia Ambiental) - Universidade Federal do Espírito Santo, Victoria, 2014.

OLIVEIRA, D.S.; Teixeira, E.C. Experimental Evaluation of Helically Coiled Tube Flocculators for Turbidity Removal in Drinking Water Treatment Units. **Water SA**, v. 43, n. 3, p. 378-386, 2017.

OPENFOAM Wiki **OpenFOAM guide / Finite volume method.** Disponível em [https://openfoamwiki.net/index.php/OpenFOAM_guide/Finite_volume_method_\(OpenFOAM\)](https://openfoamwiki.net/index.php/OpenFOAM_guide/Finite_volume_method_(OpenFOAM)). Acesso 15 de Junho de 2021.

OPENFOAM User Guide. **SIMPLE algorithm.** Disponível em <https://www.openfoam.com/documentation/guides/latest/doc/guide-applications-solvers-simple.html>. Acesso em: 01 abril. 2021.

OPENFOAM Wiki. **PISO.** Disponível em <https://openfoamwiki.net/index.php/PISO>. Acesso em: 01 abril. 2021.

PASKIN, L. **Solução Computacional das Equações de Navier-Stokes com uma Formulação Penalizada de Elementos Finitos.** Monografia (Graduação em Engenharia Naval e Oceânica da Escola Politécnica) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2016.

PELLISSARI, L.M.T. **Influência de Parâmetros de Projeto no Desempenho do Floculador Tubular Helicoidal Aplicado ao Tratamento de Água de Abastecimento.** Dissertação (Mestrado em Ciências de Engenharia Ambiental) – Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2006.

FERZIGER J.H.; PERIC, M. **Computational Methods for Fluid Dynamics:** 3ª edição, editora Springer, Nova York, 2002.

REIS, A. C. A. **Tratamento de Água: Gradiente de Velocidade na Coagulação – Floculação.** Monografia (Graduação em Engenharia Química) - Universidade de Uberaba, Uberaba, 2017.

REZENDE, A.L.T. **Análise Numérica da Bolha de Separação do Escoamento Turbulento Sobre a Placa Plana Fina Inclinada.** Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica), Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.

SABESP. Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo. **Qualidade da água tratada.** Disponível em <http://site.sabesp.com.br/site/interna/Default.aspx?secaoId=40>. Acesso em: 8 mar. 2021.

SALOME PLATAFORM. **SALOME packages**. Disponível em <https://www.salome-platform.org/downloads/current-version>. Acesso em: 15 abril. 2021.

SANEAGO. Saneamento de Goiás SA. **Operação de Estação de Tratamento de Água**. Superintendência de Recursos Humanos, 2006.

SANTOS, E.P.C.C. et al. Estudo da coagulação aplicada à filtração direta descendente. **Engenharia Sanitária Ambiental**, v.12, n.4, out-dez, Rio de Janeiro, 2007.

SARTORI, M. **Caracterização Hidrodinâmica de Floculadores Tubulares Helicoidais por Meio de Simulação Numérica Tridimensional**. Dissertação (Engenharia Ambiental), Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2006.

SARTORI, M. **Análise, das Deformações Viscosas e da Segregação de Fases em Floculadores Tubulares Helicoidais e Suas Relações com a Razão de Curvatura**. Tese (Doutorado em Engenharia Ambiental), Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2015.

SAYMA, A. **Computational Fluid Dynamics**. 1ª edição, editora BookBoon, 2009.

SCIENTIA. **Transição Laminar-Turbulenta**. Disponível em <https://sites.google.com/site/scientiaestpotentiaplus/transicao-laminar-turbulenta>. Acesso 27 de abril, 2021.

SILVA, C.F. **Remoção de Oocistos e de Indicadores Físicos de Cryptosporidium Parvum em Águas de Abastecimento por Meio da Decantação**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Sanitária) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2008.

SIMSCALE. **K-epsilon**. Disponível em <https://www.simscale.com/docs/simulation-setup/global-settings/k-epsilon/>. Acesso em: 11 jul. 2021.

SOUZA, J.F.A. et al. Uma Revisão Sobre a Turbulência e sua Modelagem. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 29, n. 1, p. 21-41, Rio de Janeiro, 2011.

SREENIVASAN, K.R.; STRYKOWSKI P.J.. **Stabilization Effects in Flow Through Helically Coiled Pipes**. 31-36 (1983). Disponível em <https://doi.org/10.1007/BF00282264>.

SWANSON, J. **The Unofficial History of ANSYS**. Disponível em https://web.archive.org/web/20080930162742/http://www.drd.com/searchable/techsupport/ansys_hist.htm. Acesso em: 30 out. 2021.

VANELI, B.P.; TEIXEIRA, E.C. Aperfeiçoamento de Modelo de Estimativa da Eficiência de Remoção de Turbidez da Água em Floculadores Tubulares Helicoidais. **Engenharia Sanitária Ambiental**, v. 24, n. 4, p. 773-783, jul-ago, 2018.

VERSTEEG, H.K.; MALALASEKERA, W. **An Introduction To Computational Fluid Dynamics**. Editora Pearson Education, 2007.

WEBSTER, D.R.; HUMPHREY, J. A. C. Traveling wave instability in helical coil flow. **Physics of Fluids**, v. 9, p. 407, Minnesota, 1997.

WELLER, H. G.; TABOR, G.; JASAK, H.; FUREBY, C. **A Tensorial Approach to Computational Continuum Mechanics Using Object-oriented Techniques**, Computers In Physics, VOL. 12, N° 6, NOV/DEC 1998.

WHITE, F. M. **Mecânica dos Fluidos**: 6° edição, editora MV Graw Hill, Nova Iorque, 2011.