

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA

FELIPE PEREIRA LAMAIZON

**IMPLEMENTAÇÃO DE UM MICROBURST ESTÁTICO EM UM CASO MULTIFÁSICO
COM PERTURBAÇÃO DE DENSIDADE ADOTANDO UMA MALHA BIDIMENSIONAL
AXISSIMÉTRICA**

Alegrete

2022

FELIPE PEREIRA LAMAIZON

**IMPLEMENTAÇÃO DE UM MICROBURST ESTÁTICO EM UM CASO MULTIFÁSICO
COM PERTURBAÇÃO DE DENSIDADE ADOTANDO UMA MALHA BIDIMENSIONAL
AXISSIMÉTRICA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Pampa (UNIPAMPA, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **Bacharel em Engenharia Mecânica** .

Orientador: Prof. Felipe Denardin Costa
Co-orientador: Prof. Danilo N. Lemes Jr.

Alegrete

2022

Ficha catalográfica elaborada automaticamente com os dados fornecidos
pelo(a) autor(a) através do Módulo de Biblioteca do
Sistema GURI (Gestão Unificada de Recursos Institucionais) .

Lamaizon, Felipe Pereira

IMPLEMENTAÇÃO DE UM MICROBURST ESTÁTICO EM UM CASO
MULTIFÁSICO COM PERTURBAÇÃO DE DENSIDADE ADOTANDO UMA MALHA
BIDIMENSIONAL AXISSIMÉTRICA / Felipe Pereira Lamaizon.

55 p.

Trabalho de Conclusão de Curso(Graduação)-- Universidade
Federal do Pampa, ENGENHARIA MECÂNICA, 2022.

"Orientação: Felipe Denardin Costa".

1. Fenômenos de Transporte. 2. Microburst. 3. CFD. 4. Jato
Incidente. I. Título.

©2022

Todos os direitos autorais reservados a Felipe Pereira Lamaizon. A reprodução de partes ou do todo deste trabalho só poderá ser feita mediante a citação da fonte.

Endereço: Rua Silveira Martins, n. 334

End. Eletr.: felipelamaizon@gmail.com

FELIPE PEREIRA LAMAIZON

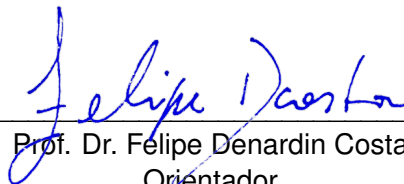
**IMPLEMENTAÇÃO DE UM MICROBURST ESTÁTICO EM UM CASO MULTIFÁSICO
COM PERTURBAÇÃO DE DENSIDADE ADOTANDO UMA MALHA BIDIMENSIONAL
AXISSIMÉTRICA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Pampa (UNIPAMPA, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **Bacharel em Engenharia Mecânica**.

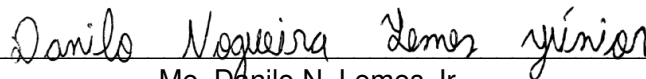
Área de concentração: Fenômenos de Transporte

Trabalho de Conclusão de Curso defendida e aprovada em: 23 de fevereiro de 2022.

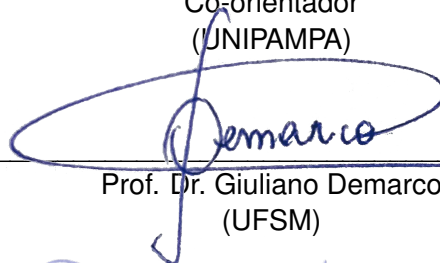
Banca examinadora:



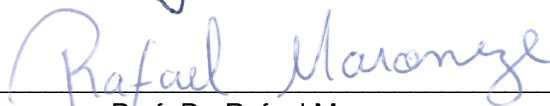
Prof. Dr. Felipe Denardin Costa
Orientador
(UNIPAMPA)



Me. Danilo N. Lemes Jr.,
Co-orientador
(UNIPAMPA)



Prof. Dr. Giuliano Demarco
(UFSM)



Prof. Dr. Rafael Maroneze
(UNIPAMPA)

*"Alguns homens vêem as coisas como são,
e dizem 'Por quê?' Eu sonho com as coisas
que nunca foram e digo 'Por que não?'"*

George Bernard Shaw

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço minha família, em especial ao meu pai, minha mãe e minha avó, por todo suporte, auxílio e estrutura ao longo de toda a graduação.

Aos meus colegas e amigos integrantes do grupo de pesquisa LFCTA, por todos o aprendizado, companhia e companheirismo em todos os anos de pesquisa.

Agradeço ao meu orientador Felipe Denardin por todas as vezes que foi preciso, fez com que eu colocasse os pés no chão e enxergasse os problemas de maneira mais simples. E ao meu co-orientador Danilo Nogueira por toda amizade, paciência e disponibilidade de tempo, para realização desta simulação, muitas vezes tirando o seu próprio tempo de descanso para me auxiliar.

Aos meus amigos que estiveram comigo em momentos bons e ruins, estudos e festas que não me deixaram desanimar em nenhum momento, em especial a Adryel, Ana, Jaime, Otávio, Eduardo, Luiza, Isadora, Aniseh, Kamila, Aline, Ary, Ronald e muitos outros amigos e colegas que sempre me acompanharam.

A CNPQ e FAPERGS por proporcionar remuneração através da bolsa de pesquisa o que foi de extrema importância para minha formação.

RESUMO

Os *microbursts* são fenômenos que se originam de uma nuvem de tempestade muito forte, e são identificados por uma coluna descendente e densa de ar frio, podendo ou não ser acompanhado de chuva. O principal aspecto deste evento é a formação de grandes turbilhões de velocidade divergente ao se chocar com o solo, denominados vórtices. Devido a sua duração ser muito curta, aproximadamente 4 a 5 minutos, sua descrição completa a partir de observações na natureza, é difícil. Dessa forma, o estudo de *microbursts* se dá, em grande parte, através de simulações numéricas ou ensaios em laboratório. Neste trabalho o fenômeno da natureza é simulado através do *software* de código aberto *OpenFoam 9*, onde foi adotado um caso combinando os efeitos de jato incidente e perturbação de densidade, objetivando determinar a influência de tais características sobre o comportamento da formação estrutural dos vórtices deste fenômeno meteorológico e assim realizar uma análise sobre os perfis de velocidade dos mesmos, especialmente junto a superfície. Comparando os resultados obtidos com este trabalho à estudos anteriores. Utilizando um caso já realizado em laboratório como estudo base, foi possível definir os parâmetros a serem adotados, assim como determinar as análises, foi então elaborada uma malha bidimensional axissimétrica do tipo *wedge*, permitindo realizar essa simplificação sem perder informações do escoamento original, visando incluir um alto refinamento na malha por um baixo custo computacional, adotando o modelo de turbulência LES, para captar o máximo das características dos vórtices, a malha tem sua geometria aberta à atmosfera, onde na parte superior existe a entrada de um jato descendente de um fluido denso. Utilizando o *solver InterFoam*, foram obtidos resultados satisfatórios e condizentes à trabalhos anteriores, os picos de velocidade encontram-se próximas ao solo e próximas as extremidades do ponto de contato com o jato, a propagação e estrutura dos vórtices se mostrou fiel ao evento na natureza, assim como todo o comportamento do *microburst* ao longo de toda simulação.

Palavras-chave: *Microburst*, LES, CFD, Jato incidente, Turbulência.

ABSTRACT

Microbursts are phenomena that originate from a very strong storm cloud and are identified by a descending and dense column of cold air, which may or may not be accompanied by rain. The main aspect of this event is the formation of large eddies of divergent velocity when hitting the ground, called vortices. Due to its very short duration, approaches 4 to 5 minutes, its complete description from observations in nature is difficult. Thus, the study of microbursts is largely done through numerical simulations or laboratory tests. In this work, the phenomenon of nature is simulated through the open-source software OpenFoam 9, where a multiphase case was adopted combining incident jet effects and density disturbance, aiming to determine the influence of such characteristics on the behavior of the structural formation of the vortices of this meteorological phenomenon and thus carry out an analysis on their velocity profiles, especially close to the surface. Comparing the results obtained with this work to previous studies. Using a case already carried out in the laboratory as a base study, it was possible to define the parameters to be adopted, as well as to determine the analyses, a two-dimensional axisymmetric mesh of the wedge type was then elaborated, allowing this simplification to be carried out without losing information from the original flow, to include a high refinement in the mesh for a low computational cost, adopting the LES turbulence model, to capture the maximum of the characteristics of the vortices, the mesh has its geometry open to the atmosphere, wherein the upper part there is the entrance of a descending jet of dense fluid. Using the InterFoam solver, satisfactory results were obtained, consistent with previous works, the velocity peaks are close to the ground and close to the ends of the contact point with the jet, the propagation and structure of the vortices proved to be faithful to the event in nature, as well as the entire microburst behavior throughout the simulation.

Keywords: Microburst, LES, CFD, incident jet, Turbulence.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – <i>Downburst</i> perto de Phoenix, Arizona, EUA, 2016.	14
Figura 2 – Um experimento de laboratório da Universidade de Chicago, mostrando a evolução de um fluxo de ar de <i>microbursts</i> . Na atmosfera real, todo esse processo durará menos de dois minutos. 1 - estágio descendente, 2 - estágio de contato com o solo, 3 - estágio de <i>Touchdown</i> (início da expansão lateral), 4 - estágio de espalhamento e 5 - estágio dos vórtices em anéis.	15
Figura 3 – Comparação entre os modelos de turbulência DNS, LES e RANS.	18
Figura 4 – Esquema laboratorial do estudo base.	23
Figura 5 – Dimensões da Malha Adotada.	24
Figura 6 – Visualização do refinamento.	24
Figura 7 – Fluxograma da aplicação da metodologia.	25
Figura 8 – Visualização da malha tipo <i>wedge</i> , "fatia de pizza". Tem-se um domínio completo e é escolhida uma região em forma de fatia, para análise do escoamento.	26
Figura 9 – Propagação da simulação numérica, analisando o comportamento da disposição radial variando com a altura em determinados períodos de tempo. Onde Fig.(a) corresponde ao tempo de 3 segundos, a Fig.(b) ao tempo de 6 segundos e a Fig.(c) ao tempo de 9 segundos.	28
Figura 10 – Campos de Vorticidade nos tempos de 3 segundos Fig.(a), 6 segundos Fig. (b) e 9 segundos Fig.(c).	29
Figura 11 – Variação da velocidade de acordo com o aumento da distância radial. Onde a Fig.(a) trata da altura fixa 0,4cm comparada a altura de 2,2cm. A Fig.(b) a altura fixa de 0,4cm em comparação a altura de 2,5cm. E a Fig.(c) a altura 0,4cm comparada a a altura de 3,3cm.	30
Figura 12 – Perfis de velocidade radial em função da distância do eixo central do <i>microburst</i> , para diferentes valores alturas, correspondendo aos níveis superiores aos níveis superiores (linha-pontilhada) e inferiores (linha-cheia) para o núcleo do vórtice (experimento de 5%). a) $t = 3s$; b) $t = 6s$; c) $t = 9s$	32
Figura 13 – Variação da velocidade radial de acordo com a altura. Nas quais tanto a Fig.(a), a Fig.(b) e Fig.(c) tratam da variação dos perfis de velocidade tomando 3 distâncias radiais como fixas, sendo elas $r = 2cm$, $r = 4,1cm$ e $r = 6,9cm$, respectivamente. E cada figura representa o tempo onde esses perfis foram analisados.	33
Figura 14 – Perfis de velocidade radial em função da altura, onde tem-se $r = 2cm$ (linha-cheia), $r = 4,1cm$ (linha-pontilhada) e $r = 6,9cm$ (linha-tracejada) para o experimento de 5%. a) $t = 3s$; b) $t = 6s$; c) $t = 9s$	34

Figura 15 – Comportamento do perfil de velocidade vertical adimensional, variando de acordo com a altura. 35

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Parâmetros iniciais.....	21
-------------------------------------	----

LISTA DE SIGLAS

<i>CFD</i>	Dinâmica dos fluídos computacional (do inglês <i>Computational Fluid Dynamics</i>)
<i>CLA</i>	Camada limite atmosférica
<i>CLE</i>	Camada limite estável
<i>DNS</i>	Simulação numérica direta (do inglês <i>Directal Numeric Simulation</i>)
<i>FOAM</i>	Operação e manipulação de campos vetoriais (do inglês <i>Field Operation and Manipulation</i>)
<i>GNU</i>	Licença pública (do inglês <i>Gnu Public License</i>)
<i>LES</i>	Simulação de grandes turbilhões (do inglês <i>Large Eddy Simulation</i>)
<i>OpenFoam</i>	Operação e manipulação de campo aberto (do inglês <i>Open source Field Operation And Manipulation</i>)
<i>RANS</i>	Equações de médias de Reynolds (do inglês <i>Reynolds-averaged Navier–Stokes equations</i>)
<i>UNIPAMPA</i>	Universidade Federal do Pampa

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	Justificativa	13
1.2	Objetivos	13
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
2.1	Downbursts	14
2.2	Modelagem de Microbursts Através de Simulações Numéricas	16
2.3	Fluidodinâmica Computacional	17
2.4	Processo de Discretização	19
2.5	OpenFOAM e ParaView	19
2.5.1	OpenFOAM	19
2.5.2	ParaView	20
3	METODOLOGIA	21
3.1	Fluxogramas das Atividades Desenvolvidas	25
4	RESULTADOS	26
4.1	Validação da Malha Axis-Simétrica	26
4.2	Análise dos Resultados	27
4.2.1	Estrutura e Comportamento do Fenômeno	27
4.2.2	Perfis de Velocidade Radial	29
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	36
5.1	Trabalhos Futuros	36
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	37
	Apêndice A – blockMeshDict	40
	Apêndice B – U	43
	Apêndice C – setFieldsDict	44
	Apêndice D – turbulenceProperties	45
	Apêndice E – transportProperties	46
	Apêndice F – controlDict	47
	Apêndice G – fvSchemes	51
	Apêndice H – fvSolution	52
	Apêndice I – Resultados Obtidos em Experimento Laboratorial	54

1 INTRODUÇÃO

A cada dia é mais comum ouvir falar de notícias sobre grandes catástrofes referentes a severos fenômenos meteorológicos. Toda essa mudança no comportamento climático está diretamente relacionado com o efeito estufa e aquecimento global, como afirmado por Lambert (1995), que o aumento de gases do efeito estufa e o acúmulo dos mesmos na atmosfera, aumentam gradativamente o número de ocorrências de tempestades e eventos meteorológicos extremos.

Segundo Universidade de Toronto (2015), as tempestades mais fracas tendem a ser menos frequentes e darão lugar à tempestades mais intensas. Isto ocorre devido ao retardamento da circulação atmosférica, que significa que as massas de ar vão esquentando e dirigem-se para o equador terrestre, e a medida que se tornam mais quentes, também adquirem mais umidade. No equador, as mesmas tem um pico de altitude e começam a esfriar, o que resulta na condensação e a liberação de calor, devido a isso acabam ganhando mais altura e levam uma grande porção de ar com elas. Consequentemente, dão origem a enormes tempestades e ao aumento da distribuição de calor partindo do equador em direção aos polos.

O impacto socioeconômico que tais eventos causam, são enormes. Segundo a nota da ONU (2018), na qual informa que nos últimos 20 anos, catástrofes referentes ao clima correspondem a 91% dos 7.200 fenômenos relevantes registrados. O que diz respeito a um total de 2,245 trilhões de dólares de perdas referentes a danos por catástrofes climáticas, no mundo. O que representa para o Brasil como o publicado na revista Veja (2018), sobre a mesma matéria da ONU, uma perda de 15,7 bilhões de dólares.

Através do estudo de Lima e Loredou-Souza (2015), observa-se que no Brasil as áreas mais afetadas por tempestades e eventos climáticos mais extremos são as regiões mais populosas (Sul, Sudeste e Nordeste). Devido as grandes cidades, a vegetação dá lugar ao concreto e ao asfalto que por sua vez geram mais calor, o que faz com que haja maior tendência a chuvas e consequentemente a tempestades.

Dentre os fenômenos climáticos severos, pode-se ressaltar os *downbursts*, o qual foi fomentado primeiramente por Fujita e Wakimoto (1983). Esses fenômenos são caracterizados por uma coluna densa de ar frio, descendente, a qual denomina-se *downdraft*. O mesmo tem sua origem em virtude de uma tempestade muito forte, ao se chocar com o solo essa coluna gera ventos destoantes, formando vórtices com ventos de intensas velocidades. Os quais propagam-se por quilômetros. O caráter destrutivo que os *downbursts* possuem deve-se ao enorme cisalhamento entre os vórtices e o solo.

Os *downbursts*, podem ser estudados de acordo com sua escala de duração e extensão. Podendo dividir-se em *microbursts*, que possui uma extensão horizontal de até 4km e *macrobursts*, que atinge uma extensão lateral maior que 4km. De acordo com Hjelmfelt (2010), os *microbursts* são *downbursts* concentrados e por isso, causam maiores

danos, devido a possuírem pequena escala espacial e temporal, sendo difíceis de serem monitorados, dessa maneira é um evento com maior foco de estudos.

Uma maneira de realizar uma análise sobre estes eventos meteorológicos é através de um software de fluidodinâmica, conhecidos como CFD's. São ferramentas que facilitam imensamente o estudo do comportamento de escoamentos turbulentos e laminares. Baseando-se, de acordo com Wendt (2008), no domínio do espaço, tempo e nos princípios de conservação de massa, energia e quantidade de movimento.

1.1 Justificativa

O estudo sobre os *microbursts* é de grande relevância, tanto para a meteorologia quanto para a engenharia civil e Aviação. Muitos são os casos registrados de quedas de aviões, devido a ocorrência do fenômeno (FUJITA, 1990).

Muitas vezes o *microburst* é confundido com um tornado ou ciclone. O que os diferenciam, além da coluna descendente, é a sua maneira de propagação, que ao se chocar com a superfície ele é expandido radialmente, de modo que os ventos intensos acompanham a frente de camada fria, ou seja, os resultados dos estragos no solo após a ocorrência de um *microburst* é diferente.

Uma das características mais importantes e ao mesmo tempo intrigantes de um *microburst* é a sua pequena escala de duração e pequena distribuição espacial, horizontalmente. Este aspecto complica muito o seu monitoramento na natureza. Devido a isso a simulação numérica utilizando fluidodinâmica computacional é uma opção para realizar o estudo sobre suas particularidades e seu comportamento.

1.2 Objetivos

O objetivo geral do presente estudo é realizar uma simulação numérica de um *microburst*, adotando um caso 2D axissimétrico, submetido ao método de modelagem de jato incidente combinado a uma perturbação de densidade, onde pretende-se entregar a melhor resposta possível do comportamento do fenômeno, em uma simulação numérica, utilizando um custo computacional reduzido, para obtê-la. A simulação tem como base o estudo experimental realizado por Demarco et al. (2013), em laboratório.

Como objetivos específicos pode-se ressaltar:

- Implementar o *microburst* em uma simulação utilizando CFD;
- Analisar os perfis de velocidade, em relação a altura do domínio e a distância radial;
- Compreender a estrutura e formação dos vórtices, avaliando a influência da perturbação de densidade.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo serão tratados conceitos utilizados para a formulação deste trabalho.

2.1 Downbursts

Segundo Johns e III (1992), tempestades de pequeno porte, se intensificam e se dissipam em um curto período de tempo na natureza, devido a isso vem causando grandiosos danos em uma pequena porção de área, o que tem sido significativo quando se trata de prejuízos socioeconômicos. Os *microbursts* e os tornados são exemplos destas tempestades menores.

O tornado, é conhecido por ser o mais severo e danoso fenômeno que atinge uma região localizada, caracterizado por uma coluna ascendente em rotação de altas velocidades, que tem sua origem próximo ao solo (CHURCH; SNOW; AGEE, 1977).

Os *microbursts*, diferenciando-se dos tornados, é caracterizado por ser uma coluna descendente, que se forma em uma nuvem de tempestade, podendo ser acompanhado de chuva ou não, contudo é uma coluna densa e causa grandes explosões de ventos divergentes ao se chocar com o solo (PROCTOR, 1988). *Microburst* é um termo derivado de outro fenômeno maior, conhecido como *Downburst*.

Figura 1 – *Downburst* perto de Phoenix, Arizona, EUA, 2016.



Fonte: ATSC 113, Applied Meteorology.

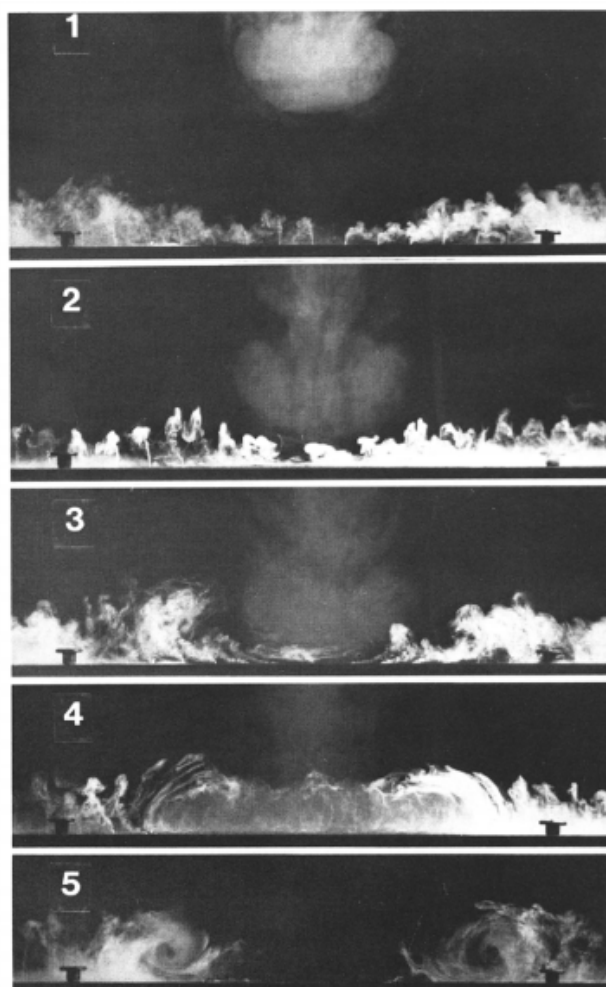
O termo *downburst*, foi primeiramente fomentado por Fujita e Wakimoto (1983), onde buscou compreender os aspectos e quais os danos que o fenômeno meteorológico vinha a acarretar para a aviação, devido a grande ocorrência de quedas de aeronaves nos aeroportos, posteriormente buscou concentrar seus estudos também nos impactos relacionados a construção civil.

Downburst é o nome dado ao fenômeno em si, que é dividido de acordo com sua

escala de duração e expansão. *Macrobusts*, maiores que 4km de extensão horizontal e dura mais que 20 minutos e *microbursts* menores que 4km de extensão, podendo ter uma duração entre 4 e 5 minutos, sendo assim considerados fenômenos de mesoescala. Devido a sua pequena duração é muito complicado captar e identificar um *microbursts*, isso também é discutido em Yao e Lundgren (1996).

Segundo Fujita (1990), o autor teve por objetivo caracterizar estes fenômenos, facilitando o treinamento de pilotos de aeronaves, quanto a ocorrência destes eventos meteorológicos, evitando possíveis catástrofes. Ele desenvolveu um modelo de laboratório que tem por finalidade fotografar seções transversais do *microburst*. E encontra-se abaixo, na figura (2).

Figura 2 – Um experimento de laboratório da Universidade de Chicago, mostrando a evolução de um fluxo de ar de *microbursts*. Na atmosfera real, todo esse processo durará menos de dois minutos. 1 - estágio descendente, 2 - estágio de contato com o solo, 3 - estágio de *Touchdown* (início da expansão lateral), 4 - estágio de espalhamento e 5 - estágio dos vórtices em anéis.



Fonte: Fujita, 1990.

Foram até então desenvolvidos inúmeros métodos para tal análise, afim de reproduzir campos de fluxo que fossem semelhantes com um *microbursts*, por meio de experimentos em laboratório e também e através de simulações numéricas. Estas metodologias de modelagem, acabam facilitando seu estudo, e hoje são consideradas a melhor maneira de estudar o fenômeno, devido a sua curta duração, o que dificulta análises baseadas em apenas observações na natureza (YAO; LUNDGREN, 1996).

De acordo com estudos realizados como Lima e Loredou-Souza (2015) e Loredou-Souza et al. (2019), nos quais ambos, buscaram identificar o potencial de ocorrência de *microbursts* no Brasil. É evidenciado um padrão entre os resultados, onde os autores afirmam que a região sul do Brasil é a mais propícia a formação do evento meteorológico, de acordo com dados registrados da velocidade dos ventos e formação de tempestades nestas regiões. Sendo que um dos registros diz respeito a um *microburst* que se formou sobre a cidade de Porto Alegre - RS em fevereiro de 2019.

2.2 Modelagem de Microbursts Através de Simulações Numéricas

O estudo do comportamento de um *microburst* quando analisado através de simulações numéricas, podem ser implementadas aplicando um dos três diferentes tipos de metodologias até então já estudados e que melhor representam o fenômeno: modelagem por fonte de resfriamento, o modelo de vórtice anelar e a modelagem por jato incidente (ZHANG; HU; SARKAR, 2013).

A simulação adotando o modelo de fonte de resfriamento compreende-se por ser um caso onde existe uma queda de um fluido de maior densidade em um ambiente menos denso, aplicando uma fonte de resfriamento (diferencial de temperatura) entre os meios. Esta é uma abordagem alternativa onde a fonte de resfriamento térmico é adotada, o que sugere mais ênfase na flutuabilidade negativa e no desenvolvimento dinâmico do *microburst*. Experimentos utilizando esse método são encontrados em estudos de Lundgren, Yao e Mansour (1992) e Yao e Lundgren (1996).

O método de modelagem por vórtice anelar tem como principal base para estudo, o vórtice primário gerado em um *microburst* e através dele busca revelar a estrutura e evolução dos padrões de fluxo (IVAN, 1986).

Já a modelagem por jato incidente, refere-se a uma simulação onde um jato forçado com certa velocidade atinge uma superfície plana, onde há a formação de vórtices pois, ao se chocar com esta superfície o mesmo sofre cisalhamento e ocorre a percepção de velocidades radiais e a visível formação de um vórtice primário. Isto é discutido em Hjelmfelt (2010).

Sendo assim, devido à escassez de dados de campo e à complexidade deste fenômeno natural, é de suma importância conhecer qual método de modelagem é o melhor para o estudo, principalmente do ponto de vista da engenharia. Apesar dos esforços significativos de pesquisadores anteriores, existem poucas informações que comparem os

méritos e deméritos entre as metodologias adotadas para analisar um *microburst* (YAO; LUNDGREN, 1996).

2.3 Fluidodinâmica Computacional

A fluidodinâmica computacional (CFD) é a área da computação científica que tem por objetivo estudar métodos computacionais para realizar simulações de fenômenos que envolvem fluidos em movimento com ou sem trocas de calor (FORTUNA, 2000).

Segundo Konzen (2019), as simulações numéricas representam um arranjo de vários esquemas numéricos para resolver problemas como: equações algébricas, sistemas de equações lineares, interpolar e ajustar pontos, derivadas e integrais, equações diferenciais ordinárias entre outras.

De acordo com Ferziger e Perić (2002), para se obter uma simulação é necessário definir quais as características do problema que deseja-se simular como, as condições de contorno, condições iniciais, a geometria e o domínio espacial e as propriedades dos fluídos e sólidos envolvidos no problema.

Após isso é necessário saber qual o modelo matemático que será adotado, visando maior aproximação de um caso real para a simulação. Então deve-se definir a malha a ser considerada (dinâmica ou estática, por exemplo), escolher o método de discretização mais preciso, o que é dependente de outras variáveis que devem ser definidas: a discretização do domínio espacial, ou seja, a geração da grade da situação simulada, e também, a discretização das equações, definindo quais aproximações numéricas serão assumidas, qual o método de solução (*solver*), quais os critérios de convergência do processo iterativo (tal como, passo de tempo e número de *Courant*) e os estimadores de erros numéricos.

Seguidamente da declaração destes aspectos é necessário uma verificação através da visualização da malha gerada, isto depende de qual CFD se está utilizando, muitas vezes é necessário um *software* de pós-processamento, como por exemplo o *ParaView*. Após verificada a malha, pode-se executar a simulação, ou seja, colocar o *solver* para atuar. Em sequência deste processo se torna possível verificar alguns resultados, também usando os *softwares* de pós processamento, gerando gráficos, bi e tridimensionais.

O valor do número de *Courant* implica na estabilidade da solução para uma determinada malha, em problemas que envolvam alto nível de não-linearidade, é recomendável que seja assumido o valor não muito diferente de 1, de acordo com Favero (2009).

A maioria dos CFD's utiliza como base principal as equações de Navier-Stokes para descrever os escoamentos.

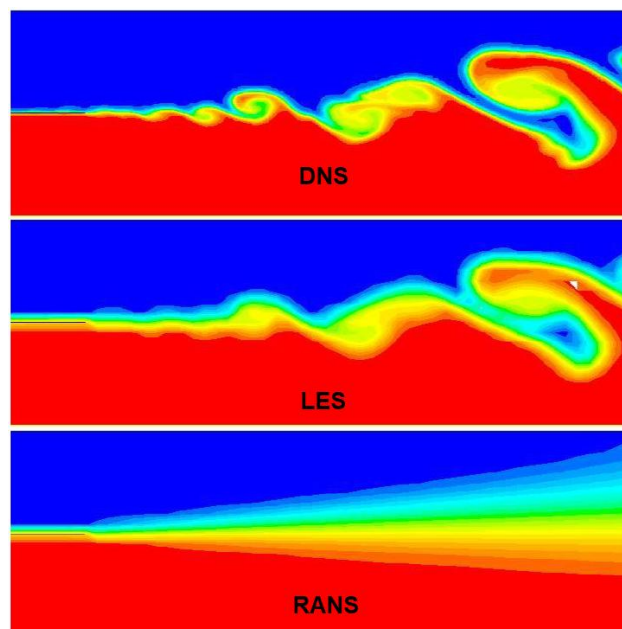
A simulação em CFD's é uma ferramenta de grande valor para o estudo e compreensão das características e comportamento de inúmeros fenômenos climáticos. Dentre eles e especificamente para a análises do escoamento de um *microburst*, devido ao evento meteorológico possuir uma escala de extensão e temporal muito pequena, seu monitoramento se torna difícil, assim uma das ferramentas utilizadas para contornar esse

problema são as simulações numéricas.

No ramo das simulações numéricas que envolvem o escoamento de fluídos, um aspecto importante que deve ser analisado, é qual o modelo de turbulência deve ser aplicado de acordo com a propriedade e a análise que se deseja realizar, não correndo o risco de se perder resultados (PIOMELLI; BALARAS, 2002). Dentre os modelos de turbulência desenvolvidos para os CFD's pode-se salientar os três tipos: simulação de grandes escalas (LES), modelo das equações de médias de Reynolds (RANS) e simulação numérica direta (DNS).

De acordo com Rezende (2009) os modelos de turbulência podem ser definidos da seguinte forma: LES é o modelo de turbulência que realiza o cálculo de modelagem para os turbilhões de grandes escalas, e parametriza os turbilhões de escala menor através de um modelo de sub-grade. RANS por sua vez, utiliza modelos da turbulência estatística baseado nas equações de Navier-Stokes médias no tempo, no qual os turbilhões de pequena escala, são todos transformados em médias e alguns menores ainda nem são considerados. O DNS é modelo de turbulência em que todas as escalas de movimentos são calculados e resolvidos com precisão e nenhuma modelagem é usada, isso requer um refinamento grande da malha, o que acarreta em grande custo computacional. Para uma melhor compreensão é ilustrado na figura (3), abaixo:

Figura 3 – Comparação entre os modelos de turbulência DNS, LES e RANS.



Fonte: (LOPEZ, 2017).

Para análise de um fenômeno como os *microbursts*, comumente é adotado o modelo de turbulência LES, afim de capturar-se todas as características dos vórtices que se formam no solo e melhor opção quando se trata de recurso computacional. Contudo

quando o foco não é a estrutura dos vórtices alguns autores utilizam RANS.

2.4 Processo de Discretização

Discretizar uma equação consiste em transformar uma equação diferencial parcial em uma equação algébrica para variáveis do problema, obtidas em localizações discretas no espaço e tempo.

Quando trata-se de uma simulação numérica, o processo de traduzir uma geometria e modelos matemáticos em uma linguagem computacional, ou seja, em números, denomina-se processo de discretização.

Para a discretização espacial, necessita-se gerar uma malha ou grade, constituída de um número finito de pontos distribuídos pelas superfícies da geometria desejada, esses números finitos são divididos em células por todo o domínio em que os valores numéricos das variáveis precisam ser determinados (HIRSCH, 2007).

As células podem possuir geometria de quadrilátero, triangular, hexaédrica, entre outras. As malhas ou grades formadas pelas células podem ser malhas estruturadas ou desestruturadas, dinâmicas ou estáticas, segundo Anderson e Wendt (1995). É aplicada a lei da conservação nos pontos discretos definidos acima, para que seja possível o cálculo dos fluxos, esses pontos são conhecidos como nós.

Para a discretização de uma equação diferencial parcial, existem inúmeros métodos que podem ser aplicados, como: método dos volumes finitos, método dos elementos finitos e método das diferenças finitas (SAYMA, 2009). Na maioria dos trabalhos e simulações, o método dos elementos finitos é aplicado, isso se deve devido a que o mesmo, abrange uma grande variedade de problemas e pode ser empregado para qualquer tipo malha. Este método consiste na divisão do domínio em volumes de controle adjacentes e aplica-se as equações de conservação a cada um deles (FILHO et al., 2015).

2.5 OpenFOAM e ParaView

2.5.1 OpenFOAM

Um CFD que é muito utilizado é o *OpenFOAM*. O mesmo é composto pela palavra “*Open*” que significa que o programa de computador seja distribuído gratuitamente como um código-fonte aberto nas condições e termos dados pelo GNU licença, e a abreviatura “*FOAM*” que é a abreviação do inglês ***Field Operation And Manipulation*** (operação e manipulação de campo). O *OpenFOAM* é uma enorme biblioteca, que trabalha na linguagem C++ de código aberto que possui todos os tipos de ferramentas para executar operações de campo e manipulação dentro da mecânica da continuidade. Contudo, é especialmente utilizado na área da dinâmica de fluidos, (GJESING; HATTEL; FRITSCHING, 2009).

É um *software* que contém inúmeros métodos de solução dentro de sua biblioteca,

conhecidos como *solvers*. São responsáveis por aplicar todos os métodos numéricos para a solução dos problemas.

De acordo com o manual do usuário (GREENSHIELDS, 2015), o *OpenFOAM* é basicamente composto pelos seguintes diretórios, *0*, *Constant* e *System*. O diretório *0* contém as condições iniciais para a realização da simulação numérica. *Constant* que por sua vez, possui todas as propriedades físicas e também a pasta denominada *polyMesh*, onde consta a descrição completa da malha. E o diretório *System* onde encontram-se os arquivos *blockMeshDict*, o qual é responsável pela geração das dimensões da malha e pela identificação da nomenclatura das paredes do domínio simulado, o arquivo *controlDict*, na qual sua função determinar o tempo e passo de tempo, o *fvSchemes* responsável por determinar esquemas numéricos para os termos, tais como os derivativos nas equações, o *fvSolution*, no qual configura-se os solucionadores das equações, tolerâncias e algoritmos. Esses esquema é funcional para um caso bem básico, contudo, podem ser necessários outros diretórios e comandos de acordo com a necessidade e caso que deseja-se simular.

2.5.2 ParaView

A principal ferramenta de pós-processamento que é fornecida junto do *openFOAM* é o módulo leitor para executar com *ParaView*, o qual é um aplicativo de visualização de código aberto (GREENSHIELDS, 2015).

O *ParaView* usa o *Visualization Toolkit* (VTK) como mecanismo de renderização e processamento de dados e, sendo assim, é capaz de ler quaisquer dados no formato VTK. O *OpenFOAM* já é programado para converter seus dados do formato original para o formato VTK, assim é possível a visualização de resultados das simulações realizadas no CFD em questão, através do uso do *ParaView*.

3 METODOLOGIA

Para a elaboração do presente trabalho, foi utilizado o CFD *OpenFoam* 9, que baseia-se na utilização e integração das equações de *Navier Stokes* da conservação e no método de volumes finitos, para a discretização das equações.

Na simulação, para definir os parâmetros de entrada adotados, foram seguidas as mesmas condições assumidas no experimento realizado por Demarco et al. (2013). A situação de estudo diz respeito a um jato descendente carregando um fluido com maior densidade, simulando os ventos densos de um *microburst*, que é despejado em um domínio onde se encontra outro fluido de menor densidade, com a finalidade de representar a atmosfera onde o evento meteorológico ocorre. A diferença entre as massas específicas dos fluidos é de 10%.

A fim de facilitar a pesquisa, no experimento laboratorial onde este trabalho se baseia, optou-se por utilizar água como o fluido base, onde um caso era água em seu estado normal (fluido menos denso) e água com sal (fluido mais denso), sendo assim os parâmetros de entrada admitidos para esta simulação são os demonstrado na tabela (1), a seguir:

Tabela 1 – Parâmetros iniciais.

Variável de Entrada	Valor
ρ_1	1000 kg m ⁻³
ρ_2	1100 kg m ⁻³
U	-1,18ms ⁻¹

Onde ρ_1 e ρ_2 são as densidades do fluido estático contido no domínio e do fluido que diz respeito ao jato descendente, respectivamente. E U a velocidade de descida do fluido referente ao jato denso.

O *solver* utilizado foi o *interFoam*, o qual, de acordo com a descrição contida no próprio manual do *OpenFoam* 9 (GREENSHIELDS, 2015), pode ser aplicável para casos multifásicos, envolvendo 2 fluidos incompressíveis com densidades distintas.

O modelo de simulação de grandes turbilhões, do inglês *Large Eddy Simulation* (LES) é o utilizado para o caso trabalhado, a fim de captar de maneira mais assertiva as características principais do *microburst* simulado, os vórtices, visando um custo computacional reduzido, fazendo o uso do modelo de sub-grade conhecido como *kEqn*, para parametrização dos turbilhões menores.

Na resolução das equações o *solver* faz uso do algoritmo PIMPLE, o qual é indicado para trabalhar até elevados números de *Courant*. Contudo, foi definido que o passo de tempo seria ajustável de acordo com o máximo número de *Courant*, que apesar do algoritmo permitir a utilização de altos valores, por segurança será configurado pra variar em torno de 1, evitando assim que os resultados diverjam.

As equações envolvidas no algoritmo, são as equações de *Navier Stokes*, assim

sendo a equação da continuidade Eq.(1) e equação do momento Eq.(2).

$$\frac{\partial(u_j)}{\partial x_j} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial[\rho u_i u_j]}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial(\tau_{ij} + \tau_{t_{ij}})}{\partial x_j} + \rho g_i + f_{\theta i} \quad (2)$$

Nas quais u_i representa a velocidade, g_i a aceleração da gravidade, p a pressão e τ_{ij} e $\tau_{t_{ij}}$ são o cisalhamento viscoso e turbulento, respectivamente e $f_{\theta i}$ é a tensão na superfície.

Assim torna-se necessário definir alguns parâmetros como a densidade, mostrado na Eq.(3) e a tensão na superfície na Eq.(4).

$$\rho = \alpha \rho_1 + (1 - \alpha) \rho_2 \quad (3)$$

O α é 1 quando o fluido interno é o fluido com densidade ρ_1 e 0 quando o fluido interno é ρ_2 . O mesmo varia entre 0 e 1 quando os dois fluidos se encontram em mistura. Para o seguinte trabalho, inicialmente $\alpha = 1$.

Pode-se modelar a tensão na superfície como sendo uma força de superfície contínua, calculada da seguinte forma:

$$f_{\theta i} = \sigma \kappa \frac{\partial \alpha}{\partial x_i} \quad (4)$$

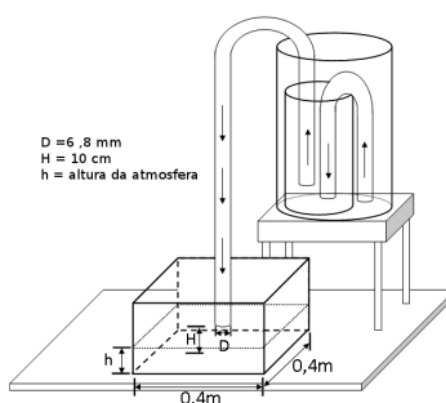
Em que σ é uma tensão constante de superfície entre os dois fluidos, a qual neste trabalho foi adotado como sendo $\sigma = 0$ e κ a curvatura, que pode ser calculada da seguinte forma, apresentado pela Eq.(5):

$$\kappa = -\frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\partial \alpha / \partial x_i}{|\partial \alpha / \partial x_i|} \right) \quad (5)$$

Definidas as condições iniciais, solver e modelo de turbulência assumidos, pode-se dar início a criação da malha, ou seja, o domínio onde tudo irá ser simulado.

Com a finalidade de obter resultados similares aos de Demarco et al. (2013), para elaboração da malha foram seguidos as mesmas dimensões adotadas no experimento em laboratório realizado pelo autor. Mostrado na figura (4) abaixo.

Figura 4 – Esquema laboratorial do estudo base.



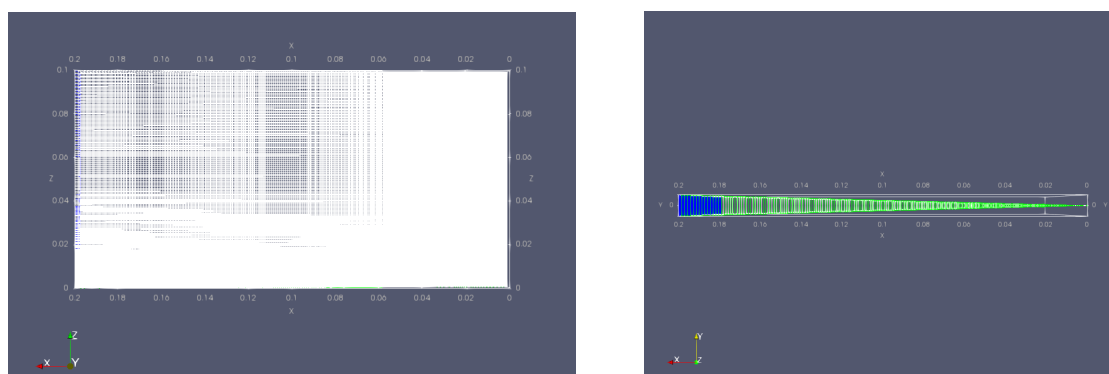
Fonte: Demarco et al. (2013).

Para este caso é ilustrada através da figura (5) abaixo, as características adotadas referentes a malha. Visando otimizar o andamento da simulação, foi assumido uma malha bidimensional axissimétrica com angulatura de 3° , possível visualizar na figura (5b), o que pode ser comparado a uma "fatia de pizza", na qual é simulada apenas uma porção do domínio, onde é possível configurar o caso para não haver perdas de informações devido a essa simplificação, mantendo as características originais do domínio, subentendidas. Estas dimensões podem ser visualizadas na figura (5a) e figura (5c).

Com base na visualização das características apresentadas na figura (5c), pode-se descrever as condições adotadas. Na região (*Entrada*) é onde está configurada a entrada do fluido mais denso com uma velocidade fixa U . E na extremidade superior (*Superfície Superior*) a malha é aberta à atmosfera, permitindo a entrada e saída de fluídos, para evitar que durante a simulação o fluido do domínio transborde, e ao mesmo tempo, que este não tenha limitações quanto a quantidade de fluido que pode ser adicionado no seu interior.

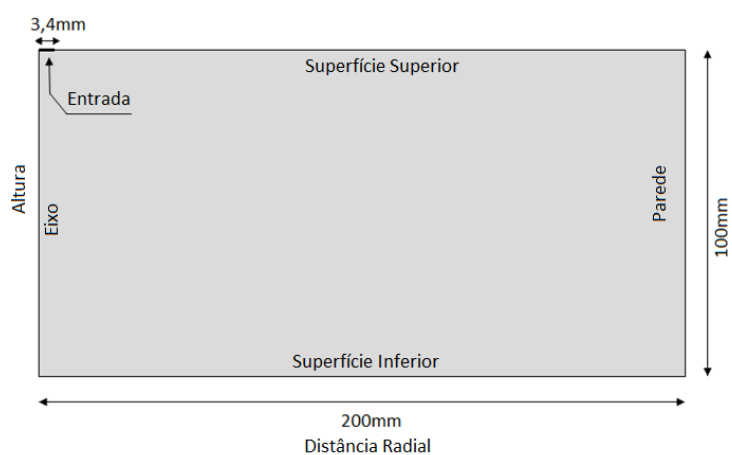
Na superfície inferior (*Superfície Inferior*) e nas paredes (*Parede*) assumiu-se que as mesmas não eram abertas a atmosfera, e uma condição de não escorregamento (No Slip), as regiões podem ser observadas na figura (5). Para o caso das regiões das paredes (*Parede*) e *Eixo* é definido qual o tipo de estrutura que as mesmas representam, que no *OpenFoam* é adotado o tipo *Wedge*, para definir que a malha é axis-simétrica, devido a essa característica é possível assumir que o domínio não se limita apenas a malha gerada, mas que o mesmo possui uma continuidade em seu contorno, e por esse detalhe, faz com que as informações geradas na simulação não sejam perdidas, mesmo que a malha adotada seja somente uma porção do volume.

Figura 5 – Dimensões da Malha Adotada.



(a) Vista frontal.

(b) Vista superior

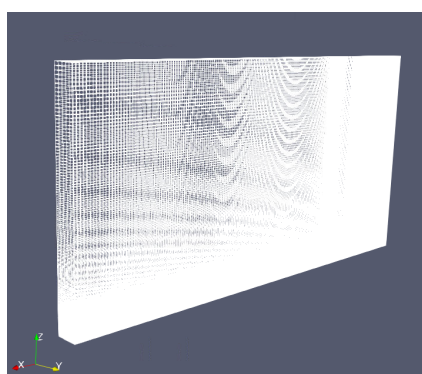


(c) Vista frontal com especificações.

Fonte: O autor.

Outro aspecto a ser avaliado antes de rodar a simulação é o refinamento da malha. Como a simulação se remete aos efeitos de cisalhamento no solo que acarreta na geração dos vórtices, a malha ser extremamente refinada quando se aproxima da superfície inferior, afim de não perder os resultados nessas regiões. Isto pode ser observado na figura (6).

Figura 6 – Visualização do refinamento.



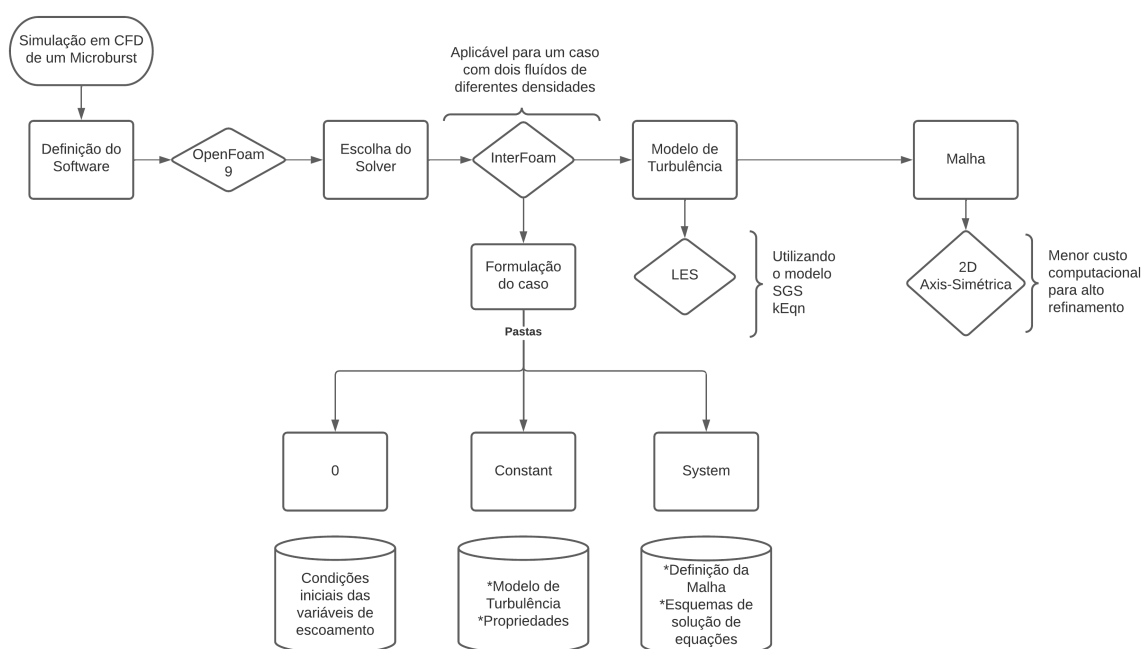
Fonte: O autor.

Como software de pós processamento e visualização da malha é feito o uso do *ParaView* 5.6.0, sendo assim possível gerar as imagens acima.

Todas as condições iniciais de contorno utilizadas neste trabalho, assim como outros diretórios essenciais para a obtenção do caso estão dispostos nos APÊNDICES.

3.1 Fluxogramas das Atividades Desenvolvidas

Figura 7 – Fluxograma da aplicação da metodologia.



Fonte: O autor.

4 RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos aplicando a metodologia. E a partir disso, validar as características e simplificações adotadas na presente pesquisa, com base em estudos anteriores, comparando os resultados obtidos neste trabalho aos atingidos por Demarco et al. (2013), em seu experimento laboratorial, o estudo base. Na seção dos APÊNDICES, constam imagens do resultado do experimento, realizado pelo autor.

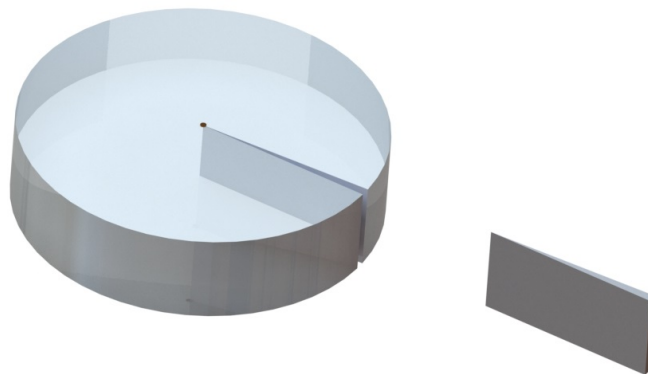
Com este intuito, para uma melhor visualização e análise dos resultados, as janelas de tempo e de distancias, como posição radial e altura, foram estabelecidas segundo um padrão, conforme o estudo base, citado no parágrafo anterior.

4.1 Validação da Malha Axis-Simétrica

As simulações axissimétricas são domínios do tipo fatia de pizza (*wedge*), ou seja, apenas uma porção do domínio é simulada, sem perder as características do domínio completo, permitindo utilizar uma malha extremamente refinada, através de um baixo custo computacional, devido a simplificação da malha. Por exemplo, considerando que toda a superfície é tocada pelo jato incidente, no caso em questão, a análise será realizada em apenas uma porção de volume, analogamente, seria como se o domínio fosse cortado semelhante a uma fatia de pizza, assim é considerado que o escoamento naquela região, é o mesmo que o escoamento presente no domínio completo. Isto pode ser observado no trabalho de Abd-Elaal, Mills e Ma (2018), onde os autores utilizaram uma malha axissimétrica para realizar a simulação de um microburst e obtiveram resultados satisfatórios.

Para uma melhor compreensão, pode-se visualizar abaixo na figura (8) de maneira simplificada como se dá a definição do tipo *wedge* em uma simulação.

Figura 8 – Visualização da malha tipo *wedge*, "fatia de pizza". Tem-se um domínio completo e é escolhida uma região em forma de fatia, para análise do escoamento.



Fonte: O autor.

4.2 Análise dos Resultados

Os resultados obtidos são dispostos a seguir, assumindo-se o tempo $t = 0$ e distância radial $r = 0$, como o momento em que o jato incidente toca a superfície inferior. Este estudo é baseado, como dito anteriormente, no experimento laboratorial realizado por Demarco et al. (2013), onde o autor realizou o experimento avaliando quatro situações distintas, envolvendo fluxos e diferenças entre as massas específicas, o que será utilizado neste trabalho como auxílio visual e comparativo são as informações sobre a situação relacionada a diferença de massa específica de 5%, a fim de validar o comportamento das características analisadas e assegurar-se nas informações descritas no trabalho, sobre o experimento de 10% de diferença entre as massas específicas, assim como o que foi assumido para o presente trabalho.

4.2.1 Estrutura e Comportamento do Fenômeno

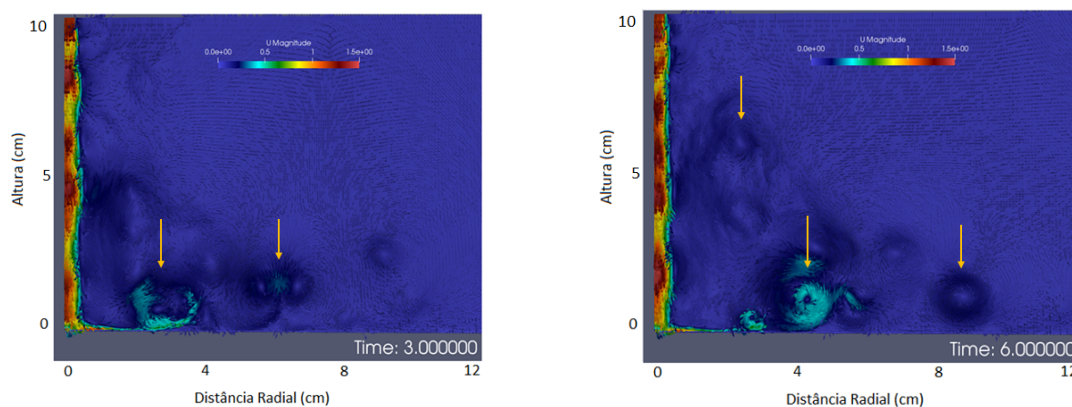
Os *microbursts* são caracterizados por possuírem uma coluna densa de ar que se choca com o solo, e nesse contato são geradas instabilidades, isso se dá devido ao cisalhamento entre o fluido em movimento e o fluido parado. Essas instabilidades denominam-se, vórtices.

A simulação realizada, apresentou resultados similares aos obtidos por estudos anteriores, como Proctor (1985).

Através da figura (9) abaixo, a formação completa dos primeiros vórtices pode ser visualizada dentro dos primeiros segundos de simulação. Para este estudo, buscando obter um padrão no acompanhamento dos resultados, visualiza-se os primeiros vórtices na janela de tempo de 3 segundos. Sendo assim, pode-se observar que o vórtice primário (maior vórtice) se forma inteiramente neste tempo e se mantém perfeitamente visível até os 6 segundos, como mostrado na figura (9b), e no decorrer da simulação, pode-se notar que o mesmo vórtice se estende radialmente, originando novas perturbações, ou seja, vórtices secundários, que tendem a se sobrepor uns sobre os outros, que podem acabar lhes conferindo uma estrutura não totalmente definida em alguns instantes de simulação.

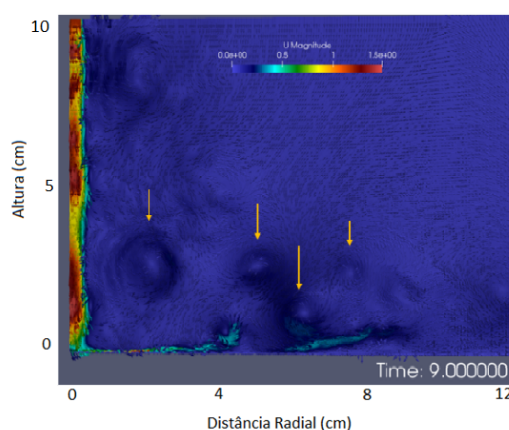
Analisando a propagação do *microburst* em outros instantes de tempo ($t = 3s$, $t = 6s$ e $t = 9s$), nota-se que na propagação dos vórtices, as velocidades máximas atingidas não ultrapassam o valor da velocidade do jato incidente, porém chegam a valores bem próximos. Essa análise permite perceber, que as máximas velocidades são encontradas próximas centro de contato do jato com a superfície, onde o cisalhamento é maior, de acordo com o trabalho de Fujita e Wakimoto (1983), onde o autor obteve resultados e conclusões semelhantes.

Figura 9 – Propagação da simulação numérica, analisando o comportamento da disposição radial variando com a altura em determinados períodos de tempo. Onde Fig.(a) corresponde ao tempo de 3 segundos, a Fig.(b) ao tempo de 6 segundos e a Fig.(c) ao tempo de 9 segundos.



(a) Simulação no tempo de 3 segundos.

(b) Simulação no tempo de 6 segundos.



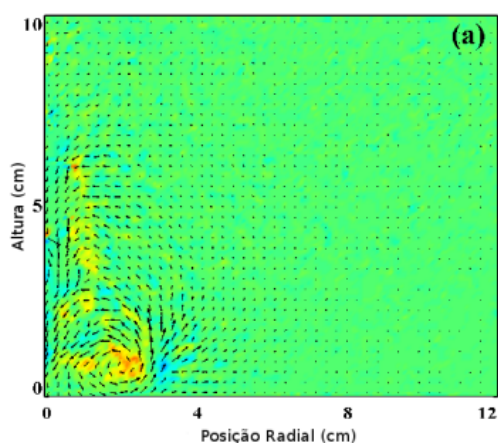
(c) Simulação no tempo de 9 segundos.

Fonte: O autor.

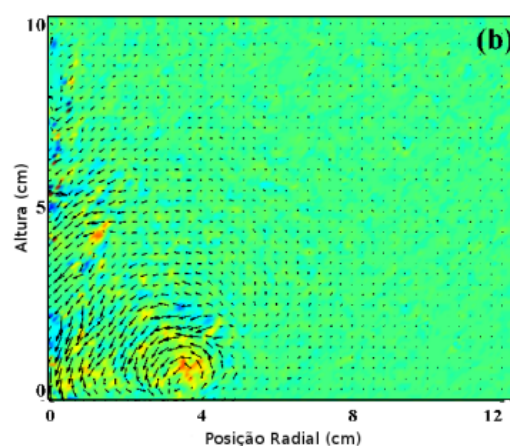
Na figura (10) abaixo, são evidenciados os resultados obtidos por Demarco et al. (2013). É visível a semelhança entre o resultado quanto ao comportamento dos vórtices através desta simulação, o que valida a utilização da malha simplificada neste trabalho, onde a mesma obtém uma resposta condizente ao experimento em laboratório e mais importante que isso, condizente ao comportamento do fenômeno na natureza, o que é evidenciado no estudo realizado por Fujita (1990). Analisando o comportamento dos campos de velocidades obtidos por Demarco et al. (2013), existe uma diferença entre o alcance radial dos vórtices, porém a estrutura dos mesmos é muito semelhante, o que vale ressaltar é que estes resultados são referente a um experimento utilizando uma diferença de massa específica entre os fluídos de 5%, o que difere-se deste trabalho onde foi assumida uma diferença de 10%. Contudo o autor afirma que no seu experimento envolvendo diferenças maiores de massa específica a propagação dos vórtices tinham maior alcance radial e

velocidades mais intensas.

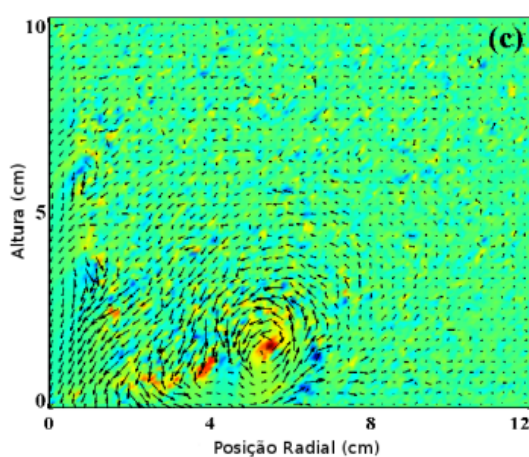
Figura 10 – Campos de Vorticidade nos tempos de 3 segundos Fig.(a), 6 segundos Fig. (b) e 9 segundos Fig.(c).



(a) 3s.



(b) 6s.



(c) 9s.

Fonte: Demarco et al. (2013).

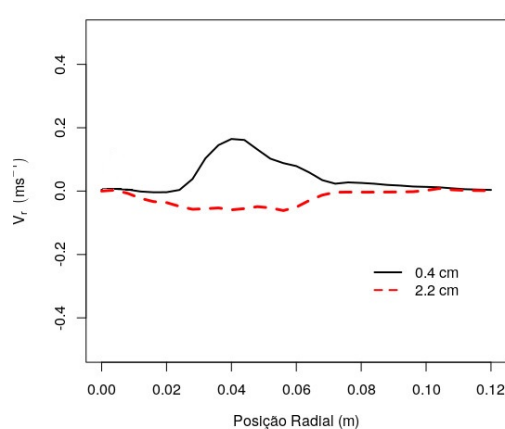
4.2.2 Perfis de Velocidade Radial

Um *microburst* se trata de um fenômeno natural composto de campos de velocidades que se propagam em todas as direções. Neste estudo objetiva-se, simular o comportamento dos perfis de velocidade conforme aumento da distância radial e de acordo com a altura do domínio. Como trata-se de uma malha axissimétrica são avaliados os resultados exatamente no centro do ângulo de 3° .

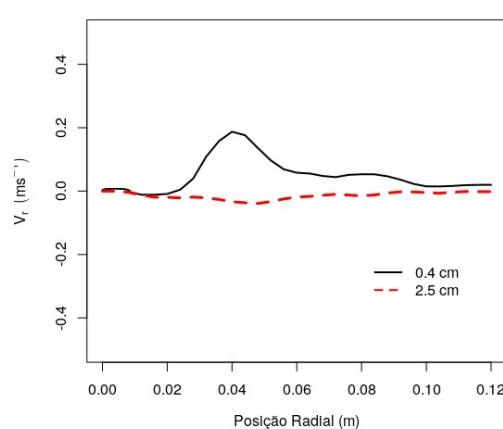
Para avaliar o comportamento da velocidade de acordo com a posição radial deve-se determinar uma altura fixa e avaliar como se dá a distribuição dos perfis de velocidade radial neste local, em instantes de tempo diferentes. Seguindo as características adotadas

no experimento de base, a altura definida foi 0,4cm . A partir desta, foram definidos outros pontos para verificar como a velocidade varia em determinados instantes de tempo e em alturas diferentes, sendo assim, foram definidos outros pontos superiores: 2,2cm , 2,5cm e 3,3cm. Os resultados obtidos a partir desta análise podem ser observados na figura (11), abaixo:

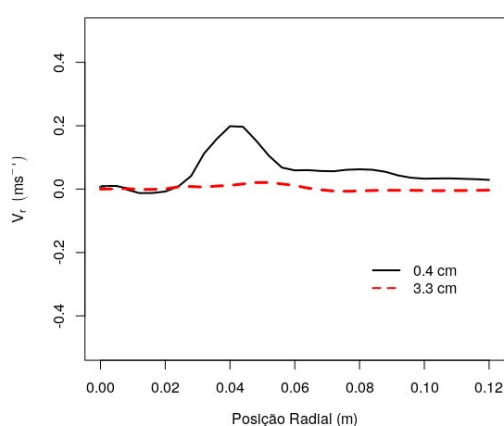
Figura 11 – Variação da velocidade de acordo com o aumento da distância radial. Onde a Fig.(a) trata da altura fixa 0,4cm comparada a altura de 2,2cm. A Fig.(b) a altura fixa de 0,4cm em comparação a altura de 2,5cm. E a Fig.(c) a altura 0,4cm comparada a a altura de 3,3cm.



(a) Variação da velocidade radial, período de 3 segundos.



(b) Variação da velocidade radial, período de 6 segundos.



(c) Variação da velocidade radial, período de 9 segundos.

Fonte: O autor.

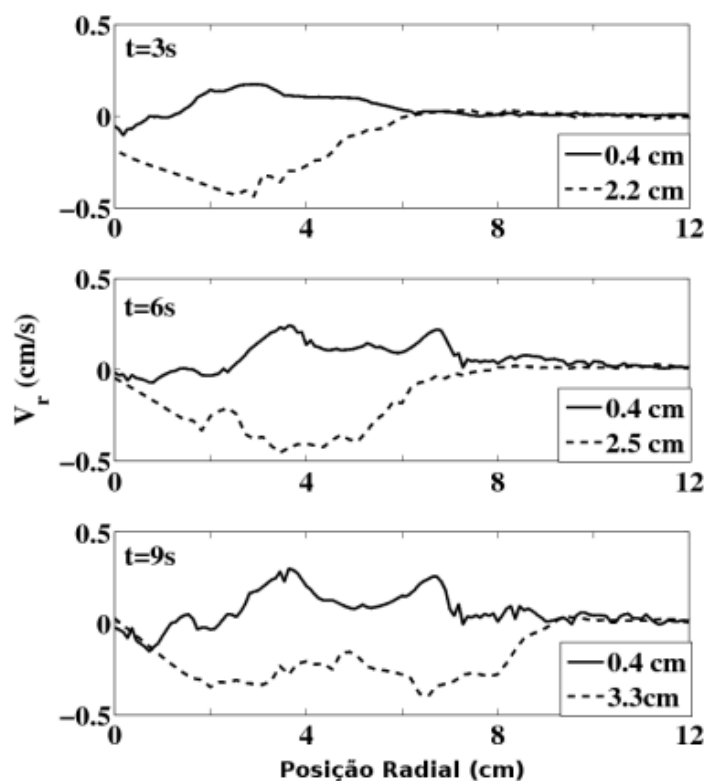
Para este caso a velocidade possui sentido positivo, quando a sua distribuição se dá na direção do escoamento e sentido negativo quando a mesma se opõe à direção do

escoamento.

Na figura (11) é visível a existência de maior intensidade nos perfis de velocidade no ponto 0,4cm de altura, ou seja, mais próxima da superfície que os outros pontos de análise. Além de obter-se um perfil de velocidade distribuído no sentido positivo, este fato ocorre por tratar-se de uma altura onde há a formação inicial dos vórtices primários, ou seja, os vetores que compõe o perfil encontram-se na direção do escoamento. Outro detalhe que pode ser avaliado é que nas posições radiais da extremidade $r = 0$ a velocidade radial se encontra praticamente nula, devido ao ponto de colisão com a base, onde temos a inversão de sentido dos vetores que compões o perfil de velocidade. Logo em seguida o perfil de velocidade já apresenta os valores mais intensos detectados na simulação, isto ocorre entre $r = 3\text{cm}$ e $r = 6\text{cm}$ aproximadamente. Já quando analisa-se a altura de 2,2cm é notório que este ponto apresenta um perfil de velocidade negativo, em pontos mais altos o sentido da velocidade predominante é contrario ao escoamento, o que diz respeito a formação completa dos vórtices, onde os vetores já se mostram em sua maioria no sentido negativo e se somando aos novos vórtices que vão se formando ao decorrer da simulação. Quanto mais afastado da posição $r = 0$ a velocidade vai perdendo intensidade e decrescendo até zero, pois os vórtices vão se distanciando do jato e os vetores que simulam os ventos tendem a ter suas direções no sentido dos vórtices, ou seja, tendem a somar-se aos novos vórtices em posições anteriores, o que lhes confere esta perda de intensidade em posições afastadas, o que valida as características do *microburst* de possuir uma área de ataque mais concentrada próxima ao jato descendente.

Ainda analisando a figura (11), para as demais alturas comparadas, as mesmas conclusões podem ser tomadas de acordo com o aumento da posição radial e decorrer do tempo de simulação. Contudo, nas três situações o que difere dos resultados obtidos por outros estudos, é que a velocidade decai mais rapidamente de acordo com o aumento da altura e do tempo de simulação neste trabalho, o que pode ser visualizado comparando a figura (12) abaixo, com a figura (11), onde estão ilustrados os resultados obtidos pelo no experimento laboratorial (DEMARCO et al., 2013), para um caso onde a diferença de densidade entre os fluídos adotada pelo autor foi de 5%, o que difere deste trabalho onde é assumida uma diferença de 10%, ou seja, devido a esse detalhe, os perfis concentram-se próximos a superfície inferior, mas ainda assim, é evidenciada a semelhança no comportamento dos mesmos.

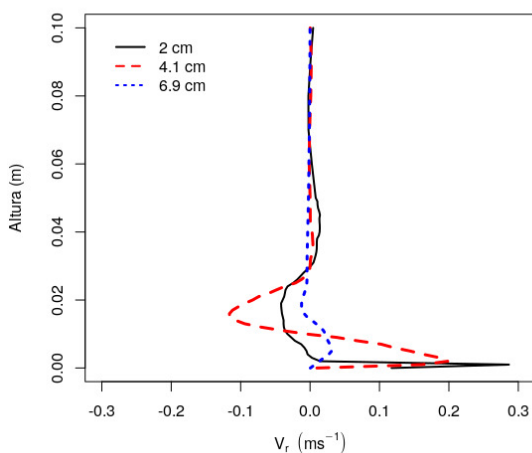
Figura 12 – Perfis de velocidade radial em função da distância do eixo central do *microburst*, para diferentes valores alturas, correspondendo aos níveis superiores (linha-pontilhada) e inferiores (linha-cheia) para o núcleo do vórtice (experimento de 5%). a) $t = 3\text{s}$; b) $t = 6\text{s}$; c) $t = 9\text{s}$.



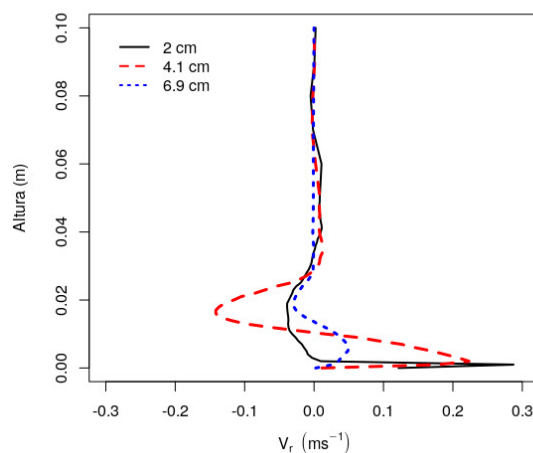
Fonte: Demarco et al. (2013).

Como o fenômeno apresenta campos de velocidade em todas as direções é importante também realizar uma análise do comportamento dos perfis de velocidade radial de acordo com a altura. Analogamente ao raciocínio utilizado para a situação anterior, foram definidas posições radiais fixas e avaliado como estes perfis se dão em três instantes de tempo diferentes. A Figura (13) apresenta a variação da velocidade radial com a altura, tomando distâncias radiais como fixas, nos instantes de tempos: $t = 3\text{ s}$, $t = 6\text{ s}$ e $t = 9\text{ s}$.

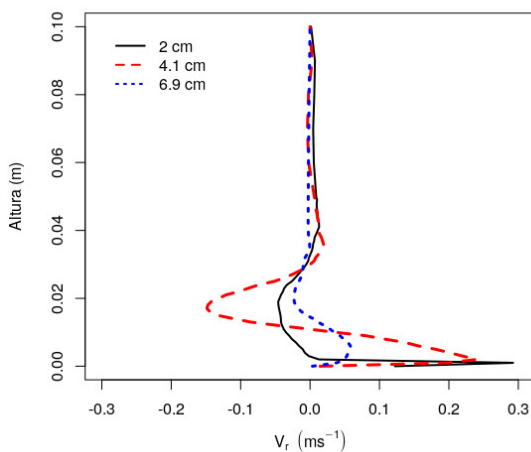
Figura 13 – Variação da velocidade radial de acordo com a altura. Nas quais tanto a Fig.(a), a Fig.(b) e Fig.(c) tratam da variação dos perfis de velocidade tomando 3 distâncias radiais como fixas, sendo elas $r = 2\text{cm}$, $r = 4,1\text{cm}$ e $r = 6,9\text{cm}$, respectivamente. E cada figura representa o tempo onde esses perfis foram analisados.



(a) Variação da velocidade radial pela altura, período de 3 segundos.



(b) Variação da velocidade radial pela altura, período de 6 segundos.



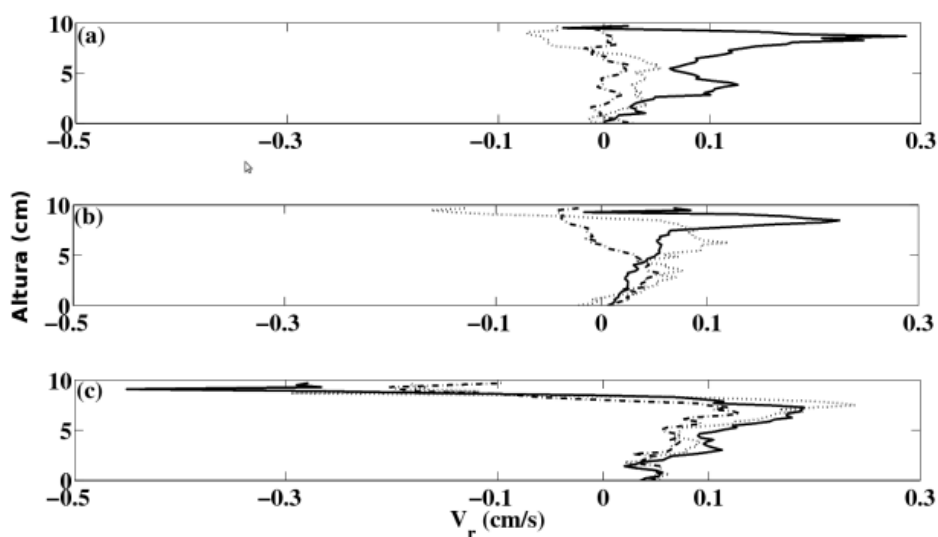
(c) Variação da velocidade radial pela altura, período de 9 segundos.

Fonte: O autor.

Na Figura (13a) é evidenciado que os vórtices não atingiram alturas muito elevadas devido à simulação levar em consideração uma diferença de massa específica maior, o fluido do jato é 10% mais denso do que o fluido estático, sendo assim, os perfis de velocidade radial possuem maior intensidade próximas ao solo e um rápido decréscimo até $V_r = 0$ em níveis mais elevados, o que se mostra diferente dos resultados ilustrados na figura (14), constatados por Demarco et al. (2013), onde exemplifica seu experimento, no

qual o autor adotou uma diferença de massa específica de 5% entre os fluídos, e nesse caso os perfis atingiram níveis mais elevados, porém o modo como se dá esta distribuição do perfil é semelhante nos dois casos, possuindo inicialmente (níveis mais baixos) um perfil positivo e com o aumento da altura os mesmos tem seu sentido invertido, caracterizando a formação dos vórtices, o mesmo é confirmado quando comparado com os outros estudos onde a simulação é baseada em um jato incidente, como o caso de Hjelmfelt (2010). Em 3 segundos pode-se notar que os vórtices ainda não haviam se propagado até pontos radiais mais distantes do ponto de contato do fluído descendente como no caso da posição $r = 6,9\text{cm}$, por esse, motivo a velocidade radial nesta posição encontra-se próxima de zero. Com o passar do tempo, como o mostrado nas Figuras (13b) e (13c) os vórtices se propagam radialmente até pontos mais distantes do centro do jato, confirmando a movimentação radial dos vórtices contidos no *microburst*. Entretanto, não é possível notar perfis de velocidade muito elevados, como nos pontos radiais mais próximos do centro do jato, que é o caso de $r = 2\text{cm}$, o que complementa o resultado obtido e evidenciado na figura (11).

Figura 14 – Perfis de velocidade radial em função da altura, onde tem-se $r = 2\text{cm}$ (linha-cheia), $r = 4,1\text{cm}$ (linha-pontilhada) e $r = 6,9\text{cm}$ (linha-tracejada) para o experimento de 5%. a) $t = 3\text{s}$; b) $t = 6\text{s}$; c) $t = 9\text{s}$.

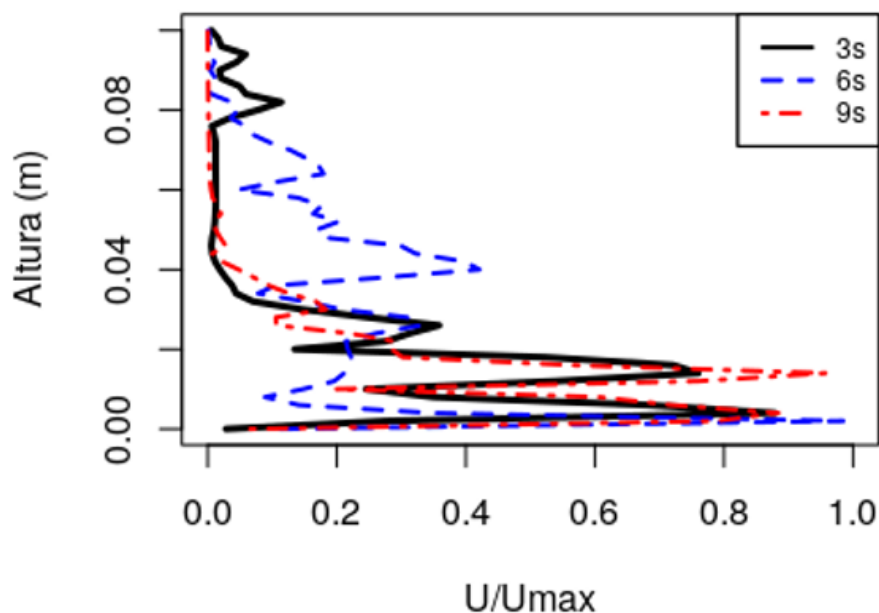


Fonte: Demarco et al. (2013).

Foram também avaliados na região de sobreposição dos vórtices, perfis de velocidade verticais de acordo com a altura, para isso foi definida uma posição radial, onde neste trabalho a simulação apresentou a formação dos primeiros vórtices, e por consequência as maiores velocidades como ponto de análise, devido a sobreposição de um vórtice sobre o outro no decorrer do tempo, e por esse motivo, os mesmos acabam mantendo sua intensidade, esta posição ocorre logo após o contato do jato com a superfície o que ocorre

em aproximadamente $r = 4,5\text{cm}$. Sendo assim, a situação foi analisada nos mesmos instantes de tempo que o estudo base utilizou, $t = 3\text{s}$, $t = 6\text{s}$ e $t = 9\text{s}$.

Figura 15 – Comportamento do perfil de velocidade vertical adimensional, variando de acordo com a altura.



Fonte: O autor.

Na figura (15), pode-se perceber que a velocidade de propagação é mais intensa próxima ao solo. À medida que a altura aumenta, o perfil mostra que a velocidade decresce até próximo a 0. É possível observar que nos tempos de $t = 6\text{s}$ e $t = 9\text{s}$ apresentam maior intensidade, isso se dá devido a maior número de sobreposição de um vórtice sobre o outro do que no instante $t = 3\text{s}$. Confirmando o que também ocorreu com os perfis de velocidade radiais.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho apresenta a simulação numérica em CFD de um fenômeno da natureza conhecido como *microburst*, baseando-se nos resultados obtidos em um estudo realizado em laboratório por Demarco et al. (2013).

No presente trabalho foi descrito todo o procedimento para realização de tal simulação e os parâmetros adotados, onde optou-se por reduzir custo computacional simplificando o tipo de domínio assumido no experimento laboratorial, o substituindo por uma malha bidimensional axissimétrica, configurando a mesma para não perder informações devido a esta simplificação, adicionando a condição para as paredes do tipo *wedge*, com isso foi possível adotar extremo refinamento na malha, principalmente nas regiões próximas a superfície onde se daria boa parte das análises, com a finalidade de obter uma resposta mais próxima possível da realidade, incluindo os pequenos vórtices gerados em um *microburst*, com um custo baixo computacional.

Sendo assim, pode-se concluir que os objetivos foram atendidos, tendo em vista que foi possível simular o experimento laboratorial realizado por Demarco et al. (2013) e se obter resultados condizentes ao estudo, assim como em outros trabalhos realizados por autores que realizaram simulações numéricas axissimétricas para compreender o fenômeno como Abd-Elaal, Mills e Ma (2018).

Foi observado que a propagação dos vórtices apresentaram um comportamento semelhante ao esperado e de acordo com o relatado por Fujita (1990), o qual foi o pioneiro nos estudos sobre *microbursts* na natureza.

Os resultados mostram que as maiores velocidades são encontradas próximas à superfície, tem maior intensidade em posições radiais onde ocorre a formação dos primeiros vórtices e com o decorrer do tempo os vórtices se sobrepõe e vão ganhando intensidade, o que também é validado quando comparado com estudos anteriores (PROCTOR, 1985; ABD-ELAAL; MILLS; MA, 2018).

5.1 Trabalhos Futuros

Para trabalhos futuros, pretende-se realizar a simulação em um caso tridimensional mantendo as configurações originais do experimento laboratorial do estudo base, além de introduzir um perfil de temperatura entre os fluídos de diferente densidade, realizando uma análise sobre o efeito deste parâmetro no comportamento do *microburst*, visando aproximar a simulação das características físicas reais do fenômeno meteorológico.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABD-ELAAL, E.-S.; MILLS, J. E.; MA, X. Numerical simulation of downburst wind flow over real topography. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, Elsevier, v. 172, p. 85–95, 2018.

ANDERSON, J. D.; WENDT, J. **Computational fluid dynamics**. [S.l.]: Springer, 1995. v. 206.

CHURCH, C.; SNOW, J.; AGEE, E. Tornado vortex simulation at purdue university. **Bulletin of the American Meteorological Society**, American Meteorological Society, v. 58, n. 9, p. 900–909, 1977.

DEMARCO, G. et al. **Simulações em laboratório de escoamentos em meios estratificados**. 2013. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Santa Maria, 2013.

FAVERO, J. L. **Simulation of viscoelastic fluid flows: Development of a methodology for analysis using the software OpenFOAM and constitutive differential equations**. 2009. Tese (Doutorado) — UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL; ESCOLA DE ENGENHARIA . . . , 2009.

FERZIGER, J. H.; PERIĆ, M. **Computational methods for fluid dynamics**. [S.l.]: Springer, 2002. v. 3.

FILHO, A. C. et al. Métodos numéricos para mecânica dos fluidos. 2015.

FORTUNA, A. O. Técnicas computacionais para dinâmica dos fluidos. 2000.

FUJITA, T.; WAKIMOTO, R. Microbursts in jaws depicted by doppler radars, pam, and aerial photographs. 1983.

FUJITA, T. T. Downbursts: meteorological features and wind field characteristics. **Journal of wind engineering and industrial aerodynamics**, Elsevier, v. 36, p. 75–86, 1990.

GJESING, R.; HATTEL, J.; FRITSCHING, U. Coupled atomization and spray modelling in the spray forming process using open foam. **Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics**, Taylor & Francis, v. 3, n. 4, p. 471–486, 2009.

GREENSHIELDS, C. J. Openfoam user guide. **OpenFOAM Foundation Ltd, version**, v. 3, n. 1, p. e2888, 2015.

HIRSCH, C. **Numerical computation of internal and external flows: The fundamentals of computational fluid dynamics**. [S.l.]: Elsevier, 2007.

HJELMFELT, M. R. Microbursts and macrobursts: windstorms and blowdowns. In: **Plant Disturbance Ecology: The Process and the Response**. [S.l.]: Academic Press Burlington, MA, 2010.

IVAN, M. A ring-vortex downburst model for flight simulations. **Journal of Aircraft**, v. 23, n. 3, p. 232–236, 1986.

JOHNS, R. H.; III, C. A. D. Severe local storms forecasting. **Weather and Forecasting**, v. 7, n. 4, p. 588–612, 1992.

KONZEN, D. A. R. J. E. S. F. S. de Azevedo; Leonardo F. Guidi; Pedro H. de A. **Calculo Numérico**. [S.l.]: GitHub, 2019.

LAMBERT, S. J. The effect of enhanced greenhouse warming on winter cyclone frequencies and strengths. **Journal of Climate**, v. 8, n. 5, p. 1447–1452, 1995.

LIMA, E. G. de; LOREDO-SOUZA, A. M. Analysis of the downbursts occurrence in brazil. **Ciência e Natura**, v. 37, p. 32–38, 2015.

LOPEZ, D. P. P. Simulação computacional de cfd de um pequeno trocador de calor de casco e tubo. 2017.

LOREDO-SOUZA, A. M. et al. Downburst related damages in brazilian buildings: Are they avoidable? **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, Elsevier, v. 185, p. 33–40, 2019.

LUNDGREN, T.; YAO, J.; MANSOUR, N. Microburst modelling and scaling. **Journal of fluid mechanics**, Cambridge University Press, v. 239, p. 461–488, 1992.

ONU. **Relatório da ONU alerta para aumento dramático das perdas econômicas provocadas por desastres**. 2018. Acessado em 08 out 2019. Disponível em: <<https://bit.ly/36WM2Xe>>.

PIOMELLI, U.; BALARAS, E. Wall-layer models for large-eddy simulations. **Annual review of fluid mechanics**, Annual Reviews 4139 El Camino Way, PO Box 10139, Palo Alto, CA 94303-0139, USA, v. 34, n. 1, p. 349–374, 2002.

PROCTOR, F. Numerical simulation of precipitation induced downbursts. 1985.

PROCTOR, F. H. Numerical simulations of an isolated microburst. part i: Dynamics and structure. **Journal of the atmospheric sciences**, v. 45, n. 21, p. 3137–3160, 1988.

REZENDE, A. L. T. Análise numérica da bolha de separação do escoamento turbulento sobre placa plana fina inclinada. 2009.

SAYMA, A. **Computational fluid dynamics**. [S.l.]: Bookboon, 2009.

UNIVERSIDADE DE TORONTO. **Global warming won't mean more storms: Big storms to get bigger, small storms to shrink, experts predict**. 2015. Disponível em: <<https://www.sciencedaily.com/releases/2015/01/150129143040.htm>>. Acesso em: 24 set. 2019.

VEJA, A. **Brasil perdeu cerca de 15,7 bilhões de dólares para cobrir gastos após tragédias naturais**. 2018. Acessado em 08 out 2019. Disponível em: <<https://veja.abril.com.br/economia/onu-alerta-que-desastres-climaticos-custaram-us-2-trilhoes-ao-mundo/>>.

WENDT, J. F. **Computational fluid dynamics: an introduction**. [S.l.]: Springer Science & Business Media, 2008.

YAO, J.; LUNDGREN, T. Experimental investigation of microbursts. **Experiments in Fluids**, Springer, v. 21, n. 1, p. 17–25, 1996.

ZHANG, Y.; HU, H.; SARKAR, P. P. Modeling of microburst outflows using impinging jet and cooling source approaches and their comparison. **Engineering Structures**, Elsevier, v. 56, p. 779–793, 2013.

Apêndice A – blockMeshDict

```
/*-----*- C++ -*-----*\
|=====  
| \\ / F i e l d | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox |  
| \\ / O p e r a t i o n | Version: 9 |  
| \\ / A n d | Web: www.OpenFOAM.org |  
| \\ / M a n i p u l a t i o n |  
|-----*\
FoamFile
{
    version      2.0;
    format       ascii;
    class        dictionary;
    object       blockMeshDict;
}
// * * * * * //

theta 1.5;
angle #calc "degToRad($theta)";

xMin #calc "0.0034*cos($angle)";
xMax #calc "0.2*cos($angle)";
yMin #calc "0.0034*sin($angle)";
yMinn #calc "-0.0034*sin($angle)";
yMaxp #calc "0.2*sin($angle)";
yMaxn #calc "-0.2*sin($angle)";

convertToMeters 1;
vertices
(
    (0 0 0) // 0
    ($xMin $yMinn 0) // 1
    ($xMax $yMaxn 0) // 2
    ($xMax $yMaxn 0.1) // 3
    ($xMin $yMinn 0.1) // 4
    (0 0 0.1) // 5
    ($xMin $yMinp 0) // 6
    ($xMax $yMaxp 0) // 7
    ($xMax $yMaxp 0.1) // 8
    ($xMin $yMinp 0.1) // 9
);
blocks
(
    hex (1 4 9 6 0 5 5 0) (200 1 25) simpleGrading (20 1 1) // z y x
    hex (2 3 8 7 1 4 9 6) (200 1 250) simpleGrading (20 1 0.25) // z y x
);
edges
(
    arc 4 9 (0.0034 0 0.1)
    arc 1 6 (0.0034 0 0)
);
boundary
(
    top
    {
```

```
    type patch;
    faces
    (
      (4 9 8 3)
    );
  }
  bottom
  {
    type wall;
    faces
    (
      (1 2 7 6)
      (0 1 6 0)
    );
  }
  walls
  {
    type wall;
    faces
    (
      (2 3 8 7)
    );
  }
  front
  {
    type wedge;
    faces
    (
      (0 6 9 5)
      (6 7 8 9)
    );
  }
  back
  {
    type wedge;
    faces
    (
      (0 5 4 1)
      (1 4 3 2)
    );
  }

  axis
  {
    type empty;
    faces
    (
      (0 5 5 0)
    );
  }

  inlet
  {
```

```
    type patch;
    faces
    (
      (5 9 4 5)
    );
  }
);
mergePatchPairs
(
);
// ***** //
```

Apêndice B – U

```
/*-----*- C++ -*-----*\
=====
\\      / F ield      | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox
\\      / O peration  | Website:  https://openfoam.org
\\      / A nd        | Version:  9
\\      / M anipulation |
-----*/
FoamFile
{
    version      2.0;
    format       ascii;
    class        volVectorField;
    object       U;
}
// *****

dimensions      [0 1 -1 0 0 0];

internalField   uniform (0 0 0);

boundaryField
{
    inlet
    {
        type          fixedValue;
        value          uniform (0 0 -1.18);
    }
    top
    {
        type          pressureInletOutletVelocity;
        value          uniform (0 0 0);
    }
    walls
    {
        type          fixedValue;
        value          uniform (0 0 0);
    }
    bottom
    {
        type          fixedValue;
        value          uniform (0 0 0);
    }
    front
    {
        type          wedge;
    }
    back
    {
        type          wedge;
    }
}
```

Apêndice C – setFieldsDict

```
/*-----*- C++ -*-----*\
|=====  
|  \ \ /  F i e l d      | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox  
|  \ \ /  O p e r a t i o n | Version: 9  
|  \ \ /  A n d           | Web:      www.OpenFOAM.org  
|  \ \ /  M a n i p u l a t i o n |  
/*-----*- C++ -*-----*\
FoamFile
{
    version      2.0;
    format       ascii;
    class        dictionary;
    location     "system";
    object       setFieldsDict;
}
// * * * * * //

defaultFieldValues
(
    volScalarFieldValue alpha.water 0//somente o fluido de menor densidade
dentro do domínio
);

// ***** //
```

Apêndice D – turbulenceProperties

```
/*-----*- C++ -*-----*\
=====
  \ \ / / F i e l d      | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox
  \ \ / / O p e r a t i o n | Website:  https://openfoam.org
  \ \ / / A n d           | Version:  9
   \ \ / / M a n i p u l a t i o n |
/*-----*- C++ -*-----*\
FoamFile
{
  version      2.0;
  format       ascii;
  class        dictionary;
  location     "constant";
  object       turbulenceProperties;
}
// *****

simulationType LES;

LES
{
  LESModel      kEqn;

  turbulence     on;

  printCoeffs   on;

  delta         smooth;

  cubeRootVolCoeffs
  {
    deltaCoeff   1;
  }

  PrandtlCoeffs
  {
    delta         cubeRootVol;
    cubeRootVolCoeffs
    {
      deltaCoeff   1;
    }

    smoothCoeffs
    {
      delta         cubeRootVol;
      cubeRootVolCoeffs
      {
        deltaCoeff   1;
      }

      maxDeltaRatio  1.1;
    }

    Cdelta        0.158;
  }
}
```

Apêndice E – transportProperties

```
/*-----*- C++ -*-----*\
=====
\\      / F ield      | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox
\\      / O peration  | Website:  https://openfoam.org
\\      / A nd        | Version:   9
  \\    / M anipulation |
/*-----*- C++ -*-----*/

FoamFile
{
    version      2.0;
    format       ascii;
    class        dictionary;
    location     "constant";
    object       transportProperties;
}
// *****

phases (water air); // air = variável contendo a correta densidade da água

water
{
    transportModel Newtonian;
    nu              nu [ 0 2 -1 0 0 0 0 ] 1e-06;
    rho             rho [ 1 -3 0 0 0 0 0 ] 1100;
}

air
{
    transportModel Newtonian;
    nu              nu [ 0 2 -1 0 0 0 0 ] 1e-06;
    rho             rho [ 1 -3 0 0 0 0 0 ] 1000;
}

sigma            0;

// *****
```


Apêndice F – controlDict

```
/*-----*- C++ -*-----*\
=====
\\  / F i e l d      | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox
\\  / O p e r a t i o n | Website:  https://openfoam.org
\\  / A n d           | Version:  7
\\  / M a n i p u l a t i o n |
/*-----*/
FoamFile
{
    version      2.0;
    format       ascii;
    class        dictionary;
    location     "system";
    object       controlDict;
}
// * * * * * //

application    interFoam;

startFrom      latestTime;

startTime      0;

stopAt         endTime;

endTime        15;

deltaT         2e-07;

writeControl   adjustableRunTime;

writeInterval  1e-02;

purgeWrite     0;

writeFormat    binary;

writePrecision 8;

writeCompression off;

timeFormat     general;

timePrecision  6;

runTimeModifiable yes;

adjustTimeStep yes;

maxCo          1;
maxAlphaCo     0.5;

maxDeltaT      1e-04;
```

```

functions
{
    /*
    #include "probes_radial_0.4cm"
    #include "probes_radial_2.2cm"
    #include "probes_radial_2.5cm"
    #include "probes_radial_3.3cm"
    #include "probes_vertical_2cm"
    #include "probes_vertical_4.1cm"
    #include "probes_vertical_6.9cm"
    */

    // #include "residuals"

    fieldAverage1
    {
        type            fieldAverage;
        functionObjectLibs ( "libfieldFunctionObjects.so" );
        enabled         true;
        writeControl    writeTime;

        fields
        (
            U
            {
                mean         on;
                prime2Mean   on;
                base         time;
            }

            p
            {
                mean         on;
                prime2Mean   on;
                base         time;
            }
        )
    };
}

minMax1
{
    functionObjectLibs ( "libfieldFunctionObjects.so" );
    type            fieldMinMax;
    mode            component;
    fields          (U);
    outputControl   outputTime;
}

minMax2
{

```

```

functionObjectLibs ( "libfieldFunctionObjects.so" );
type      fieldMinMax;
mode      magnitude;
fields    (U);
outputControl  outputTime;
}

/*wallShearStress1
{
type      wallShearStress;
libs      ("libfieldFunctionObjects.so");
enabled   true;
writeControl  writeTime;
patches   (bottom);
}*/

/*
//wallHeatTransferCoeff1
//{{
//type      wallHeatTransferCoeff;
//libs      ("libfieldFunctionObjects.so");
//enabled   true;
//outputControl  outputTime;
//patches   (".*Wall");
//}}

wallHeatFlux1
{
type      wallHeatFlux;
libs      ("libfieldFunctionObjects.so");
enabled   true;
outputControl  outputTime;
patches   (".*Wall");
}

*/

yPlus1
{
type      yPlus;
libs      ("libfieldFunctionObjects.so");
enabled   true;
writeControl  writeTime;
}

/*Tdiff
{
type      subtract;
libs      ("libfieldFunctionObjects.so");
enabled   true;
outputControl  outputTime;
fields     (T Tmean);
result     Tdiff;
executeControl  writeTime;
writeControl  writeTime;
}

```

```
 */
turbulenceIntensity
{
    type          turbulenceIntensity;
    libs          ("libfieldFunctionObjects.so");
    enabled       true;
    writeControl   writeTime;
}

CourantNo1
{
    type          CourantNo;
    libs          ("libfieldFunctionObjects.so");
    enabled       true;
    writeControl   writeTime;
}

}

// ***** //
```

Apêndice G – fvSchemes

```
/*-----*- C++ -*-----*\
|=====  
|  \ \ /  F i e l d      | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox |  
|  \ \ /  O peration   | Version: 9 |  
|  \ \ /  A nd         | Web:      www.OpenFOAM.org |  
|  \ \ /  M anipulation |  
|-----*\
FoamFile
{
    version      2.0;
    format       ascii;
    class        dictionary;
    location     "system";
    object       fvSchemes;
}
// *****

ddtSchemes
{
    default      Euler;
}

gradSchemes
{
    default      Gauss linear;
}

divSchemes
{
    div(rhoPhi,U)  Gauss linear;
    div(phi,alpha) Gauss vanLeer;
    div(phirb,alpha) Gauss linear;
    div(phi,k)     Gauss limitedLinear 1;
    div(phi,B)     Gauss limitedLinear 1;
    div(B)         Gauss linear;
    div(phi,nuTilda) Gauss limitedLinear 1;
    div(((rho*nuEff)*dev2(T(grad(U))))) Gauss linear;
}

laplacianSchemes
{
    default      Gauss linear corrected;
}

interpolationSchemes
{
    default      linear;
}

snGradSchemes
{
    default      corrected;
}
```

Apêndice H – fvSolution

```
/*-----*- C++ -*-----*\
|=====  
|  \ \ /  /  F i e l d      | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox |  
|  \ \ /  /  O p e r a t i o n | Version: 9 |  
|  \ \ /  /  A n d | Web:      www.OpenFOAM.org |  
|  \ \ /  /  M a n i p u l a t i o n |  
|-----*\
FoamFile
{
    version      2.0;
    format       ascii;
    class        dictionary;
    location     "system";
    object       fvSolution;
}
// *****

solvers
{
    alpha.water
    {
        nAlphaCorr      1;
        nAlphaSubCycles 4;
        cAlpha          2;
    }
    "pcorr.*"
    {
        solver          PCG;
        preconditioner
        {
            preconditioner  GAMG;
            tolerance       1e-05;
            relTol          0;
            smoother        DICGaussSeidel;
        }
        tolerance       1e-05;
        relTol          0;
        maxIter         100;
    }
    p_rgh
    {
        solver          GAMG;
        tolerance       1e-07;
        relTol          0.01;
        smoother        DIC;
    }
    p_rghFinal
    {
        solver          PCG;
        preconditioner
        {
            preconditioner  GAMG;
            tolerance       1e-07;
            relTol          0;
        }
    }
}
```

```

        nVcycles      2;
        smoother      DICGaussSeidel;
        nPreSweeps    2;
    }
    tolerance      1e-07;
    relTol         0;
    maxIter        100;
}

"(U|k)"
{
    solver          smoothSolver;
    smoother        GaussSeidel;
    tolerance       1e-06;
    relTol          0.1;
    nSweeps         1;
}

"(U|k)Final"
{
    solver          smoothSolver;
    smoother        symGaussSeidel;
    tolerance       1e-08;
    relTol          0;
}
}

PIMPLE
{
    momentumPredictor no;
    nCorrectors      2;
    nNonOrthogonalCorrectors 1;
}
// ***** //

```

Apêndice I – Resultados Obtidos em Experimento Laboratorial

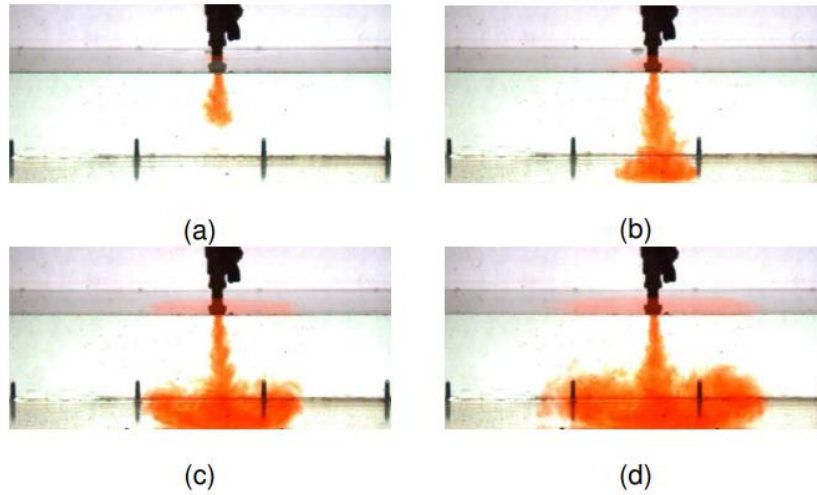


Figura 1.4: Técnica com Tinta em a) $t=0.25s$, b) $t=1.5s$, c) $t=3.75s$ e d) $t=6.5s$

Fonte: Demarco et al. (2013).