

LUCAS DE SOUZA MEIRA

**ANÁLISE DA FORMAÇÃO DE AEROSSÓIS DE JATO LÍQUIDO EM
ESCOAMENTO CRUZADO**



Universidade Federal de Uberlândia

Faculdade de Engenharia Mecânica

Uberlândia - MG, 2018

LUCAS DE SOUZA MEIRA

**ANÁLISE DA FORMAÇÃO DE AEROSSÓIS DE JATO LÍQUIDO EM
ESCOAMENTO CRUZADO**

Projeto de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Aeronáutica da Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Aeronáutica.

Área de Concentração: Mecânica de Fluidos e Transferência de Calor.

Orientador: Prof. Dr. Francisco José de Souza

Universidade Federal de Uberlândia
Faculdade de Engenharia Mecânica
Uberlândia - MG, 2018

(Página intencionalmente deixada em branco)

**ANÁLISE DA FORMAÇÃO DE AEROSSÓIS DE JATO LÍQUIDO EM
ESCOAMENTO CRUZADO**

Projeto de Conclusão de Curso aprovado para a
obtenção do título de Bacharel em Engenharia
Aeronáutica na Faculdade de Engenharia Mecânica
da Universidade Federal de Uberlândia (MG) pela
banca examinadora, formada por:

Uberlândia, 12 de julho de 2018.

MSc. Diego Nei Venturi, UFU - MG

MSc. Douglas Hector Fontes, UFU - MG

Prof. Dr. Francisco José de Souza, UFU - MG

A meus pais Sebastião e Maria Albertina, a meu irmão.

Meu avô Olavo (in memoriam), dedico.

AGRADECIMENTOS

O caminho até aqui alcançado contou com a contribuição direta e indireta de pessoas a quem devo profundo agradecimento.

Agradeço aos meus heróis favoritos – meus pais – pelo apoio em todos os momentos e em todas as escolhas da minha vida. À minha mãe pelas sábias palavras e sensibilidade a qual me ensinou a ver o mundo. Ao meu pai pelo exemplo de força, garra e persistência, de onde sempre tiro inspirações para poder lutar. A meu irmão pela ligação e amizade a quem devo eterna gratidão. À minha família pela fé em mim depositada e, em especial, agradeço ao meu avô Olavo (*in memorian*) pela referência maravilhosa de ser humano que levarei para o resto da minha vida, juntamente com a saudade.

Agradeço muito aos meus amigos, aos antigos e aos recentes, pelo companheirismo e amizade em todos os momentos. Agradeço aos meus colegas da Universidade Federal de Uberlândia, especialmente aos da 7ª turma do curso de Engenharia Aeronáutica, pela união e alegria compartilhadas.

Agradeço à Equipe Tucano Aerodesign, em especial à Classe Micro de 2014, 2015 e 2016, por possibilitar meu desenvolvimento pessoal e profissional e por ser berço da minha criatividade.

Agradeço aos colegas e profissionais do MFLab pela troca de conhecimento até mesmo durante as pausas para o café da tarde. Agradeço ao grupo de pesquisa do Prof. Dr. Francisco (Diego, Douglas, Lívio e Vitor) por me ensinarem a fazer ciência e pela descontração até mesmo nos cenários mais complexos. Ao CNPq e à Petrobrás pelos fomentos à pesquisa.

A meus eternos mestres, professores(as), não somente pelo conhecimento e experiência transmitidos, mas também pela paciência. Pilares nos quais pude me apoiar e enxergar mais longe.

Por fim, percebo que nenhum destes agradecimentos às pessoas que fizeram/fazem parte da minha vida seria possível sem a guia de Deus, a quem agradeço todos os dias pela vida e amor. Muito obrigado!

Dann sprach Gott: “Ein Gewölbe entstehe mitten im Wasser und scheidet Wasser von Wasser”.

Heilige Bibel – Das Buch Genesis 1:6.

RESUMO

A necessidade de compreensão de fenômenos fluidodinâmicos em escoamentos bifásicos, como a quebra secundária de jatos líquidos em gotículas, tem mostrado a constante adoção de ferramentas de Fluidodinâmica Computacional (CFD) em pesquisas científicas e projetos de engenharia. Tal realidade eleva as técnicas computacionais à classe de ferramentas preditoras de causas e efeitos, tornando a abordagem experimental um método de comprovação e validação de modelos matemáticos e numéricos. Com base no exposto acima, o presente trabalho visa analisar a capacidade e robustez do método de Analogia de Taylor para Quebra (TAB) em prever características de aerossóis na condição de jatos cruzados em regime subsônico – situação em que uma coluna de jato líquido é injetada perpendicularmente a um escoamento gasoso desenvolvido. Primeiramente foi realizada uma busca por fontes de dados experimentais dentro do escopo do trabalho para possível comparação e validação. Como solucionador numérico foi adotado o UNSCYFL 3D (*Unsteady Cyclone Flow 3D*) – ferramenta desenvolvida no Laboratório de Mecânica de Fluidos (MFLab). Por fim, os resultados preliminares são apresentados e comparados com dados provenientes de técnicas modernas de medição, como PDPA (*Phase Doppler Particle Analyzer*).

Palavras-chave: CFD, escoamentos bifásicos, TAB, gotas, jato cruzado, quebra secundária.

ABSTRACT

The understanding need of multiphase flow phenomena, as example of liquid jet breakup into droplets, has shown a constant adoption of Computational Fluid Dynamics (CFD) tools. Currently, CFD has been used widely in scientific research and engineering design optimization. This reality place the computational techniques to the tool class of cause and effect prediction. On the other hand, experimental setups are used to test and validate numerical and mathematical models. Based on this premise, the present work aims analyzing the capability and robustness of Taylor Analogy Breakup (TAB) model to predict spray formation and its properties in subsonic crossflow setting – condition where a liquid jet column are injected traversing a developed airstream. In the first step, a search of experimental data related to crossflow setting was realized to comparison and validation of simulated cases. UNSCYFL 3D (Unsteady Cyclone Flow 3D) was used in numerical simulations. This software has been developed in Fluid Mechanics Laboratory (MFLab). In the last step of this work, the preliminary results are presented and plotted in comparison with Phase Doppler Particle Analyzer (PDPA) data.

Keywords: CFD, multiphase flow, TAB, drops, crossflow, secondary breakup.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Espectro do diâmetro de partículas em várias aplicações.....	16
Figura 2- Subdivisão da região de ruptura.	18
Figura 3- Tipos de quebra de jatos líquidos (a) Rayleigh, (b) first wind induzida, (c) second wind induzida e (d) regime de atomização.	19
Figura 4- Diagrama de Ohnesorge: regime de quebra de jatos.	20
Figura 5- Processo de quebra de um jato líquido em um escoamento cruzado.....	21
Figura 6- Decrescimento dos comprimentos de onda da coluna (λ_c) e da superfície (λ_s) em função do número de Weber.....	22
Figura 7- Detalhes da malha em cortes (a) $x=0$, (b) detalhe em $z=0$ e (c) $z=0$	23
Figura 8- Mapa de fragmentação das simulações de Arienti e Soteriou (2007).....	23
Figura 9- Esquema do aparato experimental de Deepe (2006).	24
Figura 10- Detalhes do bico injetor e da seção de testes.	25
Figura 11- Esquema da analogia do método TAB.	28
Figura 12- Malhas utilizadas nas simulações de escoamentos cruzados.....	29
Figura 13- Malha utilizada nas simulações, (a) vista em perspectiva; (b) vista do plano yz; (c) detalhe do injetor.....	32
Figura 14- Mapa de regime de quebra para os casos simulados.	35
Figura 15- Fração volumétrica (α) e formação de gotas para o caso 1.	36
Figura 16- Fração volumétrica (α) e formação de gotas para o caso 2.....	36
Figura 17- Campos de velocidade média v e w e produto vw do (a) caso 1 e (b) caso 2.....	37
Figura 18- Linhas de corrente e vórtices tridimensionais.....	38
Figura 19- Fração mássica normalizada para os casos (a) 1 e (b) 2.	38
Figura 20- Perfil de velocidade das gotas para os casos (a) 1 e (b) 2.....	39
Figura 21- Malha em meio domínio, (a) vista em perspectiva; (b) vista em X; (c) detalhe do injetor.....	40
Figura 22- Fração volumétrica (α) e formação de gotas para o caso 1 em meio domínio..	40
Figura 23- Fração volumétrica (α) e formação de gotas para o caso 2 em meio domínio.	41
Figura 24- Comparação da fração mássica para os casos (a) 1 e (b) 2 e meios domínios.....	41
Figura 25- Comparação dos perfis de velocidade para os casos (a) 1 e (b) 2 e meios domínios.	42

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Lista de casos ensaiados por Deepe (2006).....	25
Tabela 2- Propriedades de entrada nas simulações.	33
Tabela 3- Fatores de sub-relaxação utilizados.....	33
Tabela 4- Adimensionais calculados dos casos 1 e 2.	34

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CFD	<i>Computational Fluid Dynamics</i>
DES	<i>Detached Eddy Simulation</i>
ECT	Energia Cinética Turbulenta
LDI	<i>Lean Direct Injection</i>
MFLab	Laboratório de Mecânica de Fluidos
PDPA	<i>Phase Doppler Particle Analyzer</i>
RSM	<i>Reynolds Stress Model</i>
SIMPLE	<i>Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations</i>
SST	<i>Shear Stress Tensor</i>
TAB	<i>Taylor Analogy Breakup</i>
UNSCYFL 3D	<i>Unsteady Cyclone Flow 3D</i>
VOF	<i>Volume of Fluid</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

d	Diâmetro
f	Frequência
F	Força
g	Vetor do campo gravitacional
J	Razão de quantidade de movimento
m	Massa
Re	Número de Reynolds
t	Tempo
u, v, w	Componentes de velocidade
V	Vetor velocidade
We	Número de Weber
x, y, z	Componentes de posição
y, \dot{y}, \ddot{y}	Posição, velocidade e aceleração
Z	Número de Ohnesorge

Símbolos Gregos

α	Razão volumétrica
ε	Razão de dissipação da ECT
k	Energia cinética turbulenta
λ	Comprimento de onda
μ	Viscosidade dinâmica molecular
ν	Viscosidade cinemática
ρ	Massa específica

σ	Tensão superficial
ϕ	Variável transportada
∞	Escoamento livre

Subscritos

<i>air</i>	Fase gasosa ou ar
<i>c</i>	Coluna
<i>d</i>	Relativo à gota
<i>g</i>	Relativo ao gás
<i>i, j, k</i>	Índices de versores cartesianos
<i>L</i>	Célula esquerda
<i>liq</i>	Fase líquida
<i>rel</i>	Valor relativo
<i>s</i>	Superfície
<i>st</i>	Tensão superficial

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	15
1.1. Objetivos	17
2. ESTUDOS PRELIMINARES	18
3. MODELO FÍSICO	24
4. MODELAGEM MATEMÁTICA	26
4.1. Equações de Balanço	26
4.1.1. Equações de Navier-Stokes	26
4.1.2. Equações do Movimento	26
4.1.3. Método VOF	27
4.2. Método TAB	28
5. MODELAGEM NUMÉRICA	29
5.1. Métodos Numéricos	29
5.2. Malha Numérica	31
5.3. Configurações (<i>Setup</i>)	32
6. RESULTADOS E ANÁLISES	34
6.1. Abordagem Simétrica	39
7. CONCLUSÕES	43
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	44
9. APÊNDICE	46

1. INTRODUÇÃO

Ao longo das últimas décadas, as ferramentas de Fluidodinâmica Computacional (CFD) têm desempenhado um papel importante no cenário da pesquisa científica e na otimização de novos projetos de engenharia. O desenvolvimento de produtos de alto desempenho e eficiência é consequência do uso destas ferramentas numéricas, uma vez que elas têm a vantagem de simular volumes controlados com boa representatividade do problema físico. Baseado nisso, o CFD é adotado com o objetivo de reduzir os custos e o tempo de desenvolvimento de projetos, pois evita a utilização da complexa e onerosa abordagem experimental.

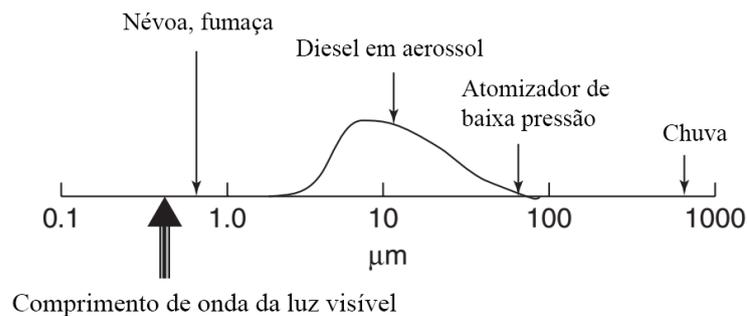
Atualmente, os requisitos da engenharia contemporânea têm exigido do CFD mais funcionalidades e modularização de problemas de multifísica, por exemplo: cálculo da interação fluido-estrutura de corpos imersos em escoamentos ou, como tratado neste trabalho, o cálculo do comportamento de partículas fluidas em escoamentos multifásicos.

Os escoamentos multifásicos são aqueles que apresentam duas ou mais fases (sólida, líquida e/ou gasosa) em um mesmo domínio de análise. Os casos aqui descritos tratam de fases particuladas, especificamente de gotas, imersas em um meio gasoso. Segundo Clift, et. al. (1978), uma maneira satisfatória de distinguir o conceito de partículas, sejam sólidas sejam fluidas, em relação ao conceito do termo “partícula” relativo à Física Nuclear, é impor que as partículas são corpos imersos em um meio contínuo cujas dimensões estejam entre 0,5 μm e 10 cm e possuam uma interface definida. O material constituinte da partícula é denominado fase dispersa, enquanto o meio que a circunda é chamado de meio contínuo. Para tanto, tem-se que as simulações computacionais de escoamentos multifásicos se mostram mais trabalhosas do que os regimes monofásicos, devido ao fato de que as propriedades de massa específica, viscosidade, tensão superficial (no caso de interfaces líquido/gás) e constituição química sofrem mudanças adotadas como discretas em uma dada célula do domínio. Além disso, a fase dispersa (gotas, gotículas, bolhas ou partículas sólidas) influencia o escoamento no meio contínuo (escoamento ou atmosfera imposta) e vice-versa.

Dentro do campo dos aerossóis, diversos fenômenos naturais ou processos de atividades humanas têm relação direta com o controle das propriedades da fase dispersa, como exemplificado na Figura 1. A precipitação atmosférica em forma de chuva e a formação de

névoa/neblina, são situações distintas em que a natureza do evento é determinada pelas dimensões e distribuição das gotículas de água dispersas no ar. Já nos processos industriais, as dimensões das gotículas são fatores que aceleram ou retardam a eficiência de um dado processo. Como exposto por Sousa e Oliveira (2010), o processo de atomização de uma simples gota esférica de 2 mm de diâmetro em gotículas com tamanho de 10 μm , aumenta a taxa de evaporação do líquido por um fator de 200, devido ao aumento drástico na superfície de contato da interface líquido/gás. Tal aumento é a característica desejável para acelerar o processo de atomização de combustíveis em motores com sistemas de injeção direta LDI (*Lean Direct Injection*); diversos trabalhos realizados nesta área, como os de Tanner (1999) e Reitz (2004) procuram aliar técnicas numéricas à predição de condições ideais de funcionamento. No entanto, os casos tratados por estes autores envolvem atmosferas quiescentes.

Figura 1- Espectro do diâmetro de partículas em várias aplicações.



Fonte: Adaptado de Reitz, Pickett e Trujillo (2014).

A importância do tema para a engenharia dá-se pela presença do fenômeno em diversas áreas. Estudos experimentais apresentados por Inamura e Nagai (1997), por exemplo, têm o propósito de analisar o regime de funcionamento de pós-queimadores em motores aeronáuticos. Já os estudos de Deepe (2006) procuram ensaiar as condições de operação de sistemas de injeção direta (LDI).

O campo científico de estudos em aerossóis é bastante vasto e envolve fluidos em diferentes condições, finalidades e propriedades. Sistemas de injeção de combustíveis de motores diesel ou carburados, bicos injetores de motores aeronáuticos/aeroespaciais, sistemas de irrigação, sistemas de pulverização agrícola, sistemas de tinturaria e tratamentos superficiais, medicamentos aplicados por via respiratória ou cutânea, câmaras de vaporização e processamento químico, etc., dependem exclusivamente das características dos jatos de aerossol. O controle da taxa de vaporização das gotículas, penetração do jato, ângulo de

dispersão, distribuição e tamanho de gotas são parâmetros controláveis cujos valores variam de acordo com a finalidade do aerossol. Por exemplo, enquanto os sistemas de injeção de combustíveis necessitam de taxas de vaporização cada vez mais altas, uma vez que favorecem a homogeneização da mistura e aumento na eficiência da queima, os dispositivos de tinturaria têm a necessidade de gerar jatos com penetração razoável e maior ângulo de dispersão, a fim de promover uma maior área coberta pelo tratamento superficial.

Todas as atividades que envolvam formação aerossóis possuem características distintas quanto às condições impostas pelo meio contínuo, ou seja, as direções e velocidades do escoamento predominantes na fase contínua influenciam diretamente no favorecimento de determinadas propriedades do aerossol formado.

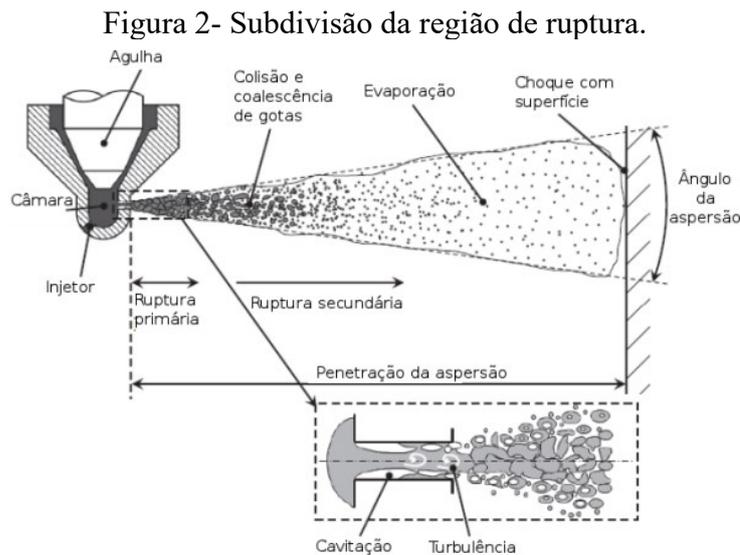
1.1. Objetivos

Os principais objetivos do trabalho consistem em avaliar os métodos de quebra secundária (TAB) para regimes ensaiados e disponíveis na literatura, bem como descrever as técnicas, considerações, simplificações e ajustes para a execução de casos semelhantes.

2. ESTUDOS PRELIMINARES

Embora a previsão de quebra de jatos líquidos seja um anseio antigo da Mecânica de Fluidos, com estudos iniciados por Lord Rayleigh (1878), os avanços no último século tiveram suas atenções voltadas para uma abordagem experimental e a obtenção de correlações e modelos semiempíricos que descrevessem uma gama de regimes de quebras. Atualmente, enquanto algumas linhas de pesquisa destinam seus esforços para a obtenção de resultados de experimentos materiais, outras utilizam as correlações empíricas aliadas a técnicas e ferramentas CFD.

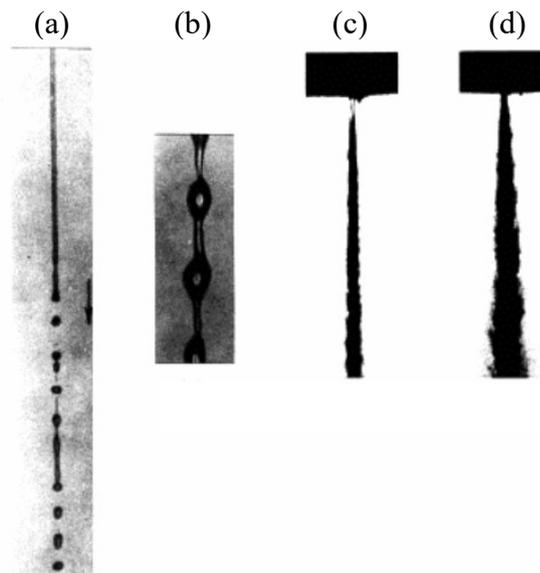
O processo de quebra de um jato líquido pode ser dividido em até três subetapas, sendo elas: cavitação, ruptura primária e ruptura secundária. A geometria do bico injetor pode induzir a um processo de cavitação na fase líquida; nas transições ou afilamentos abruptos no diâmetro do injetor ocorrem níveis de pressão estática abaixo da pressão de vaporização, fazendo com que haja uma mudança de fase local. A quebra primária ocorre quando o volume de líquido se rompe em grandes aglomerados líquidos de geometria irregular (*blobs*); esta etapa pode ser favorecida pelas instabilidades causadas por regimes turbulentos ou pela cavitação. A ruptura secundária ocorre quando os aglomerados líquidos ou gotas de maior diâmetro sofrem sucessivas quebras por efeitos fluidodinâmicos e se transformam em gotículas menores. A Figura 2 mostra as subetapas da região de quebra.



Fonte: Adaptado de Bravo e Kweon (2014).

As primeiras observações de instabilidades em jatos líquidos, deram origem à definição de quatro fenômenos de quebra primária, de acordo com Reitz (1982) – Figura 3. A quebra primária de Rayleigh é caracterizada pelo desprendimento de gotas a partir de diversos diâmetros de distância à jusante do orifício de injeção, em que o diâmetro das gotas formadas é maior que o diâmetro do injetor. A quebra denominada *first wind* induzida ocorre a poucos diâmetros do injetor e gera gotas de diâmetro aproximado ao do orifício de saída. O modo *second wind* induzido apresenta um jato líquido com desintegração próxima da saída e gera gotículas menores que o diâmetro do injetor. O regime de atomização é um modo de quebra catastrófico, onde são geradas gotículas com diâmetros muito menores do que o diâmetro de injeção e a quebra acontece instantaneamente na saída do jato.

Figura 3- Tipos de quebra de jatos líquidos (a) Rayleigh, (b) *first wind* induzida, (c) *second wind* induzida e (d) regime de atomização.



Fonte: Reitz (1982).

Os adimensionais governantes e observados nos fenômenos de quebra de jatos líquidos têm seus nomes em homenagem a seus respectivos pesquisadores. O número de Weber, mostrado na Eq. (1), relaciona as forças inerciais com a tensão superficial da interface líquido-gás. O número de Reynolds, Eq. (2) relaciona as forças inerciais e viscosas do escoamento. Outro importante adimensional é o número de Ohnesorge, Eq. (3), que pode ser obtido relacionando-se o número de Reynolds e o número de Weber de forma a analisar o fenômeno sem a dependência da velocidade. O adimensional de razão de quantidade de movimento é apresentado na Eq. (4).

$$We = \frac{\rho_{air} V_{rel}^2 d_o}{\sigma} \quad (1)$$

$$Re = \frac{\rho |V_{rel}| d}{\mu} \quad (2)$$

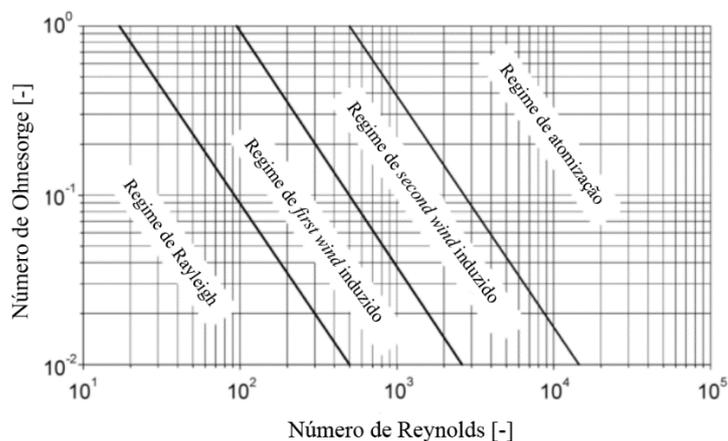
$$Z = \frac{\sqrt{We}}{Re} = \frac{\mu}{\sqrt{\rho \sigma d}} \quad (3)$$

$$J = \frac{\rho_{liq} V_{liq}^2}{\rho_{air} V_{air}^2} \quad (4)$$

Nas equações acima, ρ representa a massa específica do fluido, V é o módulo da velocidade, d é o diâmetro, σ é a tensão superficial estática da interface e μ é a viscosidade dinâmica do fluido.

Muitos autores desenvolveram mapas e diagramas de quebra em função dos adimensionais governantes. Esta abordagem mostra diferentes zonas em que cada regime é predominante. O diagrama de Ohnesorge exposto por Baumgarten (2006) na Figura 4 confronta o número de Ohnesorge e de Reynolds para definir as zonas de predominância de cada fenômeno.

Figura 4- Diagrama de Ohnesorge: regime de quebra de jatos.

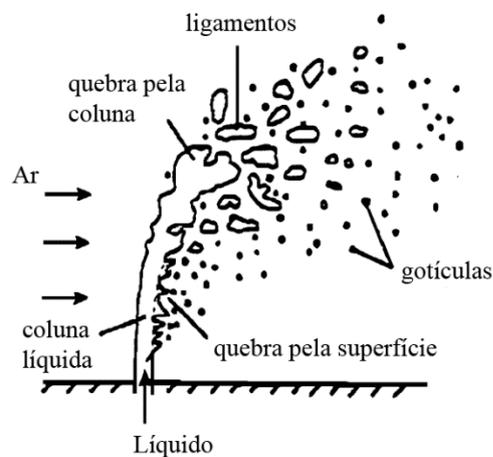


Fonte: Adaptado de Baumgarten (2006).

Uma vez que os primeiros estudos relacionados ao assunto estavam ligados principalmente à análise de jatos líquidos em meios quiescentes (atmosfera estática), surgiu a necessidade de se estudar os escoamentos cruzados. A compreensão inicial do fenômeno é apresentada por Wu et al. (1997a), onde são explicados os processos relacionados à quebra de

jatos líquidos em escoamentos cruzados subsônicos. A Figura 5 mostra um esquema dos processos de interação líquido-gás que ocorrem no escoamento cruzado. Basicamente a coluna líquida sofre uma deflexão enquanto penetra no escoamento gasoso e, por meio das forças de cisalhamento, gotículas se originam da superfície da coluna líquida. Alguns diâmetros de distância, à jusante da injeção, a coluna líquida sofre uma fragmentação em aglomerados líquidos de grande volume que, devido a forças fluidodinâmicas, sofrem quebras secundárias dando origem às gotículas.

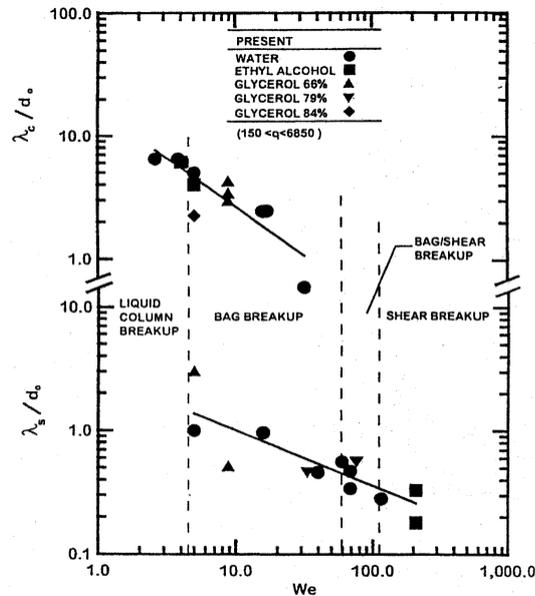
Figura 5- Processo de quebra de um jato líquido em um escoamento cruzado.



Fonte: Adaptado de Wu et al. (1997a).

Resultados experimentais de Mazallon et al. (1999) delimitaram quatro regimes para a quebra de jatos em escoamentos cruzados, sendo eles: quebra da coluna líquida (*liquid column breakup*), quebra em bolsas (*bag breakup*), quebra em bolsa/cisalhamento (*bag/shear breakup*) e quebra por cisalhamento (*shear breakup*). Foi observado que, para baixos números de Weber, as gotículas se originavam principalmente pela quebra da coluna líquida e, para altos números de Weber, as gotículas surgiam da lateral da coluna líquida por efeito de cisalhamento. Além disso, foram calculados os comprimentos das instabilidades na coluna líquida (λ_c) e na superfície líquida (λ_s). Como esperado, os comprimentos de onda na coluna são maiores do que na superfície, o que denota um surgimento de aglomerados líquidos (*blobs*) maiores na quebra da coluna. Foi observado que os comprimentos de onda decrescem com o aumento do número de Weber, o que aponta uma geração de gotículas cada vez menores com aumento deste adimensional. A Figura 6 mostra o diagrama obtido por Mazallon et al. (1999).

Figura 6- Decrescimento dos comprimentos de onda da coluna (λ_c) e da superfície (λ_s) em função do número de Weber.

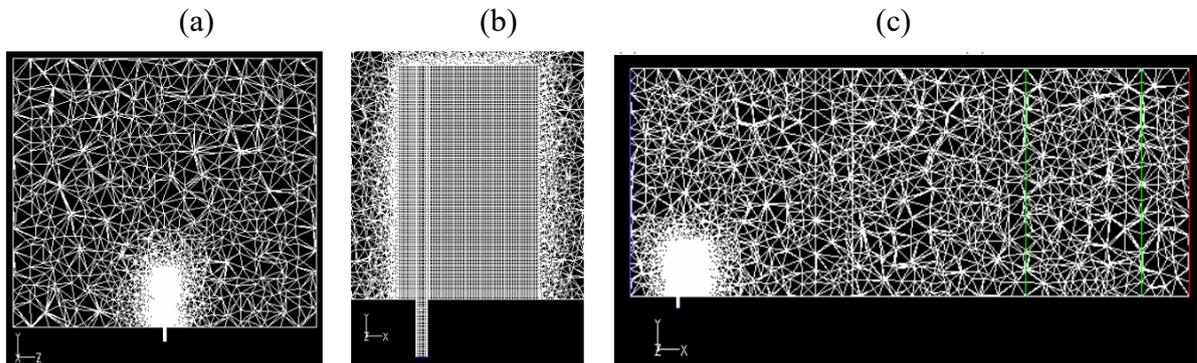


Fonte: Mazallon et al. (1999).

Trabalhos de Geery et al. (1969), Chen et al. (1993), Wu et al. (1997b) e Lin et al. (2002), apresentam correlações que levam em conta a razão de quantidade de movimento como o adimensional responsável pela penetração do jato líquido no escoamento gasoso.

Deepe (2006), em sua tese, descreveu uma série de experimentos cuja finalidade era analisar a influência do número de Weber na modulação de jatos líquidos e obter uma função de transferência que levasse em conta alguns aspectos do experimento. Arienti e Soteriou (2007) procuraram representar estes experimentos numericamente, utilizando o método TAB para quebra secundária e VOF para rastreamento da fase dispersa em uma malha numérica híbrida de 0,52 milhão de elementos. Os resultados são comparados aos dados experimentais de Deepe (2006). A Figura 7 mostra os detalhes da malha utilizada por Arienti e Soteriou (2007).

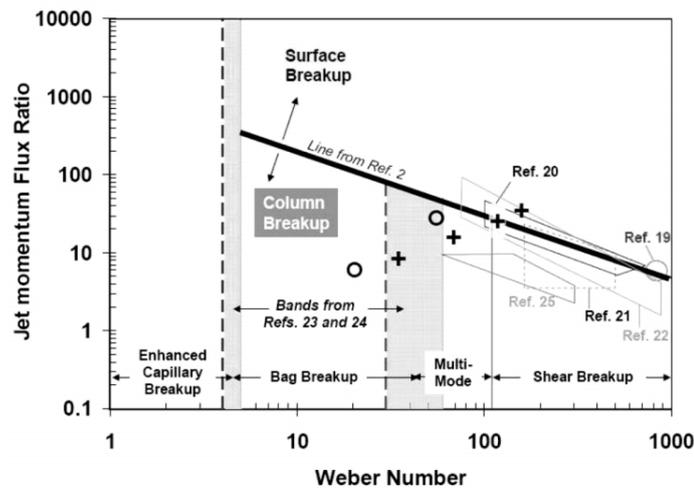
Figura 7- Detalhes da malha em cortes (a) $x=0$, (b) detalhe em $z=0$ e (c) $z=0$.



Fonte: Arienti e Soteriou (2007).

Um mapa de regimes de quebra para os casos simulados em injeção contínua e pulsada é apresentado por Arienti e Soteriou (2007) – Figura 8. Os regimes de quebra são bem definidos e mostram as regiões de predominância levando-se em conta a razão de quantidade de movimento, Eq. (4), e o número de Weber, Eq. (1).

Figura 8- Mapa de fragmentação das simulações de Arienti e Soteriou (2007).

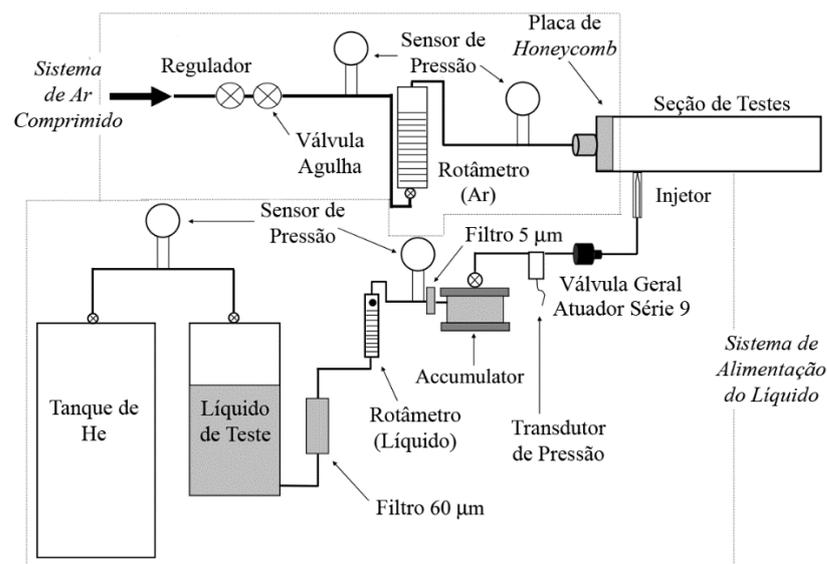


Fonte: Arienti e Soteriou (2007).

3. MODELO FÍSICO

Para a realização de seus experimentos, Deepe (2006) utilizou um aparato experimental relativamente complexo, onde foram empregadas técnicas de medição/tratamento de escoamentos como rotâmetros, transdutores de pressão, filtros de partículas, válvulas e atuadores. O fluxo de ar imposto era alimentado por um sistema de ar comprimido que, antes de chegar à seção de testes, tinha seu escoamento reordenado por uma placa porosa de *honeycomb*. A relaminarização promovida pela placa porosa evitou a propagação de estruturas turbulentas indesejáveis no experimento e garantiu um perfil de velocidade ordenado na seção de testes. O jato líquido era impulsionado por um tanque de hélio e tinha seu fluxo controlado por filtros, acumuladores e válvulas. A Figura 9 mostra o esquema do experimento.

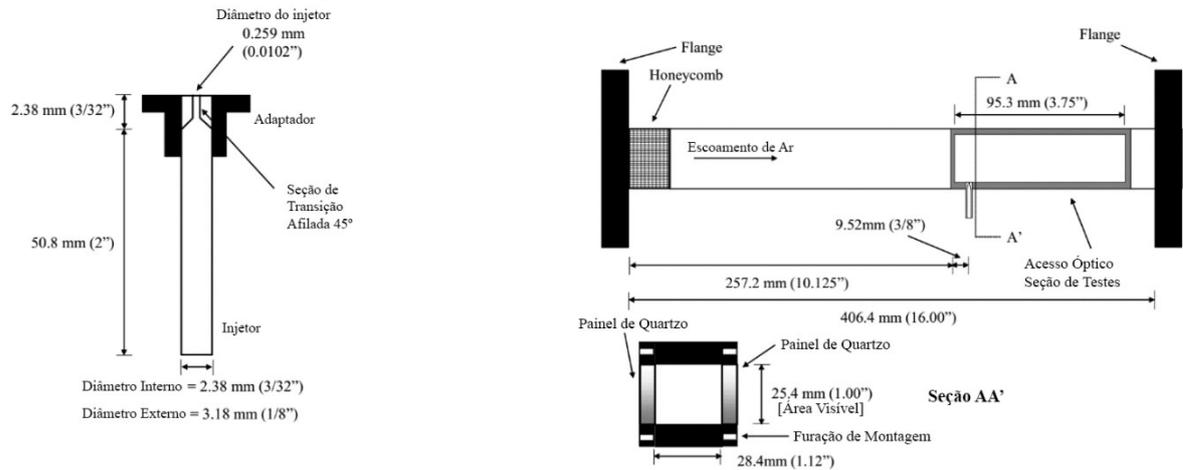
Figura 9- Esquema do aparato experimental de Deepe (2006).



Fonte: Adaptado de Deepe (2006).

O bico de injeção de líquido é mostrado juntamente com a seção de teste, em que, esta última é dotada de paredes transparentes de quartzo para o acesso ótico dos sistemas de medição (PDPA), como mostrado na Figura 10.

Figura 10- Detalhes do bico injetor e da seção de testes.



Fonte: Adaptado de Deepe (2006).

A Tabela 1 mostra as condições e parâmetros dos experimentos realizados por meio da injeção de líquido de forma contínua e pulsada. Os casos 1, 2 e 7 apresentam injeção contínua ($f = 0 \text{ Hz}$) e os demais apresentam frequência de injeção de 50 Hz.

Tabela 1- Lista de casos ensaiados por Deepe (2006).

Caso	Líquido	f [Hz]	u_{∞} [m/s]	v_{liq} [m/s]
1	Água	0	50	4,26
2	Água	0	110	13,3
3	Etanol	50	50	5,64
4	Etanol	50	70	11,2
5	Etanol	50	90	17,6
6	Etanol	50	110	24,9
7	Etanol	0	110	14,9

Fonte: Adaptado de Arienti e Soteriou (2007).

Os casos 1 e 2 são utilizados como base para as simulações numéricas. Por utilizar água e possuir frequência de injeção nula (injeção contínua), opta-se por analisar estes regimes. Além disso, os resultados do UNSCYFL 3D são comparados aos estudos de Arienti e Soteriou (2007).

4. MODELAGEM MATEMÁTICA

Neste capítulo são descritas a modelagem matemática do problema, as equações de balanço, de rastreamento das fases líquida/gasosa, do cálculo da mecânica das partículas e de quebra secundária adotados.

4.1. Equações de Balanço

4.1.1. Equações de Navier-Stokes

O modelo matemático consiste em resolver as equações da continuidade, Eq. (5), e quantidade de movimento, Eq. (6), para fluidos newtonianos em escoamentos incompressíveis. É possível notar que na Eq. (6) há um termo F_{st} , que está relacionado à força de tensão superficial da interface líquido-gás. O termo ρg_i diz respeito à força gravitacional.

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (5)$$

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \mu_t) \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] + F_{st} + \rho g_i \quad (6)$$

Onde x e u são as componentes de posição e velocidade na forma indicial, respectivamente, p é a pressão, μ é a viscosidade dinâmica molecular e μ_t é a viscosidade dinâmica turbulenta, F_{st} é o termo relacionado à tensão superficial da interface líquido-gás, ρ é a massa específica do fluido e g é a aceleração do campo gravitacional.

4.1.2. Equações do Movimento

O cálculo das grandezas físicas (posição, velocidade e aceleração) das partículas é realizado pela integração das equações diferenciais da mecânica clássica. Com a integração da Eq. (7) obtém-se a posição da partícula e a Eq. (8) apresenta o equilíbrio dinâmico da partícula pela segunda lei de Newton, onde as forças aplicadas refletem na aceleração inercial do corpo.

$$\frac{dx_i}{dt} = v_d \quad (7)$$

$$m_d \frac{dv_d}{dt} = \sum F = F_{corpo} + F_{superfície} + F_{colisão} \quad (8)$$

Onde x_i e v_d são as grandezas físicas de posição e velocidade da partícula, m_d é a massa da partícula e F é a resultante de forças atuantes na partícula, sendo, esta última, dividida em forças de corpo (peso e empuxo), forças de superfície (sustentação e arrasto) e a força gerada na colisão entre partículas.

4.1.3. Método VOF

Um método largamente utilizado em cálculos de escoamentos multifásicos foi empregado para computar o volume de líquido ocupado nas células do domínio. O método VOF é adotado para prever a presença de dois fluidos separados por uma interface definida, de acordo com o trabalho de Ubbink (1997). Este método é de fácil implementação, segundo Denner (2013). A propriedade de quantidade de fração volumétrica (α) transportada pelo escoamento pode assumir valores entre 0 (volume ocupado somente pela fase gasosa) e 1 (volume ocupado somente pela fase líquida). A Eq. (9) pondera a fração volumétrica, enquanto a Eq. (10) garante a sua continuidade.

$$\alpha(x_i, t) = \begin{cases} 0 & ; \text{ Fase gasosa.} \\ 1 & ; \text{ Fase líquida.} \end{cases} \quad (9)$$

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \frac{\partial(u_i \alpha)}{\partial x_j} = f_\alpha \quad (10)$$

Nas equações acima, α é a fração volumétrica de líquido no volume analisado, x_i e u_i são os vetores de posição e velocidade na notação indicial, respectivamente e o termo f_α é o termo fonte de transformação da abordagem euleriana para lagrangiana (formação de gotas lagrangianas).

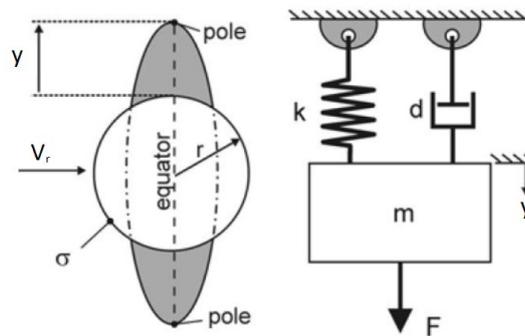
Após a quantificação do transporte da fase líquida em cada célula, a fase dispersa é tratada por uma abordagem lagrangiana, ou seja, o domínio euleriano tem a fase líquida tomada por um sumidouro e o volume de líquido convertido se torna um termo fonte de partículas que,

por sua vez, tem suas grandezas físicas calculadas com base no campo do escoamento do domínio euleriano.

4.2. Método TAB

O método Taylor Analogy Breakup (TAB) é adotado para a predição dos fenômenos de quebra secundária. Este método foi introduzido por O'Rourke e Amsden (1987) e consiste basicamente na analogia da gota à um sistema de massa-mola-amortecedor com forças externas aplicadas – Figura 11. Os termos de restauração e rigidez estão ligados à tensão superficial da interface líquido/gás, o amortecimento se dá pela presença de forças viscosas no fluido e as forças externas estão relacionadas às forças de origem aerodinâmica (sustentação e arrasto) causadas pelo escoamento do meio contínuo.

Figura 11- Esquema da analogia do método TAB.



Fonte: Adaptado de Baumgarten (2006).

A Eq. diferencial (11) descreve matematicamente o método TAB.

$$\ddot{y} + \frac{5\mu_d}{\rho_d r^2} \dot{y} + \frac{8\sigma}{\rho_d r} y = 2\rho_g \|V_r\|^2 3\rho_d^2 \quad (11)$$

Onde os termos de y , \dot{y} e \ddot{y} são respectivamente a posição, velocidade e aceleração da distorção da linha equatorial da gota esférica adimensionalizadas, μ_d e ρ_d são a viscosidade dinâmica e massa específica do fluido que constitui a gota, ρ_g é a massa específica da fase gasosa, V_r é a velocidade relativa entre a gota e o gás, r é o raio da gota e σ é a tensão superficial da interface líquido-gás.

5. MODELAGEM NUMÉRICA

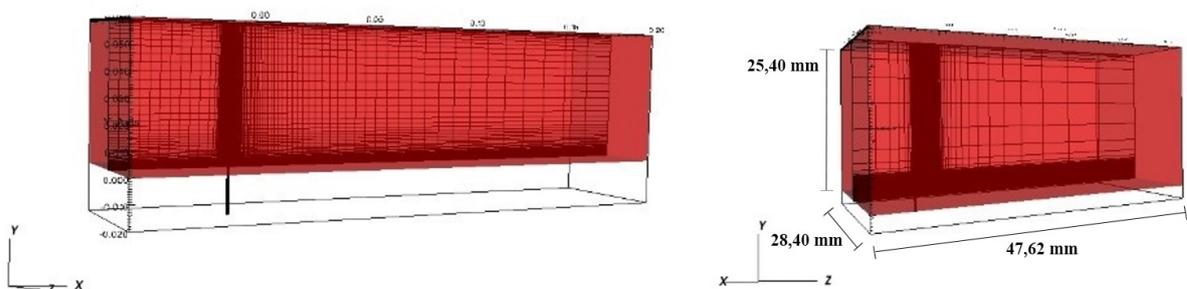
Este capítulo apresentará uma breve descrição da modelagem numérica empregada nos estudos de caso de jatos cruzados. Após a definição do problema, delimitação do modelo físico e modelos numéricos necessários, são apresentados os parâmetros de entrada das simulações numéricas.

5.1. Métodos Numéricos

Para a solução do problema, foi utilizado o programa UNSCYFL 3D – escrito em linguagem FORTRAN 90 e desenvolvido no Laboratório de Mecânica de Fluidos nas dependências da Universidade Federal de Uberlândia. As potencialidades e limitações desta ferramenta foram levadas em conta.

No UNSCYFL 3D, as equações de Navier-Stokes são resolvidas numericamente para regimes incompressíveis através do método de volumes finitos (Ferziger e Peric, 2002). São utilizadas malhas não-estruturadas, cujos elementos podem possuir as formas hexaédrica, tetraédrica, prismática, piramidal e cuneiforme. Na definição dos elementos tridimensionais que compõem o domínio, alguns aspectos devem ser respeitados, como por exemplo a ortogonalidade e o compartilhamento de uma face por apenas dois elementos vizinhos. A Figura 12 mostra um exemplo de malhas utilizadas.

Figura 12- Malhas utilizadas nas simulações de escoamentos cruzados.



Fonte: O autor.

Para a representação da seção de testes utilizada por Deepe (2006), foram desenhadas as porções à montante e à jusante do injetor com base na Fig. 10. A face de saída foi limitada a uma distância de 150 diâmetros à jusante do injetor, uma vez que o UNSCYFL 3D admite um plano de amostragem nesta face.

Para o acoplamento pressão-velocidade, o algoritmo SIMPLE (Ferziger e Peric, 2002) é utilizado. Com o UNSCYFL 3D é possível se resolver regimes permanentes e transientes em geometrias complexas e são disponíveis seis condições de contorno, sendo:

- velocidade imposta (INLET);
- simetria (SYMMETRY);
- escoamento desenvolvido (OUTLET);
- não-deslizamento (WALL);
- pressão imposta (PRESSURE);
- periodicidade (PERIODIC).

Os termos difusivos são discretizados por diferenças centradas de 2ª ordem, para os termos advectivos, o esquema *upwind* de 1ª ordem e o esquema centrado ou o esquema *upwind* de 2ª ordem podem ser combinados. Os modelos de turbulência disponíveis são: Smagorinsky, dinâmico, SST (ou DES-SST), Yakhot, k-ε, RSM e RSM com tratamento de parede melhorado. Para as simulações descritas neste trabalho, foi utilizada a modelagem de turbulência k-ε. As partículas só podem ser injetadas em faces nas quais a condição de contorno de velocidade imposta foi aplicada. Para as partículas são possíveis as seguintes condições de contorno:

- reflexão elástica (REFLECT);
- escape (ESCAPE);
- periodicidade (PERIODIC).

Para o avanço temporal das equações do meio contínuo, os esquemas de Euler implícito (1ª ordem) e de três níveis no tempo (2ª ordem) podem ser empregados, como mostrado nas equações (12) e (13), respectivamente.

$$\left(\frac{\partial \rho \phi}{\partial t}\right)_L = \frac{(\rho_L \phi_L)^{n+1} - (\rho_L \phi_L)^n}{\Delta t} \quad (12)$$

$$\left(\frac{\partial \rho \phi}{\partial t}\right)_L = \frac{3(\rho_L \phi_L)^{n+1} - 4(\rho_L \phi_L)^n + (\rho_L \phi_L)^{n-1}}{2\Delta t} \quad (13)$$

Os termos com índices L dizem respeito às variáveis relativas à célula vizinha esquerda, o índice n é relativo ao instante de tempo analisado e ϕ é a grandeza interpolada nos termos de acúmulo.

As condições de contorno são atribuídas numericamente às faces por meio de elementos fantasmas, os quais coincidem com os centroides das faces dos contornos.

Para a modelagem da fase dispersa, utiliza-se uma formulação lagrangiana, sendo que as equações do movimento de Newton são resolvidas individualmente para cada partícula rastreada no escoamento. Para partículas lagrangianas, as propriedades (como a velocidade) são atualizadas ao longo do caminho de uma partícula individual (ou nuvem de partículas), enquanto que no método euleriano as propriedades da partícula são calculadas como uma média em um volume computacional, o qual normalmente é o mesmo utilizado para o fluido.

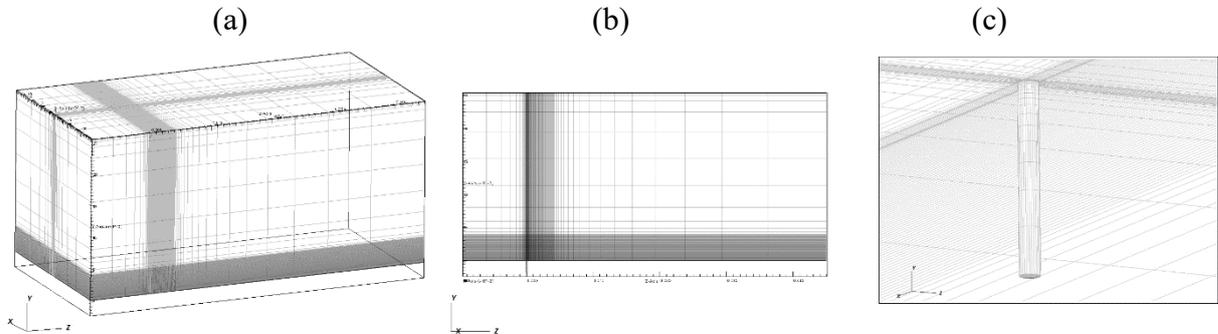
Para o tratamento das forças sobre a superfície, o tratamento da força pontual representa o escoamento sobre a partícula com tratamentos teóricos e empíricos (por exemplo, especificando um coeficiente de arrasto) para obter a força na partícula, enquanto que no tratamento da superfície-resolvida, a dinâmica do fluido (por exemplo, distribuição de pressão) é resolvida sobre toda a superfície da partícula e então integrada para se obter as forças hidrodinâmicas globais. Desta forma, para o tratamento da superfície-resolvida, alta resolução espacial da fase contínua é requerida sobre toda a superfície da partícula. Assim, este método é algumas vezes chamado de “simulação direta”. Por outro lado, a malha utilizada para o escoamento contínuo pode ser grosseira em relação ao tamanho da partícula se o tratamento da força-pontual for utilizado [...]. (SOUZA, 2012, p. 12).

5.2. Malha Numérica

A seção de testes utilizada por Deepe (2006), mostrada na Seção 3, teve suas dimensões introduzidas em uma geometria confeccionada no ANSYS® ICEM CFD™. O método de blocagem foi utilizado para a definição de uma malha numérica hexaédrica não estruturada. Desde o início da confecção da malha, procurou-se aumentar a densidade de elementos nas regiões de saída e deflexão do jato líquido; esta medida foi tomada para que o método VOF e a

transformação Euler-Lagrange pudessem ocorrer sem instabilidades ou divergências. A Figura 13 mostra a malha hexaédrica gerada a partir das dimensões da seção de testes.

Figura 13- Malha utilizada nas simulações, (a) vista em perspectiva; (b) vista do plano yz; (c) detalhe do injetor.



Fonte: O autor.

Os aspectos referentes à qualidade da malha, como por exemplo, angulação e determinantes das células hexaédricas foram levadas em conta. A garantia de boa qualidade da malha favoreceu a redução no número de elementos e a convergência da simulação. A malha final simulada apresentou um total de 667256 elementos hexaédricos.

5.3. Configurações (*Setup*)

Os aspectos referentes à configuração dos casos simulados no UNSCYFL 3D estão relacionados aos métodos utilizados, definição de condições de contorno, imposição de velocidades, fatores de sub-relaxação e exportação de resultados. A Tabela 2 mostra os principais parâmetros configurados nas simulações dos casos 1 e 2 apresentados na Tabela 1.

Tabela 2- Propriedades de entrada nas simulações.

Propriedades	Valor
Densidade do ar - ρ_{air} [kg/m ³]	1,207
Viscosidade do ar - μ_{air} [Ns/m ²]	1,7894e-5
Densidade do líquido - ρ_{liq} [kg/m ³]	998,2
Viscosidade do líquido - μ_{liq} [Ns/m ²]	1,003e-3
Velocidade do ar - v_{air} [m/s]	50,00 e 110,00
Velocidade do líquido - v_{liq} [m/s]	4,26 e 13,3
Tensão superficial da interface - σ [N/m]	7,130e-2

Fonte: O autor.

Cada face do domínio teve sua condição de contorno imposta de forma a melhor representar o modelo físico, respeitando as limitações e potencialidades do UNSCYFL 3D. As faces superior, inferior e faces do bico injetor foram configuradas como condição de não deslizamento (parede) para o escoamento e de escape para as partículas. As faces laterais foram configuradas como simetria para o escoamento e de reflexão para as partículas. A face frontal à montante do injetor e a face do injetor tiveram seus respectivos perfis de velocidade impostos e a face à jusante foi adotada como saída de pressão.

Para controle da convergência e avanço da solução, foram utilizados os seguintes parâmetros básicos apresentados na Tabela 3. Por meio de testes realizados anteriormente, percebeu-se uma melhor adoção de passo de tempo de 1e-5 s para o caso 1 e 1e-6 s para o caso 2.

Tabela 3- Fatores de sub-relaxação utilizados.

Equação	Fator de Sub-relaxação
Quantidade de movimento	0,7
Pressão	0,3
Método VOF	0,5
Energia cinética turbulenta	0,8
Taxa de dissipação da ECT	0,8

Fonte: O autor.

6. RESULTADOS E ANÁLISES

Por se tratar de um regime fluidodinâmico transiente, as aquisições das propriedades da fase dispersa ocorreram de maneira estocástica. Durante o tempo de execução foram definidos planos de amostragem dispostos a 75 diâmetros e 150 diâmetros de distância à jusante do orifício injetor. Através destes planos, foram computadas a velocidade e a ocorrência das gotículas em função do diâmetro das mesmas.

A Tabela 4 apresenta os valores dos adimensionais calculados para os casos simulados. Nota-se que o número de Reynolds para a fase líquida apresenta um valor maior do que o número de Reynolds crítico para escoamentos internos turbulentos ($Re_{crit} \leq 2500$). Esta característica indica um provável comportamento transicional/turbulento do escoamento líquido dentro do duto de injeção.

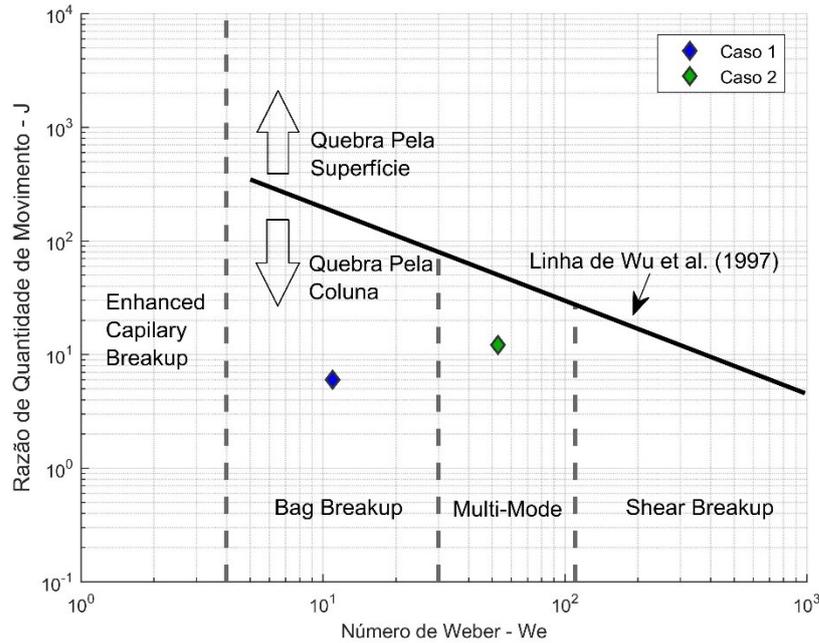
Tabela 4- Adimensionais calculados dos casos 1 e 2.

	V_{air} (m/s)	V_{liq} (m/s)	Re_{air}	Re_{liq}	J	We_{air}
Case 1	50,00	4,26	90420	1098	6,003	10,961
Case 2	110,00	13,30	198925	3428	12,090	53,052

Fonte: O autor.

Para situar os experimentos de Deepe (2006) – casos 1 e 2 – no mapa de regime de quebra primária do jato, foram introduzidos os valores da razão de quantidade de movimento em função do número de Weber de cada caso no diagrama $J-We$. A Figura 14 apresenta o mapa de regime de quebra com os dois casos analisados.

Figura 14- Mapa de regime de quebra para os casos simulados.



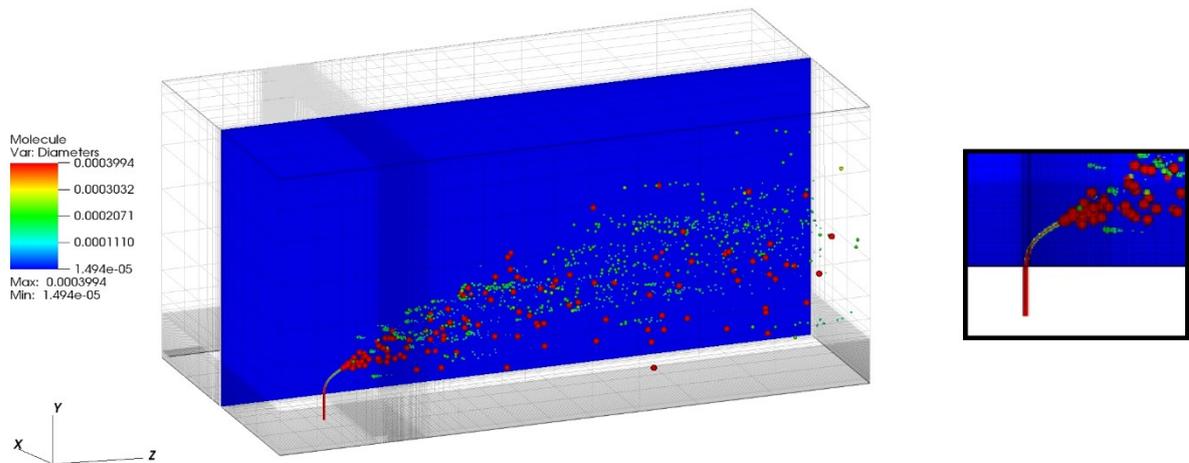
Fonte: O autor.

A formação de gotas lagrangianas pode ser observada por meio de pontos materiais dispersos no domínio euleriano. As Figura 15 e Figura 16 mostram um plano de visualização longitudinal, onde são exibidos por meio do gradiente de cores a razão de fração volumétrica (α), i. e., nas regiões compreendidas apenas pela fase gasosa, tem-se a cor azul e nas regiões preenchidas pela fase líquida, tem-se a cor vermelha. Os detalhes das figuras mostram uma visualização destacada da região dos jatos, onde, para o caso 1, tem-se uma região bem definida da atuação da transformação lagrangiana; o jato líquido é continuamente convertido em gotas a partir do momento em que o mesmo atinge a altura de quebra – Eq. (14), segundo Wu, et. al. (1997a). Já o caso 2 apresenta um comportamento oscilatório anterior à altura de quebra, ou seja, apenas alguns aglomerados líquidos (*blobs*) chegam à esta altura, tornando a geração de gotas intermitente e a simulação com convergência estatística lenta.

$$h_b = C_b d_o \sqrt{J} \quad (14)$$

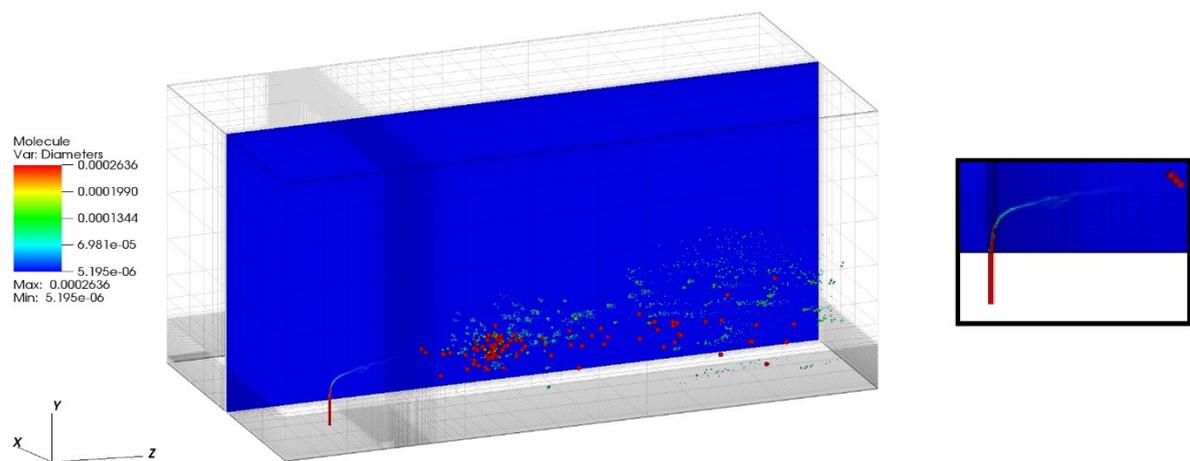
A variável h_b é a altura de quebra, d_o é o diâmetro do injetor, J é a razão de quantidade de movimento e C_b é o coeficiente de primeira ordem dependente de fatores como: espessura da camada limite do escoamento cruzado e da turbulência do jato. Para as simulações de ambos os casos foi adotado $C_b = 3,44$.

Figura 15- Fração volumétrica (α) e formação de gotas para o caso 1.



Fonte: O autor.

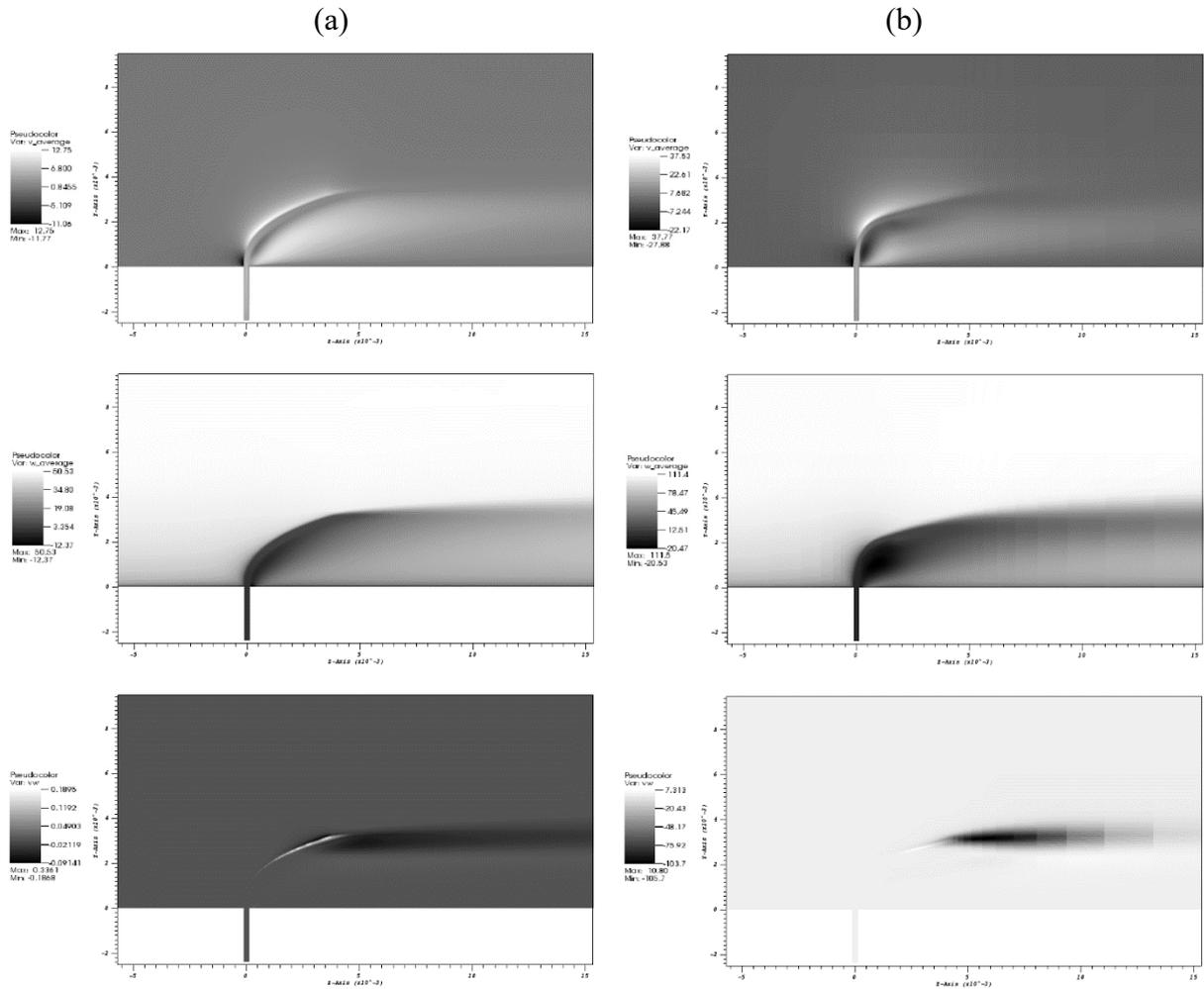
Figura 16- Fração volumétrica (α) e formação de gotas para o caso 2.



Fonte: O autor.

Alguns dos valores médios do campo de velocidades do escoamento são exibidos na Figura 17. Por meio das análises das componentes de velocidade (v e w) do escoamento, pode-se perceber uma grande influência da presença do jato líquido no escoamento gasoso. Deduz-se que, pela variação em sentido e módulo nos valores da velocidade vertical e axial do escoamento, há a presença de regiões de recirculação localizadas posteriormente à coluna de jato líquido.

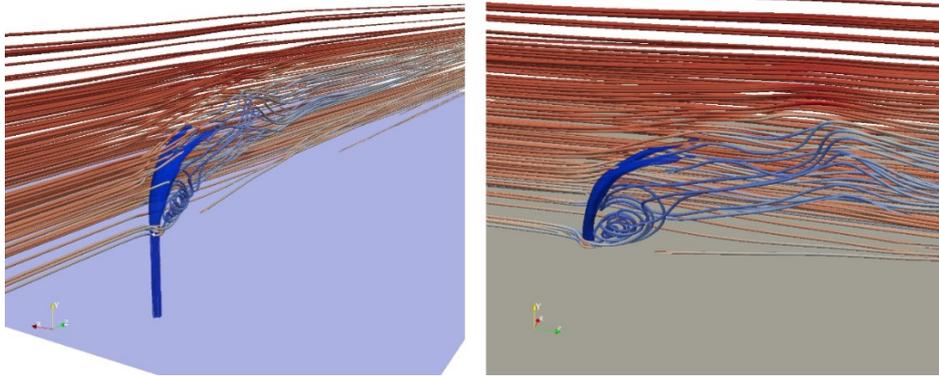
Figura 17- Campos de velocidade média v e w e produto vw do (a) caso 1 e (b) caso 2.



Fonte: O autor.

Utilizou-se a visualização de linhas de corrente (*streamlines*) como forma de verificar as estruturas tridimensionais das recirculações em torno do jato. Como apresentado pelos estudos de Fric e Roshko (1994), existem dois grandes vórtices verticais dispostos na esteira da coluna líquida e mais dois vórtices contra rotativos na ponta do jato líquido. A Figura 18 evidencia estas estruturas.

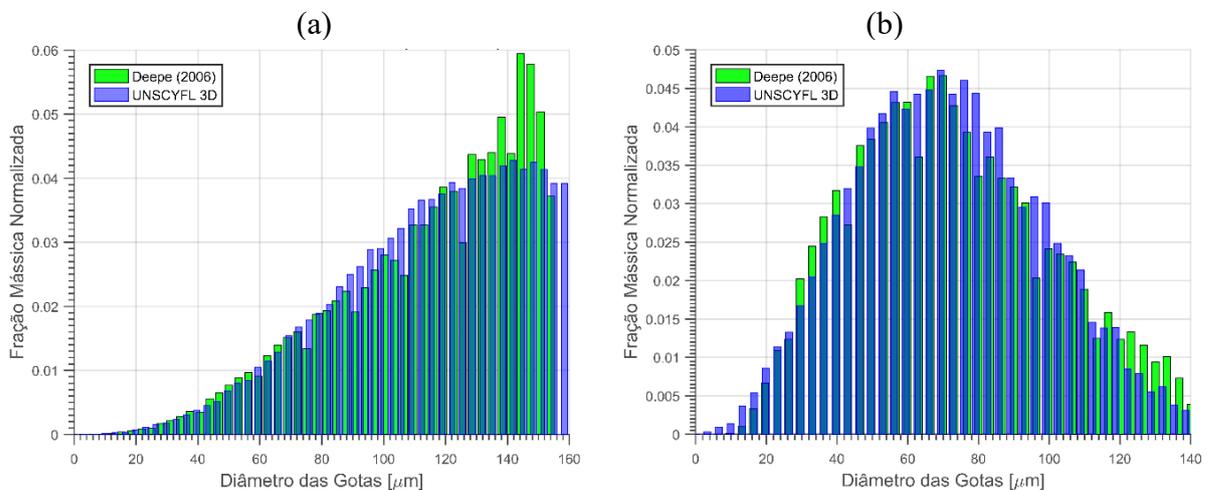
Figura 18- Linhas de corrente e vórtices tridimensionais.



Fonte: O autor.

Os planos de amostragem, definidos em dois locais específicos na direção axial (1,91 cm e 3,81 cm à jusante do injetor), foram utilizados como regiões de aferição da ocorrência e velocidade de gotas em função do respectivo diâmetro. Estes planos axiais correspondem aos mesmos utilizados pelo PDPA de Deepe (2006). A Figura 19 apresenta a fração mássica normalizada das gotas nos casos 1 e 2, respectivamente. É possível notar que, no caso 1, o regime do escoamento gerou uma população de gotas com uma maior ocorrência de altos valores de diâmetro. Já no caso 2, a distribuição de gotas segue uma distribuição aproximadamente normal e com gotículas menores do que no caso 1. O resultado condiz com a física do problema uma vez que, com o aumento dos níveis de velocidade relativa e das tensões cisalhantes, o comprimento de onda das instabilidades (λ_s e λ_c) são ainda menores, o que gera gotículas ainda menores.

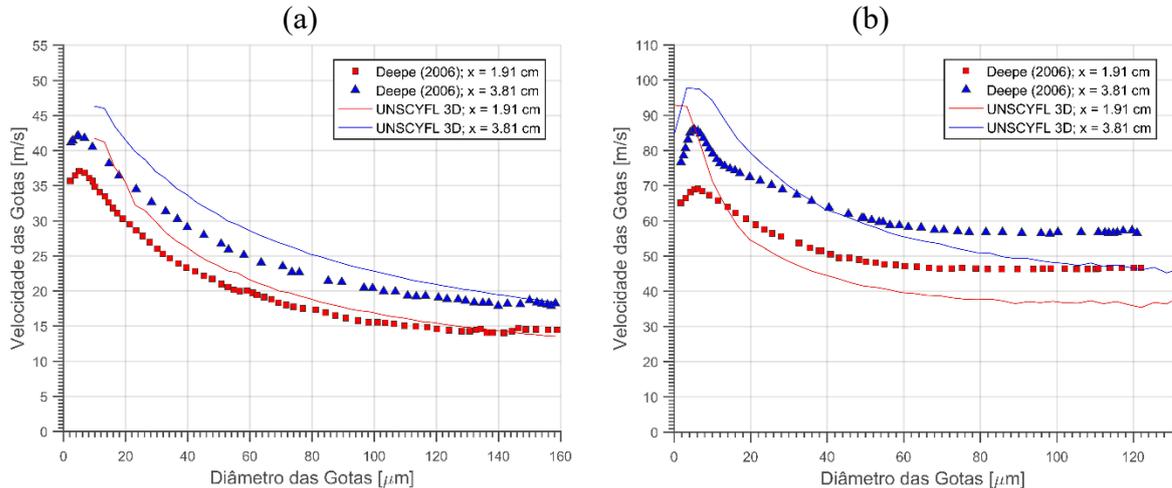
Figura 19- Fração mássica normalizada para os casos (a) 1 e (b) 2.



Fonte: O autor

O perfil de velocidades em função dos diâmetros das gotas foi outro parâmetro aferido nos planos de amostragem. A Figura 20 mostra o valor da velocidade axial em função dos diâmetros amostrados.

Figura 20- Perfil de velocidade das gotas para os casos (a) 1 e (b) 2.



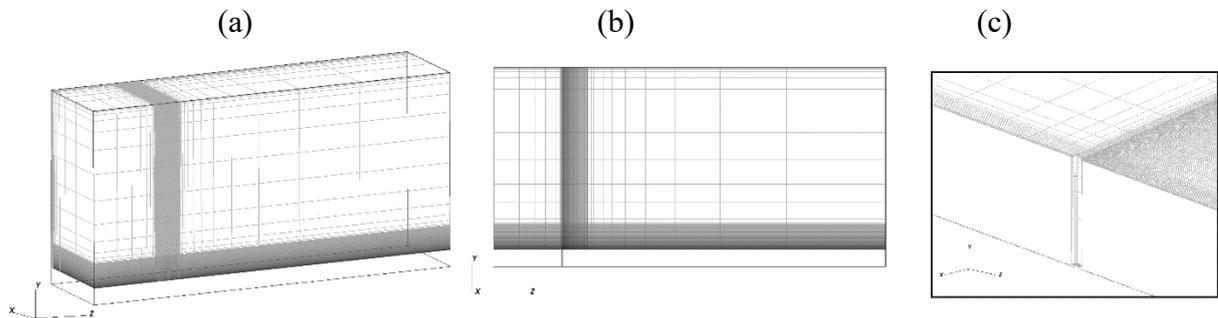
Fonte: O autor.

Como apontado por Tanner (1999), foi observado uma defasagem entre os resultados do UNSCYFL 3D e os dados de Deepe (2006). A predição do perfil de velocidades se mostra mais acurada para regimes com números de Weber menores. Para números de Weber maiores, há uma superestimação de velocidades para as góticulas menores.

6.1. Abordagem Simétrica

Uma técnica empregada na geração de malha foi a adoção de uma abordagem simétrica para o problema de jato cruzado. Esta técnica, amplamente utilizada em simulações numéricas de projetos aeronáuticos e automobilísticos, se mostra vantajosa, pois aumenta o nível de refinamento desejado sem aumentar demasiadamente o número total de elementos hexaédricos. Embora a técnica traga um maior refinamento de malha, há a possibilidade de perda de algumas informações, a discordância com o problema físico e a convergência estatística demorada. A Figura 21 mostra a malha confeccionada apenas em meio domínio, onde o plano de simetria longitudinal divide orifício injetor ao meio. O número total de elementos hexaédricos foi de 974265 elementos, apresentando 307009 elementos a mais em relação à malha anterior.

Figura 21- Malha em meio domínio, (a) vista em perspectiva; (b) vista em X; (c) detalhe do injetor.

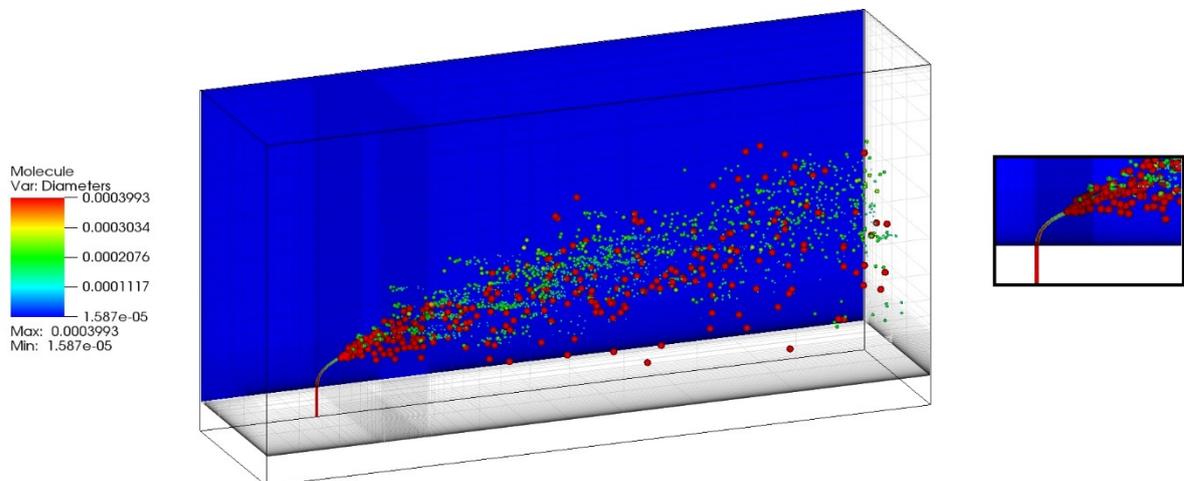


Fonte: O autor.

Para o fluido, foi adotada a condição de contorno de simetria nas faces laterais. Para as partículas, as faces laterais tiveram a condição de reflexão imposta, pois as partículas que pudessem escapar pelo plano de simetria longitudinal seriam refletidas novamente para o domínio de cálculo.

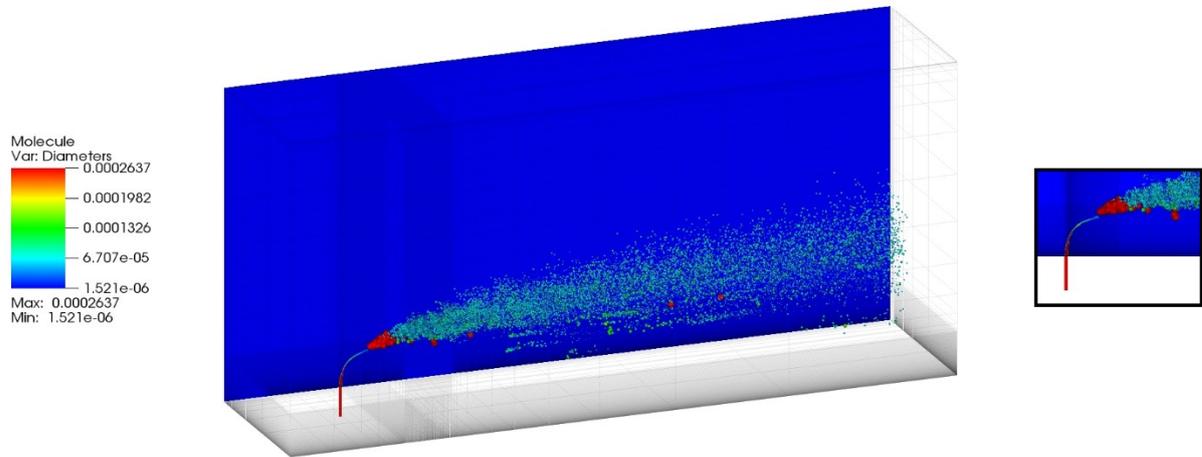
As Figura 22 e Figura 23 mostram a visualização da fração volumétrica (α), a formação de gotas e o detalhe do jato líquido nas simulações a meio domínio para os casos 1 e 2, respectivamente. Em ambos os casos, nota-se uma maior eficácia na transição Euler-Lagrange, uma vez que o jato atinge a altura de quebra de maneira contínua. No caso 1, houve um aumento na densidade de gotas no domínio, o que favoreceu a convergência estatística. Já no caso 2, o refinamento na região à jusante do jato, favoreceu a quebra de maneira abrupta se comparado à simulação com domínio completo.

Figura 22- Fração volumétrica (α) e formação de gotas para o caso 1 em meio domínio..



Fonte: O autor.

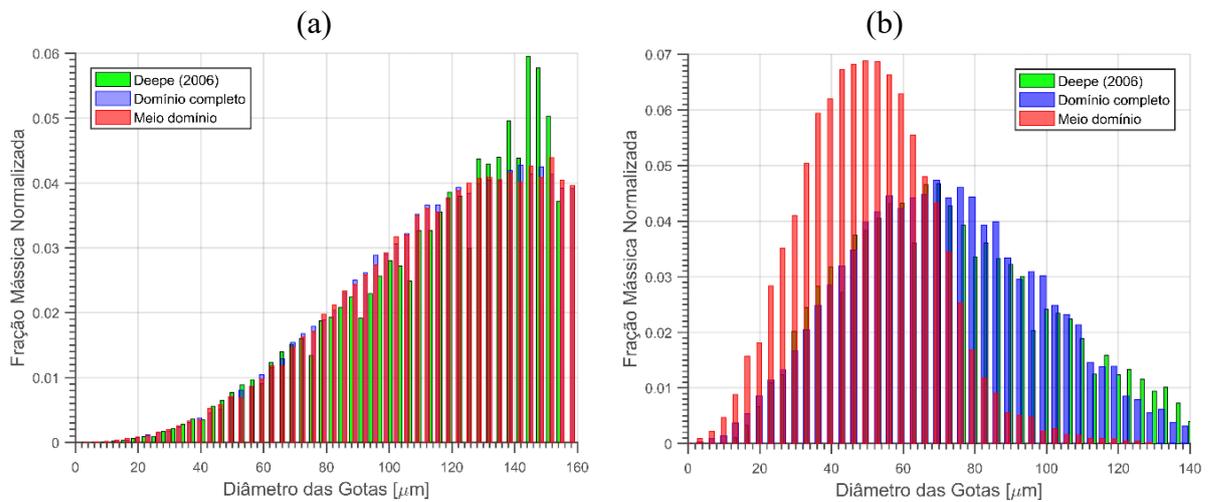
Figura 23- Fração volumétrica (α) e formação de gotas para o caso 2 em meio domínio.



Fonte: O autor.

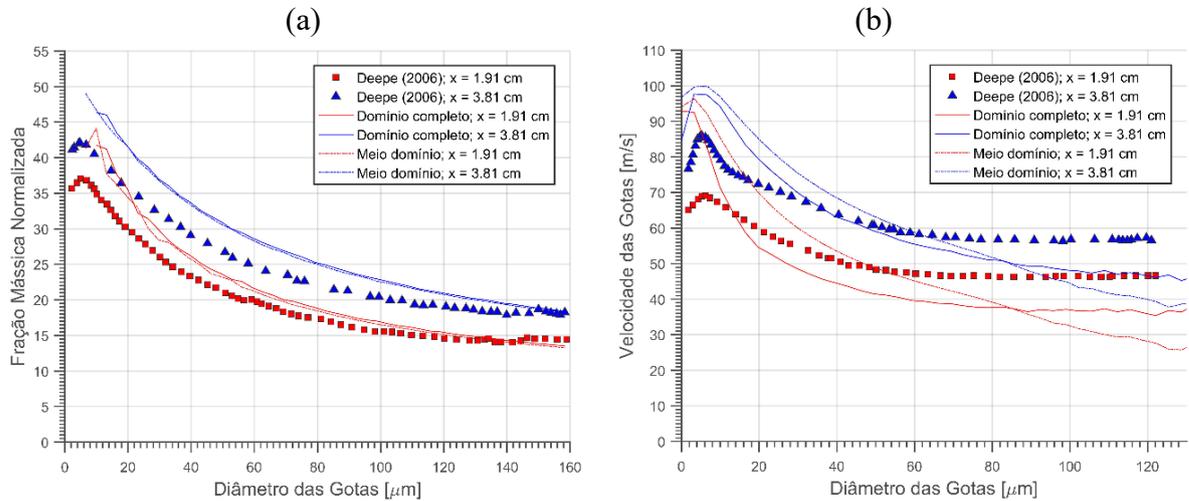
A Figura 24 apresenta uma comparação entre a fração mássica para os casos 1 e 2 nas simulações em domínio completo e meio domínio. O caso 1 simulado a meio domínio apresentou boa acurácia tanto com os dados experimentais de Deepe (2006) quanto com os resultados da simulação com o domínio completo. O caso 2 apresentou uma maior densidade populacional de gotas nas regiões com diâmetros menores, devido à quebra antecipada apresentada na Figura 23.

Figura 24- Comparação da fração mássica para os casos (a) 1 e (b) 2 e meios domínios.



Fonte: O autor.

Figura 25- Comparação dos perfis de velocidade para os casos (a) 1 e (b) 2 e meios domínios.



Fonte: O autor.

Os perfis de velocidade seguiram a mesma tendência dos histogramas de fração mássica. Para o caso 1, a convergência foi a mesma da simulação em domínio completo, distando ligeiramente dos resultados experimentais e seguindo a tendência de decrescimento da velocidade das gotas com o aumento do diâmetro das mesmas. O caso 2 apresentou valores de velocidades superestimados para as gotículas com diâmetros menores que $50 \mu\text{m}$ e valores subestimados de velocidade para as gotículas maiores.

7. CONCLUSÕES

O método TAB, utilizado na predição dos fenômenos de quebra secundária, se mostra bastante eficaz na obtenção da ocorrência de gotículas em condições de jatos líquidos em escoamentos cruzados. O mesmo é empregado nas simulações de quebra de jatos líquidos em atmosferas quiescentes e em atmosferas dinâmicas. Isso mostra que a analogia de uma gota líquida a um sistema massa-mola-amortecedor é válida, como proposto por O'Rourke e Amsden (1987).

O objetivo do presente trabalho foi analisar o fenômeno de quebra secundária, além de propor procedimentos para a melhoria das simulações numéricas utilizando o UNSCYFL 3D, para casos com baixos números de Weber (entre 10 e 60). Os resultados numéricos foram confrontados com dados de experimentos materiais. Como esperado, percebeu-se maiores níveis de velocidade para as gotas de menor diâmetro. Outro fator observado e comprovado foi a influência direta do número de Weber na quebra, pois os regimes de maior velocidade, como exposto por Mazallon et al. (1999), por apresentar menores λ_c e λ_s , resultaram em aerossóis com predominância de gotículas de menor diâmetro. O crescimento da discrepância com o aumento do número de Weber mostra uma imprecisão do método TAB para regimes de quebra mais catastróficos, como apontado por Tanner (1999).

As análises foram definidas, inicialmente, como simulações em um domínio completo, onde percebeu-se que, pela dificuldade em se garantir o refinamento necessário em torno do jato e a uniformidade dos elementos à jusante, contribuiu para a transformação do VOF em gotas lagrangianas de maneira intermitente no caso 2. De forma a melhorar os resultados para o caso 2, utilizou-se uma abordagem simétrica do problema que, por sua vez, contribuiu para o refinamento necessário sem aumentar o custo computacional. No entanto o meio domínio piorou a convergência para o caso 2, gerando uma distribuição de gotículas discrepante em relação ao experimento devido às considerações de simetria e reflexão adotadas.

A visão estocástica do problema se mostrou pertinente uma vez que, ao se trabalhar com amostras pontuais como feito por Arienti e Soteriou (2007), alguns pontos específicos podem não representar a física do problema. A ponderação da média, além de garantir resultados mais representativos, evita que amostras esporádicas com resultados discrepantes afete o resultado global.

8. REFERÊNCIAS

Arienti, M. e Soteriou, M. C. *Dynamic of Pulsed Jet in Crossflow*, ASME Turbo Expo 2007: Power for Land, Sea and Air. Montreal, Canada, 2007.

Baumgarten, C. *Mixture formation in internal combustion engines*. Springer 2006.

Deepe, J. M. *Effect of Weber Number on The Fuel Transfer Function of Modulated Liquid Jets*. M.Sc. thesis, Pennsylvania State University, Pennsylvania, 2006.

Denner, F. *Balanced-Force Two-Phase Flow Modeling on Unstructured and Adaptive Meshes*. PhD. thesis, Imperial College London, London, 2013.

Ferziger, J. H. e Peric, M. *Computational Methods for Fluid Dynamics*, Springer, 2002.

Fric, T. T. e Roshko, A. *Vortical Structure in The Wake of a Transverse Jet*, Journal of Fluid Mechanics (1994). Cambridge University Press. Doi: 10.1017/S0022112094003800, 1994.

Geery, E.L. e Margetts, M.J., *Penetration of a High-Velocity Gas Stream by a Water Jet*. Journal of Spacecraft, Vol. 6, No. 1, pp. 79-81, 1969.

Gulec, Y. *Numerical Study on Gasoline Direct Injection Sprays*. M.Sc. thesis. Izmir Institute of Technology, Izmir, 2015.

Inamura, T. e Nagai, N. *Spray Characteristics of Liquid Jet Traversing Subsonic Airstreams*. Journal of Propulsion and Power, Vol. 13(2), p. 250-256, 1997.

Karagozian, A. R. *Transverse jets and their control*. Project in Energy and Combustion Science, 36(5), p. 531-553, oct. 2010. Elsevier Ltd. Doi: 10.1016/j.pecs.2010.01.001, 2010.

Lin, K.C., Kennedy, P.J., e Jackson, T.A., *Penetration Heights of Liquid Jets in High-Speed Crossflows*. AIAA-2002-0873, January, 2002.

O'Rourke, P. J. e Amsden, A. A. *The TAB Method for Numerical Calculation of Spray Droplet Breakup*. SAE Technical Paper No. 872089, 1987.

Reitz, R. D. *Computer Modeling Spray*. *Spray Technology Short Course*. Pittsburgh, United States of America, 1996.

Reitz, R. D., Pickett, L. and Trujillo, M., 2014. *Fuel Introduction. Encyclopedia of Automotive Engineering*, John Wiley & Sons, Ltd. ISBN: 978-0-470-97402-5. DOI: 10.1002/9781118354179.auto118.

Souza, F. J., Martins, D. A. M. e Salvo, R. V. 2012. *UNSCYFL 3D Versão 2.0 – Versão Serial Manual do Usuário*. Laboratório de Mecânica dos Fluidos. Universidade Federal de Uberlândia. 2012.

Souza, F. J. 2012. *UNSCYFL 3D Versão 2.0 – Manual Teórico*. Laboratório de Mecânica dos Fluidos. Universidade Federal de Uberlândia. 2012.

Souza, F. J. e Oliveira, J. E. S. *Turbulência em Motores de Combustão Interna*. Turbulência. 1st edition. Ilha Solteira: ABCM, 2010, v.7, p. 167-213, 2010.

Tanner, F. X.. *Atomization and Droplet Breakup Modeling of Diesel Sprays*. Michigan Tech, 1999. Disponível em: <http://www.math.mtu.edu/~tanner/Research/Project3/poster_new/poster_new.html>. Acesso em: abril de 2017.

Ubbink, O., 1997. *Numerical Prediction of Two Fluid System With Sharp Interfaces*, PhD. thesis, London University.

Wu, P. K., Kirkendall, K. A., Fuller, R. P., and Nejad, A. S., 1997. *Breakup Processes of Liquid Jets in Subsonic Crossflow*, J. Propulsion and Power 13,64-73, 1997a.

Wu, P.-K., Kirkendall, K.A., Fuller, R.P., Gruber, M.R., e Nejad, A.S., *Spray Trajectories of Liquid Fuel Jets in Subsonic Crossflows*. 7th International Conference on Liquid Atomization and Spray Systems, Seoul, Korea, pp. 545-552, Aug. 1997b.

9. APÊNDICE

Setup do cartão de entrada do UNSCYFL 3D para o caso 1.

```

t t t t 1
t f
1
1.e-4 1.d11
1.207d0 1.7894d-5 998.2d0 0.001003d0 0.0713d0
5
f
0.d0 0.d0 0.0 0.0 0.d0 1.d0 100.0
5
WALLS wall escape
TUNNEL_INLET inlet escape
50.0 0.0 0.03 0.00254
JET_INLET inlet escape
4.26d0 1.0 0.03 0.032d-3
TUNNEL_OUTLET poutlet escape
0.d0 0.d0 1.d0 1.d0
SYMMETRIES symmetry escape
1000000 100 1.d-5
.7d0 .3d0 .5 0.8 0.8
1.d-1 1.d-1 1.d-1 1.d-1 0.1 0.1 0.1
40 40 40 7 50 50 50
1.0 0.0 0.0 0.0 0.0
2
40
0
t f 1
f f .5d0 0
100
998.2
0.d0 -9.8d0 0.0
'case1'
'L'
'./VISIT/'
'./PARTICLE/'
'./PROBES/'
2
0.0 0.0 0.239
0.0 0.0460 0.0

```

Setup do cartão de entrada do UNSCYFL 3D para o caso 2.

```

t t t t 1
t f
1
1.e-4 1.d11
1.207d0 1.7894d-5 998.2d0 0.001003d0 0.0713d0
5
f
0.d0 0.d0 0.0 0.0 0.d0 1.d0 100.0
5
WALLS wall escape
TUNNEL_INLET inlet escape
110.0 0.0 0.03 0.00254
JET_INLET inlet escape
13.3d0 1.0 0.03 0.032d-3
TUNNEL_OUTLET poutlet escape
0.d0 0.d0 1.d0 1.d0
SYMMETRIES symmetry escape
1000000 100 1.d-5
.7d0 .3d0 .5 0.8 0.8
1.d-1 1.d-1 1.d-1 1.d-1 0.1 0.1 0.1
40 40 40 7 50 50 50
1.0 0.0 0.0 0.0 0.0
2
40
0
t f 1
f f .5d0 0
100
998.2
0.d0 -9.8d0 0.0
'case2'
'L'
'./VISIT/'
'./PARTICLE/'
'./PROBES/'
2
0.0 0.0 0.239
0.0 0.0460 0.0

```