



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA  
E ENGENHARIA DE ALIMENTOS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA  
QUÍMICA**

**FLUIDODINÂMICA DA LIBERAÇÃO DE ÓLEO SUBMERSO  
EM ÁGUA: ESTUDO EXPERIMENTAL E DE SIMULAÇÃO**

**DÉBORA RAQUEL SIMIONI**

**Florianópolis  
2014.**




**Fluidodinâmica da Liberação de Óleo Submerso em Água:  
Estudo Experimental e de Simulação**

por

**Débora Simioni**


Dissertação julgada para obtenção do título de **Mestre em Engenharia Química**, área de Concentração de **Desenvolvimento de Processos Químicos e Biotecnológicos** e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de Santa Catarina.

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Marinho Bastos Quadri  
**orientador**

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Ariovaldo Bolzan  
**coorientador**

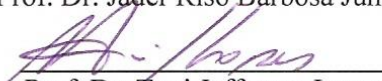
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Ricardo Antonio Francisco Machado  
**coordenador**

**Banca Examinadora:**

  
\_\_\_\_\_  
Prof.ª Dr.ª Selene Maria de Arruda Guelli Ulson de Souza

\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Paulo Cesar Philippi

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Jader Riso Barbosa Junior

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Toni Jefferson Lopes

**Florianópolis, 22 de setembro de 2014.**



**Débora Raquel Simioni**

**FLUIDODINÂMICA DA LIBERAÇÃO DE ÓLEO SUBMERSO  
EM ÁGUA: ESTUDO EXPERIMENTAL E DE SIMULAÇÃO**

Dissertação apresentada ao  
Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia Química da  
Universidade Federal de Santa  
Catarina como requisito parcial  
para obtenção do título de Mestre  
em Engenharia Química.

Orientador: Prof. Dr. Marinho  
Bastos Quadri

Coorientador: Prof. Dr. Ariovaldo  
Bolzan

Florianópolis-SC  
2014.



Simioni, Débora Raquel

Fluidodinâmica da liberação de óleo submerso em água : estudo experimental e de simulação / Débora Raquel Simioni ; orientador, Marinho Bastos Quadri ; coorientador, Ariovaldo Bolzan. - Florianópolis, SC, 2014.  
158 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química.

Inclui referências

1. Engenharia Química. 2. Escoamento óleo/água. 3. Vazamentos. 4. Simulação CFD. 5. Método Level set. I. Quadri, Marinho Bastos. II. Bolzan, Ariovaldo. III. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química. IV. Título.





*Dedico este trabalho a minha mãe  
Liria, meu pai Paulo, minhas irmãs  
Paula e Lilian, meus cunhados  
Jeferson e Eduardo, meus sobrinhos  
Sofia, Ana Carolina, João Vicente e  
Maria Clara, aos meus padrinhos  
Lorena e Jaime Bolzani, Iredes e  
Armando Zonta, Rita e Oracílio  
Costella e aos demais familiares.  
Vocês são os grandes incentivadores  
das minhas lutas, os grandes  
responsáveis pela minha garra e os  
maiores motivos das minhas vitórias.*



## AGRADECIMENTOS

À Deus, por me dar a vida e me guiar por caminhos sempre seguros, permitindo-me conhecer e conviver com pessoas boas e admiráveis.

Aos meus pais, irmãs e familiares, que me incentivaram em todos os momentos e estiveram ao meu lado sempre.

Aos meus amados Mestres da graduação em Engenharia Química (UNOCHAPECÓ), pelo incentivo à pesquisa, pela amizade e todo o conhecimento intangível e experiência transmitidos.

Aos meus colegas Raquel Manozzo Galante, Jônata Biehl e Rafael Feller, pelo apoio nesse estudo.

Aos colegas do LASIPO, pela convivência, companheirismo, troca de ideias e amizade no período de mestrado.

Às colegas Alexandra Valério- (LCP) e Veronica Moreno Arguello -(VITROCER), pela ajuda e orientação nas avaliações físico-químicas.

Aos colegas dos demais laboratórios do Departamento de Engenharia Química e de Alimentos, pela amizade.

Aos amigos: Vando Ferreira Lopes e João Paulo Acosta Luz, pela amizade, apoio, risadas, troca de informações e conhecimentos. Muito obrigada por fazerem parte da minha vida, hoje e sempre.

À amiga Vanessa Fiorini, a irmã que Deus me permitiu escolher, a pesar de termos trilhados caminhos diferentes, estamos sempre juntas, participando, torcendo e apoiando uma a outra.

Ao Professor Marinho Bastos Quadri, pela orientação durante o mestrado.

Ao Professor Ariovaldo Bolzan por possibilitar a realização deste trabalho através dos equipamentos para análises físico-químicas e simulações.

À Professora Mara Novy Quadri, pelo incentivo, conhecimento, amizade e muitas risadas.

Ao CENPES/PETROBRAS, por financiar o projeto e apoiar a pesquisa.

Ao PRH 34, coordenado pelo Professor Júlio Normey Rico pelo incentivo financeiro, apoio pessoal e compreensão.

Ao amigo e Professor Armando Albertazzi Gonçalves Jr., por ser um grande exemplo como professor, como pessoa, por seu caráter e integridade.

À UFSC e ao PósEQA por fornecer o ensino e a estrutura.



*“Foi o tempo que dedicaste a tua rosa que  
fez a tua rosa tão importante.”*

Antoine de Saint-Exupéry



## RESUMO

SIMIONI, Débora R.. Fluidodinâmica da liberação de óleo submerso em água: estudo experimental e de simulação. 2014. N° p. 154. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, UFSC, Florianópolis, SC.

A exploração de petróleo *offshore* em profundidade está sujeita à ocorrência de vazamento de óleo tanto em diversas situações. A caracterização das propriedades do sistema óleo /água envolvendo viscosidade, tensão interfacial e densidades, além do estudo dos padrões de escoamento desse tipo de sistema imiscível, é de extrema importância para a definição de estratégias e desenvolvimento de tecnologias aptas a lidar com vazamentos de óleo submersos. Com essa motivação, desenvolve-se um estudo do escoamento óleo/água a partir de experimentos e de simulação CFD (Fluidodinâmica Computacional) em geometria tridimensional. Além das equações de Navier-Stokes e da equação da conservação da massa, emprega-se o método *Level set* para acompanhamento da interface água/óleo e a técnica numérica de elementos finitos. Os experimentos consistiram na injeção óleo em meio submerso, por meio de duas geometrias, a 22°C. Testou-se três óleos e dois meios contínuos. As simulações reproduziram adequadamente o comportamento experimental, com formação de fios, gotejamento e ascensão das gotas. O diâmetro médio das gotas simuladas apresentou um atingimento acima de 88% com relação aos dados experimentais. Pode-se observar que o aumento da vazão do óleo provoca um aumento da altura de gotejamento e tempo entre liberação de gotas ao mesmo tempo em que leva a uma pequena redução no diâmetro das gotas. Em geral, o modelo reproduziu adequadamente o tamanho das gotas. De fato, os maiores desvios foram encontrados para a altura de gotejamento, a qual está relacionada ao tempo entre liberação de gotas. Para o bocal em forma de fenda, realizando-se tanto ensaios experimentais como simulações. Os resultados de simulação mais uma vez estiveram em boa sintonia com o comportamento fluidodinâmico observado nos experimentos. Atestando a pertinência da metodologia utilizada e estabelecendo este tipo de modelo como um excelente ponto de partida para a consideração de problemas de escoamento de óleo submerso segundo uma abordagem tridimensional.

Palavras- chave: Escoamento óleo/água, Vazamentos, Simulação CFD, Método *Level set*.





## ABSTRACT

SIMIONI, Débora R. Fluidodinâmica da liberação de óleo submerso em água: estudo experimental e de simulação. 2014. N° p. 154. Dissertation (Master Degree in Chemical Engineering) – Post-Graduation Program in Chemical Engineering, UFSC, Florianópolis, SC.

The offshore oil exploration in depth is subject to the occurrence of oil leakage both in different situations. The characterization of the properties of the oil / water system involving viscosity, density and interfacial tension and the study of the flow patterns of such immiscible system is extremely important for the definition of strategies and develop technologies suitable to deal with oil spills submerged. With this motivation, develops a study of the flow oil / water from experiments and simulation CFD (Computational Fluid Dynamics) in three-dimensional geometry. In addition to the Navier-Stokes and conservation of mass equation, uses the Level-set method for monitoring the interface water / oil and numerical finite element technique. The experiments consisted in injecting oil under water by means of two geometries at 22 ° C. Three oils was tested and two continuous media. The simulations adequately reproduced the experimental behavior with yarn formation, drip and rise of drops. The mean diameter of droplets presented a simulated reaching above 88% when compared to the experimental data. It can be seen that increasing the oil flow causes an increased dropping point and time between the release of drops at the same time leads to a small reduction in droplet diameter. In general, this model adequately reproduced droplet size. In fact, the greatest deviations were found to drip point, which is related to the time between the release of droplets. For the slit-shaped nozzle, performing both experimental tests and simulations. The simulation results again were in good harmony with the fluid dynamic behavior observed in the experiments. Confirming the relevance of the methodology used and establishing this type of model as an excellent starting point for consideration of submerged oil flow problems according to a three-dimensional approach.

Keywords: Oil/water flow, Leaks, CFD Simulation, *Level set* Method



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1-Imagens do processo de formação da gota. ....	11
Figura 2-Diagrama esquemático das forças atuantes na gota.....	11
Figura 3 – Ilustração das forças atuantes em uma gota de óleo submersa em água. ....	14
Figura 4 – Gráfico $Re_p$ vs. $CdRe_p^2$ . ....	17
Figura 5- Experimentos de injeção de petróleo em meio subaquático com aumento gradativo da velocidade de injeção. Tamanho do orifício de 2 milímetros e temperatura de 18°C.....	18
Figura 6- Imagem do Tensiômetro <i>Ramé-Hart</i> modelo 250- F1.....	30
Figura 7 - Esquema principal da instalação experimental do método da gota pendente: 1 - fonte de luz, 2 - lente de colimação, 3 – gota pendente, 4 - célula que contém a fase contínua, 5 – lente de condensação (projeção), 6 - plano da imagem. ....	30
Figura 8- (A) Dimensões e símbolos usados neste programa. (B) Imagem experimental da análise de tensão interfacial do óleo de soja em água destilada. ....	31
Figura 9-Esquema utilizado para análise de ângulo de contato de óleo/água em uma superfície de aço inoxidável, com imagem experimental do detalhamento da análise.....	33
Figura 10- Foto da bancada experimental, coluna preenchida com o meio contínuo e bocal de injeção do fluido disperso posicionado na base do sistema.....	36
Figura 11 - Representação da discretização de um domínio bidimensional por elementos finitos triangulares.....	42
Figura 12 - Malha estruturada de elementos quadriláteros, aplicada a um conduto linear.....	43
Figura 13 - Sistema de coordenada local e global para (A) elemento triangular com três nós e (B) elemento retangular com quatro nós.....	44
Figura 14 - Resultado de etapas sucessivas de refinamento de uma malha hexaédrica 3D.....	45
Figura 15 – Imagem do domínio utilizado nas simulações com injeção através do bocal cilíndrico.....	46
Figura 16 - Imagem do domínio utilizado nas simulações com injeção através da fenda.....	47
Figura 17 – Imagem do domínio de simulação para injeção através de bocal e distribuição inicial dos fluidos.....	48

Figura 18 - Imagem do domínio de simulação para a injeção através de bocal com indicação das interfaces iniciais óleo/água, localização do ponto de pressão constante, entrada e saída do sistema..... 49

Figura 19 - Imagem do domínio de simulação para a injeção através da fenda e distribuição inicial dos fluidos. .... 50

Figura 20 - Imagem do domínio de simulação para a injeção através da fenda com indicação da entrada e saída do sistema, interface inicial óleo/água e localização do ponto de pressão constante. .... 51

Figura 21 – (A) Imagem da malha utilizada nas simulações para a injeção através do bocal. (B) Imagem da malha utilizada para as simulações com injeção através da fenda. .... 53

Figura 22 - Dados comparativos entre sistemas com e sem a presença de íons no meio contínuo para as diferentes velocidades..... 63

Figura 23 – (A) Imagem do sistema óleo de soja/ água destilada para a velocidade de injeção de 0,225 m/s. (B) Imagem do sistema óleo de soja/ água salina para a velocidade de injeção de 0,225 m/s. .... 65

Figura 24 – Imagens experimentais do escoamento de óleo Spindura 10/água destilada, caso do bocal, para as velocidades de: (A) 0,236 m/s; (B), 0,360 m/s e (C) 0,453 m/s. .... 65

Figura 25 - Imagens experimentais do escoamento de óleo lubrificante usado/água salina, caso do bocal, para as velocidades de: (A) 0,177m/s; (B) 0,276m/s e (C) 0,349m/s. .... 66

Figura 26– (A) Imagem detalhada do momento do desprendimento da gota na simulação com 101.237 elementos. (B) Imagem detalhada do momento do desprendimento da gota na simulação com 167.285 elementos..... 68

Figura 27 – (A) Imagem detalhada do momento do desprendimento da gota na simulação com 204.544 elementos. (B) Imagem experimental correspondente..... 69

Figura 28 – (A) Imagens experimentais da formação da gota de óleo de soja em água destilada a velocidade de 0,0413 m/s. (B) Imagens da simulação representando a formação da gota nas mesmas condições. . 70

Figura 29 – Imagens da simulação do escoamento de óleo de soja/água destilada para a velocidade de injeção de 0,225 m/s, sendo em cinza a superfície que define a interface (fração de volume óleo de 0,5); em escala de cores, o plano central com o campo de velocidades, e em preto os vetores de velocidade proporcionais para os tempos de 0s; 0,50s; 1,00s e 1,20s. .... 75

Figura 30 – Imagem experimental do escoamento de óleo de soja/água destilada, para o caso do bocal, correspondente ao tempo de 1,00s para a velocidade de injeção de 0,225 m/s.....	76
Figura 31 – Imagens da simulação do escoamento de óleo de soja/água destilada para a velocidade de injeção de 0,225 m/s, sendo em cinza a superfície que define a interface (fração de volume óleo de 0,5); em escala de cores, o plano central com o campo de velocidades, e em preto os vetores de velocidade proporcionais para os tempos de 1,25s; 1,30s; 1,45s e 1,50s.....	77
Figura 32 - Imagens experimentais do escoamento de óleo de soja/água destilada, para o caso do bocal, correspondente aos tempos de 1,25s e 1,45s para a velocidade de injeção de 0,225 m/s.....	77
Figura 33 - Imagens da simulação do escoamento de óleo de soja/água destilada para a velocidade de injeção de 0,225 m/s, sendo em cinza a superfície que define a interface (fração de volume óleo de 0,5); em escala de cores, o plano central com o campo de velocidades, e em preto os vetores de velocidade proporcionais para os tempos de 1,55s; 1,60s; 1,65s e 2,10s.....	78
Figura 34 – Imagens da simulação do escoamento de óleo de soja/água destilada para a velocidade de injeção de 0,225 m/s, sendo em cinza a superfície que define a interface (fração de volume óleo de 0,5); em escala de cores, o plano central com o campo de velocidades, e em preto os vetores de velocidade proporcionais para os tempos de 2,30s; 2,45s; 2,50s e 2,60s.....	79
Figura 35 – Imagens das simulações. (A)- Sistema óleo de soja/ água destilada, tempo de 0,30s. (B)- Sistema óleo de soja/ água salina, tempo de 0,30s. (C)- Sistema óleo de soja/ água destilada, tempo de 0,50s. (D)- Sistema óleo de soja/ água salina, tempo de 0,50s.....	82
Figura 36 - Imagens das simulações. (A)- Sistema óleo de soja/ água destilada, tempo de 0,70s. (B)- Sistema óleo de soja/ água salina, tempo de 0,70s. (C)- Sistema óleo de soja/ água destilada, tempo de 0,90s. (D)- Sistema óleo de soja/ água salina, tempo de 0,90s.....	83
Figura 37 - Imagens das simulações. (A)- Sistema óleo de soja/ água destilada, tempo de 1,02s. (B)- Sistema óleo de soja/ água salina, tempo de 1,02s. (C)- Sistema óleo de soja/ água destilada, tempo de 1,10s. (D)- Sistema óleo de soja/ água salina, tempo de 1,10s.....	84
Figura 38 – Imagens dos experimentos realizados por Masutani, (1999), injetando óleo cru em: (A) água potável com velocidade de injeção de 0,36 m/s e (B) água do mar com velocidade de injeção de 0,32 m/s.....	85
Figura 39 - Imagens da simulação do escoamento de óleo Spindura 10/água destilada para a velocidade de injeção de 0,236 m/s, sendo em	

branco a superfície que define a interface (fração de volume óleo de 0,5); em escala de cores, o plano central com o campo de velocidades, e em preto os vetores de velocidade proporcionais para os tempos de 0s; 0,20s; 0,50s e 0,65s..... 88

Figura 40 - Imagens experimentais do escoamento de óleo Spindura 10/água destilada, para o caso do bocal, correspondente aos tempos de 0,20s; 0,50s e 0,65s para a velocidade de injeção de 0,236 m/s. .... 89

Figura 41 – Imagens da simulação do escoamento de óleo Spindura 10/água destilada para a velocidade de injeção de 0,236 m/s, sendo em branco a superfície que define a interface (fração de volume óleo de 0,5); em escala de cores, o plano central com o campo de velocidades, e em preto os vetores de velocidade proporcionais para os tempos de 0,75s; 0,80s; 0,85s e 0,90s..... 90

Figura 42 – Imagens da simulação do escoamento de óleo Spindura 10/água destilada para a velocidade de injeção de 0,236 m/s, sendo em branco a superfície que define a interface (fração de volume óleo de 0,5); em escala de cores, o plano central com o campo de velocidades, e em preto os vetores de velocidade proporcionais para os tempos de 1,00s; 1,10s; 1,20s e 1,33s..... 90

Figura 43 – Imagens da simulação do escoamento de óleo lubrificante usado/água salina para a velocidade de injeção de 0,177 m/s, sendo em preto a superfície que define a interface (fração de volume óleo de 0,5); em escala de cores, o plano central com o campo de velocidades, e em cinza os vetores de velocidade proporcionais para os tempos de 0s; 0,30s; 0,45s e 0,52s..... 92

Figura 44 - Imagens experimentais do escoamento de óleo lubrificante usado/água salina, para o caso do bocal, correspondente aos tempos de 0,30s; 0,45s e 0,52s para a velocidade de injeção de 0,177 m/s. .... 92

Figura 45 – Imagens da simulação do escoamento de óleo lubrificante usado/água salina para a velocidade de injeção de 0,177 m/s, sendo em preto a superfície que define a interface (fração de volume óleo de 0,5); em escala de cores, o plano central com o campo de velocidades, e em cinza os vetores de velocidade proporcionais para os tempos de. 0,60s; 0,70s; 0,75s e 0,80s..... 93

Figura 46 - Imagens da simulação do escoamento de óleo lubrificante usado/água salina para a velocidade de injeção de 0,177 m/s, sendo em preto a superfície que define a interface (fração de volume óleo de 0,5); em escala de cores, o plano central com o campo de velocidades, e em cinza os vetores de velocidade proporcionais para os tempos de 0,95s; 1,05s; 1,13s e 1,16s..... 94

Figura 47 – Imagens comparativas dos vórtices laterais formados pela recirculação da fase contínua com injeção através do bocal para os sistemas: (A) Óleo de soja em água destilada para a velocidade de 0,225m/s, tempo de 0,69s; (B) Óleo Spindura 10 em água destilada para a velocidade de 0,236m/s, tempo de 0,90s e (C) Óleo lubrificante usado em água salina para a velocidade de 0,177m/s, tempo de 0,80s.....	95
Figura 48 – Imagem de divulgação da ANP do vazamento a partir de uma fissura, ocorrido na costa do Rio de Janeiro, Campo de Frade, em novembro de 2011.....	96
Figura 49 - Imagens da simulação do escoamento de óleo de soja/água destilada para a velocidade de injeção de 0,0554 m/s, sendo em cinza a superfície que define a interface (fração de volume óleo de 0,5); em escala de cores, o plano central com o campo de velocidades, e em preto os vetores de velocidade proporcionais para os tempos de 0s e 0,20s. .	97
Figura 50 - Imagens da simulação do escoamento de óleo de soja/água destilada para a velocidade de injeção de 0,0554 m/s, sendo em cinza a superfície que define a interface (fração de volume óleo de 0,5); em escala de cores, o plano central com o campo de velocidades, e em preto os vetores de velocidade proporcionais para os tempos de 0,30s e 0,50s. ....	98
Figura 51 - Imagem experimental do escoamento de óleo de soja/água destilada, para o caso da fenda, correspondente ao tempo de 0,50s para a velocidade de injeção de 0,0544 m/s.....	99
Figura 52 - Imagens da simulação do escoamento de óleo de soja/água destilada para a velocidade de injeção de 0,0554 m/s, sendo em cinza a superfície que define a interface (fração de volume óleo de 0,5); em escala de cores, o plano central exibe o campo de velocidades, e em preto os vetores de velocidade proporcionais para os tempos de 0,60s e 0,73s. ....	99
Figura 53 - Imagens experimentais do escoamento de óleo de soja/água destilada, para o caso da fenda, correspondentes aos tempos de 0,70s e 0,78s para a velocidade de injeção de 0,0554 m/s.....	100
Figura 54 – Imagens da simulação do escoamento de óleo de soja/água destilada para a velocidade de injeção de 0,0554 m/s, sendo em cinza a superfície que define a interface (fração de volume óleo de 0,5); em escala de cores, o plano central exibe o campo de velocidades, e em preto os vetores de velocidade proporcionais para os tempos de 0,80s e 0,90s. ....	101
Figura 55 - Imagem experimental do escoamento de óleo de soja/água destilada, para o caso da fenda, correspondente ao tempo de 0,90s para a velocidade de injeção de 0,0544 m/s.....	101

Figura 56 – Imagens da simulação do escoamento de óleo de soja/água destilada para a velocidade de injeção de 0,1477 m/s, sendo em cinza a superfície que define a interface (fração de volume óleo de 0,5); em escala de cores, o plano central exhibe o campo de velocidades, e em preto aparecem os vetores de velocidade proporcionais para os tempos de 0s e 0,10s. .... 102

Figura 57 – Imagens da simulação do escoamento de óleo de soja/água destilada para a velocidade de injeção de 0,1477 m/s, sendo em cinza a superfície que define a interface (fração de volume óleo de 0,5); em escala de cores, o plano central exhibe o campo de velocidades, e em preto aparecem os vetores de velocidade proporcionais para os tempos de 0,20s e 0,30s. .... 103

Figura 58 – Imagem experimental do escoamento de óleo de soja/água destilada, para o caso da fenda, correspondente ao tempo de 0,20s para a velocidade de injeção de 0,1477 m/s. .... 104

Figura 59 – (A) Imagem da simulação do escoamento de óleo de soja/água destilada para a velocidade de injeção de 0,1477 m/s, sendo em cinza a superfície que define a interface (fração de volume óleo de 0,5); em escala de cores, o plano central exhibe o campo de velocidades, e em preto aparecem os vetores de velocidade proporcionais para o tempo de 0,55s. (B) Imagem experimental do escoamento de óleo de soja/água destilada para o caso da fenda, correspondente ao tempo de 0,55s para a velocidade de injeção de 0,1477m/s. .... 104

Figura 60 – Imagens da simulação do escoamento de óleo de soja/água destilada para a velocidade de injeção de 0,1477 m/s, sendo em cinza a superfície que define a interface (fração de volume óleo de 0,5); em escala de cores, o plano central exhibe o campo de velocidades, e em preto aparecem os vetores de velocidade proporcionais para os tempos de 0,75s e 1,00s. .... 105

Figura 61 - Imagens experimentais do escoamento de óleo de soja/água destilada, para o caso da fenda, correspondentes aos tempos de 0,75s e 1,00s para a velocidade de injeção de 0,1477 m/s. .... 106

Figura 62 - Imagens da simulação do escoamento de óleo lubrificante usado/água salina para a velocidade de injeção de 0,0106 m/s, sendo em preto a superfície que define a interface (fração de volume óleo de 0,5); em escala de cores, o plano central exhibe o campo de velocidades, e em cinza aparecem os vetores de velocidade proporcionais para os tempos de 0,45s e 0,80s. .... 107

Figura 63 – Imagens da simulação do escoamento de óleo lubrificante usado/água salina para a velocidade de injeção de 0,0106 m/s, sendo em



preto a superfície que define a interface (fração de volume óleo de 0,5); em escala de cores, o plano central exibe o campo de velocidades, e em cinza aparecem os vetores de velocidade proporcionais para os tempos de 0,95s e 1,05s. ....108

Figura 64 - Imagens experimentais, entre 3s a 5s, do escoamento de óleo lubrificante usado/água salina, para o caso da fenda, com velocidade de injeção de 0,0106m/s.....109



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Equações para o coeficiente de arraste para cada regime de escoamento.....	16
Tabela 2 - Valores de velocidade de injeção para testes fluidodinâmicos no sistema de vazamento bocal. ....	37
Tabela 3 - Valores de velocidade de injeção para testes fluidodinâmicos no sistema de vazamento fenda. ....	37
Tabela 4 – Tabela dos parâmetros utilizados para as simulações de injeção através do bocal. ....	54
Tabela 5 – Tabela dos parâmetros utilizados para as simulações finais de injeção através da fenda.....	55
Tabela 6 - Resultados das propriedades físico-químicas dos fluidos. ....	57
Tabela 7 - Resultados comparativos da redução da tensão interfacial entre sistemas com água destilada e água salina. ....	58
Tabela 8 - Resultados das medições de ângulo de contato do óleo de soja e aço inoxidável em água destilada.....	59
Tabela 9 - Resultados das medições de ângulo de contato do óleo de soja e aço inoxidável em água salina.....	59
Tabela 10 - Resultados das medições de ângulo de contato do óleo Spindura 10 e aço inoxidável submersos em água destilada. ....	60
Tabela 11- Resultados das medições de ângulo de contato do óleo lubrificante usado e aço inoxidável submersos em água salina.....	60
Tabela 12- Dados experimentais do diâmetro médio da gota com a velocidade de injeção. ....	62
Tabela 13 - Dados comparativos entre sistemas com e sem a presença de íons no meio contínuo para as diferentes velocidades. ....	62
Tabela 14 - Valores da altura média de gotejamento de óleo/desvio médio dos dados para as situações experimentais estudadas. ....	64
Tabela 15- Dados obtidos das avaliações das malhas. ....	67
Tabela 16 – Resultado dos testes de ângulo de contato para o atingimento do diâmetro médio da gota formada.....	72
Tabela 17 – Dados de Altura de gotejamento, Diâmetro médio da gota formada e Tempo entre liberação de gotas para a tensão interfacial $\sigma = 0,030$ N/m, para o sistema óleo de soja x água destilada com injeção através do bocal e velocidade de 0,225 m/s. ....	73
Tabela 18 – Dados de Altura de gotejamento, Diâmetro médio da gota formada e Tempo entre liberação de gotas para a tensão interfacial $\sigma = 0,035$ N/m, para o sistema óleo de soja x água destilada com injeção através do bocal e velocidade de 0,225 m/s. ....	74

Tabela 19 – Dados de Altura de gotejamento, Diâmetro médio da gota formada e Tempo entre liberação de gotas para a tensão interfacial  $\sigma = 0,036$  N/m, para o sistema óleo de soja x água destilada com injeção através do bocal e velocidade de 0,225 m/s..... 74

Tabela 20 – Dados de Altura de gotejamento, Diâmetro médio da gota formada e Tempo entre liberação de gotas para a tensão interfacial  $\sigma = 0,036$  N/m, para o sistema óleo de soja x água destilada com injeção através do bocal e velocidade de 0,333 m/s..... 80

Tabela 21 – Dados de Altura de gotejamento, Diâmetro médio da gota formada e Tempo entre liberação de gotas para a tensão interfacial  $\sigma = 0,038$  N/m, para o sistema óleo de soja x água destilada com injeção através do bocal e velocidade de 0,333 m/s..... 81

Tabela 22 – Dados de Altura de gotejamento, Diâmetro médio da gota formada e Tempo entre liberação de gotas para a tensão interfacial  $\sigma = 0,030$  N/m, para o sistema óleo de soja/água salina com injeção através do bocal e velocidade de 0,315 m/s..... 82

Tabela 23 – Dados de Altura de gotejamento, Diâmetro médio da gota formada e Tempo entre liberação de gotas para a tensão interfacial  $\sigma = 0,036$  N/m, para o sistema óleo de soja x água destilada com injeção através do bocal e velocidade de 0,446 m/s..... 86

Tabela 24 – Dados de Altura de gotejamento, Diâmetro médio da gota formada e Tempo entre liberação de gotas para a tensão interfacial  $\sigma = 0,030$  N/m, para o sistema óleo Spindura 10 /água destilada com injeção através do bocal e velocidade de 0,236 m/s. .... 87

Tabela 25– Dados de Altura de gotejamento, Diâmetro médio da gota formada e Tempo entre liberação de gotas para a tensão interfacial  $\sigma = 0,030$  N/m, para o sistema óleo lubrificante usado/água salina com injeção através do bocal e velocidade de 0,177m/s. .... 91

## LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Descrição	Unidade
$F_a$	Força de arraste	N
$F_g$	Força da gravidade	N
$A_n$	Área normal à superfície da gota	$m^2$
$A_p$	Área projetada da gota	$m^2$
$C_d$	Coefficiente de arrasto	ad
$D_E$	Distância de $D_S$ ao ápice da gota	m
$D_S$	Diâmetro máximo da gota	m
$D_{wi}$	Distância à interface	m
$F_1$	Força de inércia	N
$F_{ext}$	Força de volume	N
$F_E$	Força de empuxo	N
$F_r$	Força resultante	N
$F_{stat}$	Força devido à diferença de pressão estática	N
$F_\sigma$	Força de Tensão Interfacial	N
$I_{max}$	Intensidade máxima de luz	cd
$I_{min}$	Intensidade mínima de luz	cd
$I_{threshold}$	Intensidade de luz	cd
$K_t$	Massa específica após a correção	$Kg/m^3$
$P_c^0$	Pressão estática do fluido contínuo	Pa
$P_d^0$	Pressão estática do fluido disperso	Pa
$R_0$	Raio de curvatura no vértice da gota	m
$Re_p$	Reynolds da partícula	ad
$T_0$	Temperatura de referência	K
$V_i$	Volume (o subscrito refere-se ao fluido $i$ contínuo ou disperso)	$m^3$
$a_r$	Aceleração resultante	$m/s^2$
$d_{gota}$	Diâmetro da gota	m
$d_n$	Diâmetro do “pescoço” da gota	m
$f_{mix}$	Função da densidade de energia livre da mistura	$J/m^3$
$f_{tot}$	Função da densidade total de energia livre	$J/m^3$
$m_i$	Massa (o subscrito refere-se ao fluido disperso ou contínuo)	Kg
$u_i$	Velocidade (o subscrito refere-se ao fluido disperso ou contínuo)	m/s
$u_r$	Velocidade resultante	m/s
$\mu_i$	Viscosidade dinâmica (o subscrito refere-se ao fluido disperso ou contínuo)	Pa*s

$\rho_i$	Massa Específica (o subscrito refere-se ao fluido disperso ou contínuo)	$\text{Kg/m}^3$
$g$	Aceleração da Gravidade	$\text{m/s}^2$
$\gamma$	Coefficiente de dilatação volumétrica do vidro	$\text{K}^{-1}$
$h$	Altura	$\text{m}$
$h_{max}$	Tamanho máximo do elemento da malha	$\text{m}$
$p$	Pressão	$\text{Pa}$
$r$	Raio	$\text{m}$
$S$	Parâmetro adimensional na direção $\theta$	$\text{ad}$
$t$	Tempo	$\text{s}$
$X$	Parâmetro adimensional na direção $x$	$\text{ad}$
$Y$	Parâmetro adimensional na direção $y$	$\text{ad}$
$\Phi$	Função <i>Level set</i>	-
$C$	Integral da função característica do fluido do volume de controle (VOF)	-
$G$	Potencial químico	$\text{J/mol}$
$I$	Matriz identidade	-
$Re$	Número de Reynolds	$\text{ad}$
$T$	Temperatura de medição	$\text{K}$
$n$	Vetor unitário normal	-
$F$	Fração de intensidade de luz	-
$T$	Matriz transposta	-
$\alpha$	Vetor resultante do somatório dos vetores normais nas direções $x$ , $y$ e $z$	-
$\beta$	Fator de forma	-
$\gamma$	Parâmetro de reinicializações da função <i>Level set</i>	$\text{m/s}$
$\delta$	Função delta Dirac	-
$\varepsilon$	Parâmetro aproximado da espessura da interface	$\text{m}$
$\theta$	Ângulo de contato	$^\circ$
$\kappa$	Curvatura média da interface	$\text{m}^{-1}$
$\lambda$	Densidade de energia livre da mistura	$\text{J/m}^3$
$\sigma$	Coefficiente de tensão superficial	$\text{N/m}$
$\varphi$	Proporção $D_s/D_E$	$\text{ad}$
$\psi$	EDP de segunda ordem da interface ( <i>Phase field</i> )	-
$\phi$	Função <i>Phase field</i>	-

---

ad: Unidade adimensional.

- não se aplica

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
1.1. Objetivos Gerais.....	4
1.2. Objetivos Específicos.....	4
1.3. Estrutura do Trabalho.....	6
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>7</b>
2.1. Sistema Multifásico.....	7
2.2. Aspectos Fenomenológicos e Principais Parâmetros Físico-Químicos dos Fluidos Água e Óleo.....	8
2.3. Formação da Gota.....	10
2.4. Escoamento Ascendente.....	13
2.5. Simulação Computacional.....	18
2.5.1. Método de Volume de Fluidos- VOF.....	19
2.5.2. Método Phase field.....	21
2.6. Comentários Finais- Capítulo 2.....	27
<b>3. MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>29</b>
3.1. Etapa Experimental.....	29
3.1.1. Avaliação de Propriedades Físico-Químicas dos Fluidos.....	29
3.1.1.1. Determinação da Tensão Interfacial.....	29
3.1.1.2. Ângulo de Contato.....	33
3.1.1.3. Determinação da Viscosidade.....	34
3.1.1.4. Determinação da Massa Específica.....	34
3.1.2. Análise Fluidodinâmica Experimental.....	35
3.1.2.1. Bancada Experimental.....	35
3.1.2.2. Procedimentos e Parâmetro de Operações.....	36
3.1.2.3. Avaliações Realizadas.....	37
3.2. Etapa de Modelagem.....	38
3.2.1. Método de Acompanhamento da Interface.....	38
3.2.1.1. Equações de Transporte e do Método Level set.....	38
3.2.2. Método dos Elementos Finitos.....	41
3.2.3. Geometria.....	45
3.2.4. Propriedades dos Fluidos.....	47
3.2.5. Condições Iniciais e de Contorno.....	47
3.2.6. Malha.....	51
3.2.6.1. Estudo de Malha.....	51
3.2.6.2. Malha Utilizada.....	52
3.2.7. Simulações.....	53
<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>	<b>57</b>

4.1. Propriedades Físico-químicas Avaliadas dos Fluidos.....	57
4.2. Variação do Diâmetro de Gota para os Sistemas Experimentais	61
4.3. Etapa de Modelagem e Simulação.....	66
4.3.1. Estudo de Malha.....	67
4.3.2. Análise Comparativa Entre Experimental e Simulação da Formação da Gota .....	69
4.3.3. Ajuste dos Parâmetros de Simulação e Imagens Comparativas	70
4.3.3.1. Bocal Cilíndrico .....	72
4.3.3.1.1. Sistema Óleo de Soja/ Água Destilada Para a Velocidade de Injeção de 0,225m/s .....	73
4.3.3.1.2. Sistema Óleo de Soja- Avaliação da Alteração do Meio Contínuo Para a Velocidade de Injeção de 0,3m/s .....	79
4.3.3.1.3. Sistema óleo de Soja/ Água Destilada Para a Velocidade de Injeção de 0,446m/s .....	85
4.3.3.1.4. Sistema óleo de Spindura 10/ Água Destilada Para a Velocidade de Injeção de 0,236m/s .....	87
4.3.3.1.5. Sistema Óleo de Lubrificante Usado/ Água Salina Para a Velocidade de Injeção de 0,177m/s .....	91
4.3.3.1.6. Visualização da Intensidade de Recirculação do Meio Contínuo Para a Velocidade de Injeção de 0,2m/s .....	94
4.3.3.2. Bocal em Forma de Fenda.....	95
4.3.3.2.1. Sistema Óleo de Soja/ Água Destilada Para a Velocidade de Injeção de 0,0554m/s.....	96
4.3.3.2.2. Sistema Óleo de Soja/ Água Destilada Para a Velocidade de Injeção de 0,1477m/s .....	102
4.3.3.2.3. Sistema Óleo Lubrificante Usado/ Água Salina Para a Velocidade de Injeção de 0,0106m/s .....	106
<b>5. CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>111</b>
<b>6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>115</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>117</b>





## 1. INTRODUÇÃO

O contexto mundial relacionado ao meio ambiente vem mudando sensivelmente nas últimas décadas. Apesar de existir quantidade de água suficiente para consumo, é necessária a preservação, seu uso racional e sustentável evitando assim, sua escassez. A preocupação com a preservação dos recursos naturais não renováveis, especialmente a água, tem incentivado campanhas contra a poluição de rios e oceanos, visando à melhoria da qualidade dos efluentes lançados nos corpos receptores (HENRIQUE, 2008).

A utilização de água pela indústria pode ocorrer de diversas formas, tais como: incorporação ao produto; lavagens de máquinas, tubulações e pisos; água de sistemas de resfriamento e geradores de vapor; água utilizada diretamente nas etapas do processo industrial ou incorporada aos produtos; esgotos sanitários dos funcionários. Exceto pelo volume de água incorporado aos produtos e pelas perdas por evaporação, as águas tornam-se contaminadas por resíduos do processo industrial ou pelas perdas de energia térmica, originando assim os efluentes líquidos (GIORDANO, 2004).

A produção de petróleo e gás é acompanhada de uma significativa quantidade de água, normalmente conhecida como água produzida, a qual corresponde ao rejeito de maior volume em todo o processo de exploração e produção de petróleo. Durante a vida econômica de um poço de petróleo, o volume de água pode chegar a exceder dez vezes o volume de óleo (HENDERSON et al., 1999). A poluição da água com óleo e outras substâncias orgânicas é um problema em muitos tipos de indústrias. Uma pequena quantidade de óleo é suficiente para contaminar um grande volume de água, e estes efluentes têm elevado custo de tratamento (KOREN et al., 1995).

Por outro lado, no processo de produção de petróleo, um dos contaminantes mais indesejados é a água. A quantidade da água produzida associada aos hidrocarbonetos varia em função de uma série de fatores, como as características do reservatório de onde os fluidos são produzidos, a idade dos poços produtores e os métodos de recuperação utilizados (THOMAS, 2001; FREITAS et al., 2007).

A indústria petrolífera brasileira, mais do que nunca, direciona sua atenção para a exploração de petróleo *offshore*, isso acontece pela grande reserva do pré-sal. Segundo José Formigli, diretor de Exploração e Produção da Petrobrás, no ano de 2013 o pré-sal respondia por cerca de 7% da produção da empresa e a previsão é que em 2017 este percentual atinja 42%.

A exploração em profundidade está sujeita a condições de alta pressão, baixas temperaturas e salinidade. Algumas propriedades como viscosidade, tensão interfacial e densidade interferem diretamente na instabilidade fluidodinâmica dos escoamentos óleo/água. No caso de vazamentos, o estudo destas propriedades e dos padrões de escoamento resultantes é de extrema importância para o conhecimento do comportamento fluidodinâmico, dos perfis de escoamento formados e no desenvolvimento de simuladores que facilitem a remediação, captura e até possibilitem o aproveitamento do petróleo vazante.

A contaminação do meio ambiente por vazamento de petróleo pode se dar de várias formas, sendo divididas como naturais e acidentais. Os derramamentos naturais, contam principalmente com o fenômeno de exsudação, que provoca o vazamento de petróleo pela migração do óleo até a superfície do solo através de falhas, fendas e migração por meios porosos. Estes processos ocorrem de forma natural, por diferença de pressão, e podem ser facilitados quando ocorre a abertura de fendas por abalos sísmicos, Thomaz et al., (2008).

Segundo Cabral e Teixeira, (2012), um acidente é resultado do alinhamento de falhas operacionais, decisões gerenciais inadequadas e barreiras de segurança degradadas. Desta forma, os vazamentos acidentais podem ter diversas origens e podem ser provocados desde a perfuração até a fase de produção.

Todos os tipos de vazamentos submarinos de petróleo têm se constituído em sério problema. As multas e indenizações impostas pelos governos em decorrência dos prejuízos resultantes dos acidentes, somados aos custos relacionados às medidas mitigadoras motivam a procura por formas mais eficazes de combate a vazamentos. Ainda mais importantes do que as perdas econômicas, existe o grande impacto ambiental, causando danos à fauna, à flora e aos ambientes naturais (praias, recifes, manguezais, etc.) (FELLER, 2012).

Os riscos também são iminentes no transporte de petróleo por dutos, onde existem variações de pressão no sistema de escoamento resultantes de diferentes elevações do terreno, de velocidade de escoamento e de fricção, além de uma variedade de conexões, curvas e variações abruptas de área. Esses fatores podem causar rupturas nos dutos, gerando vazamentos (FREITAS et al., 2007).

Outra possibilidade de descargas de petróleo submarino inclui contribuições de oleodutos rompidos devido à corrosão. Devido às tubulações submarinas estarem sujeitas a um ambiente muito agressivo, o processo de corrosão é acelerado. Isto leva a uma fragilização do material que compõe os dutos, podendo causar o rompimento dos mesmos. Este rompimento pode se dar por *pits* de corrosão, rompimento da solda axial ou pela ancoragem do duto em virtude da irregularidade do solo onde o mesmo se encontra apoiado. Correntes marítimas fortes associadas ou não a efeitos sísmicos também podem causar esforços excessivos sobre o duto, levando ao rompimento do mesmo (PERGHER et al., 2011).

Quando um duto submarino rompe, o hidrocarboneto contido em seu interior é expulso devido à elevada pressão no interior da tubulação, necessária para o deslocamento do fluido através de grandes distâncias. Essa descarga inicial muitas vezes apresenta o comportamento fluidodinâmico característico de um jato/pluma. Passada a fase inicial, seu comportamento pode ser descrito pelas equações de advecção-difusão. A extensão do comportamento do jato/pluma depende de fatores como a taxa de vazamento, da geometria e tamanho do furo, além das características do petróleo e do ambiente (LIST, 1982; DALING et al., 2003).

No ambiente subaquático, fatores como temperatura, pressão e salinidade reinantes afetam propriedades como viscosidade, tensão interfacial e densidade, interferindo diretamente na estabilidade hidrodinâmica do escoamento quando se estuda o fluxo bifásico de líquidos imiscíveis (MARIANO, 2008).

A movimentação ou distribuição de um fluido é ocasionada pelo cisalhamento, definido como a força necessária para causar o movimento de uma camada do fluido. Quanto maior a viscosidade de um fluido, maior é o cisalhamento necessário para movimentá-lo, e tal viscosidade é dependente da velocidade da transferência da quantidade

de momento molecular e da coesão, sendo esta última diretamente proporcional à viscosidade e inversamente proporcional à temperatura (FOX e MC DONALD, 1992). Portanto, essa propriedade pode influenciar na taxa de vazamento, assim como a temperatura no ambiente subaquático poderá modificá-la de forma significativa.

Neste contexto, é de grande importância que se compreenda o escoamento imiscível óleo/água, as forças que atuam na formação da gota frente à velocidade de vazamento e seu comportamento fluidodinâmico no movimento de ascensão, bem como os fatores que influenciam no escoamento, a fim de desenvolver futuramente um simulador que auxilie nas tomadas de decisão em casos de vazamento, tanto acidental como natural.

### **1.1. Objetivos Gerais**

Desenvolver um estudo teórico/experimental do vazamento de óleo em meio subaquático no que tange aos aspectos de formação da gota e comportamento fluidodinâmico do escoamento bifásico de um sistema óleo/água. Representar as situações físicas deste estudo por meio da fluidodinâmica computacional (CFD) tridimensional, com o auxílio de um *software* com plataforma *multiphysics*, a fim de contribuir para o domínio da modelagem e simulação desse tipo de sistema e futuro desenvolvimento de um simulador que possa ser utilizado em situações reais de escoamento de óleo subaquático, quer no contexto operacional quer em eventos naturais ou induzidos pela atividade exploratória, como o fenômeno da exsudação.

### **1.2. Objetivos Específicos**

- Realizar um levantamento bibliográfico, através de pesquisa em artigos científicos e livros que abordem os aspectos fenomenológicos e de fluidodinâmica, bem como os fatores e propriedades físico-químicas que influenciam o escoamento imiscível óleo/água.

- Avaliar as propriedades físico-químicas dos fluidos utilizados no estudo. Determinar a tensão interfacial, ângulo de contato, densidade e viscosidade desses fluidos é imprescindível para o respaldo físico do modelo, bem como dos resultados de simulação a serem obtidos.

- Avaliar a influência da velocidade de injeção e da alteração do meio contínuo, no diâmetro da gota formada, altura de gotejamento e tempo entre liberação de gotas para os sistemas experimentais.

- Desenvolver um estudo experimental do vazamento de óleo em meio subaquático através de modelos físicos que permitam a avaliação qualitativa e quantitativa das condições de escoamento bifásico e dos aspectos fenomenológicos que envolvem o sistema sob estudo. Estes modelos físicos serão apresentados com duas geometrias de injeção: a primeira através de um bocal cilíndrico, sendo este testado para três velocidades de injeção e o segundo, através de um bocal em forma de fenda, testado para duas velocidades de injeção, nos moldes de vazamentos que podem acontecer no fundo do mar.

- Testar experimentalmente três óleos, (óleo de soja, óleo Spindura 10 e óleo lubrificante usado) como meio disperso e dois meios contínuos, água salina 3,5% de cloreto de sódio e água destilada.

- Realizar a simulação CFD tridimensional do escoamento bifásico óleo/água utilizando uma plataforma *multiphysics*, buscando reproduzir corretamente o comportamento fluidodinâmico observado nos ensaios experimentais. Para tanto sendo necessário:

- Realizar um estudo de malha para determinar o número de elementos necessários ao domínio do escoamento multifásico sem exceder os recursos computacionais disponíveis;

- Avaliar o modelo desenvolvido quanto à capacidade de representar de forma correta a formação de uma gota a partir de um bocal cilíndrico;

- Realizar testes de sensibilidade do modelo simulado quanto à alteração do ângulo de contato óleo/água sobre uma superfície metálica (aço cirúrgico), comparando-se com o valor experimental;

- Ajustar a tensão interfacial a ser utilizada na simulação de cada sistema para que represente quantitativamente o diâmetro da gota formada, altura de gotejamento e tempo entre liberação de gotas, encontrados nos experimentos.

- Realizar uma avaliação qualitativa entre imagens experimentais e geradas das simulações, para cada sistema estudado.

- Comparar o comportamento fluidodinâmico entre simulações, fazendo-se variar somente o meio contínuo do sistema.

### **1.3. Estrutura do Trabalho**

Este trabalho está dividido em seis capítulos. O presente capítulo traz, de forma sucinta, a exposição do tema abordado, onde se encontram: a motivação para a realização do estudo e seus objetivos.

O capítulo 2 traz uma revisão dos fundamentos teóricos relacionados aos estudos da fenomenologia do escoamento bifásico envolvendo vazamento de óleo em um meio subaquático, bem como uma exposição teórica sobre a simulação computacional e seus parâmetros de interesse.

Para facilitar a compreensão, o capítulo 3 é dividido em etapa experimental e etapa de simulação, onde são descritas as metodologias utilizadas para cada etapa deste estudo.

O capítulo 4 apresenta dos resultados e discussões acerca das avaliações pertinentes com relação aos experimentos e a proximidade dos resultados apresentados para o comportamento fluidodinâmico das simulações. Neste também são apresentados, aspectos difíceis de serem visualizados e quantificados experimentalmente, que se denotam através das simulações, como a intensidade e direção dos fluxos de escoamento dos fluidos envolvidos.

O capítulo 5 apresenta as considerações finais do estudo, no capítulo 6 são apresentadas as sugestões para trabalhos futuros. E por fim, no capítulo 7 listam-se as referências utilizadas no presente documento.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O presente capítulo é dedicado a expor conteúdos que ajudem na compreensão e embasamento do presente trabalho. Apresentará uma síntese sobre os escoamentos multifásicos, tendo um maior aprofundamento sobre os aspectos, características e propriedades do escoamento bifásico óleo/água. Também trará informações importantes sobre os materiais a serem utilizados e o conteúdo necessário para o entendimento das simulações computacionais que foram desenvolvidas.

### 2.1. Sistema Multifásico

Sistema multifásico é uma região do espaço onde coexistem dois ou mais fluidos imiscíveis separados por uma interface, podendo ser esta conexa (escoamento estratificado, anular, dentre outros.) ou desconexa (escoamento de bolhas, gotas etc.) ou uma combinação de ambos os casos onde a mesma fase pode aparecer em forma contínua ou dispersa (padrão anular com gotas, dentre outros.), (SOO, 1995).

Escoamentos multifásicos podem ser encontrados em diversos ramos da indústria, como nas indústrias química, alimentícia, de conversão de energia, processamento de materiais e indústria do petróleo e gás. Em particular, na indústria petrolífera, o escoamento de duas ou mais fases, é mais comumente encontrado que os próprios escoamentos monofásicos.

Os principais componentes do escoamento multifásico são água e óleo, que formam um sistema heterogêneo e imiscível, composto por duas fases, apresentando entre elas uma fronteira chamada de interface, que define a região de separação entre as duas fases. As interfaces são zonas anisotrópicas, em que as propriedades estruturais e dinâmicas são muito diferentes das propriedades do seio das fases. A espessura da interface pode se apresentar bem definida, atingindo espessuras de poucos milímetros até alguns microns- (MARIANO, 2008).

Segundo Wörner- (2003), fase é a definição termodinâmica para o estado da matéria que pode ser sólido, líquido ou gasoso. Em um escoamento multifásico, uma ou mais fases fluem simultaneamente. Tais fases podem ser constituídas de uma única espécie química, como



fluxo de água e vapor d'água, ou mais de uma espécie química, como água e óleo.

## **2.2. Aspectos Fenomenológicos e Principais Parâmetros Físico-Químicos dos Fluidos Água e Óleo**

O presente trabalho estuda um sistema bifásico, líquido – líquido, sendo os fluidos água e óleo. As propriedades físico-químicas mais relevantes consideradas para este sistema foram densidade, viscosidade, e tensão interfacial. As interfaces são zonas anisotrópicas, em que as propriedades estruturais e dinâmicas são diferentes das propriedades do seio das fases. A espessura da interface pode se apresentar bem definida, atingindo espessuras de poucos milímetros ou mesmo alguns micra (MARIANO, 2008).

As principais ocorrências referentes à indústria petroquímica como a recuperação secundária de petróleo, o bombeamento de óleos de viscosidade elevada mediante a injeção conjunta de água, e até mesmo acidentes envolvendo rompimento de dutos submersos e vazamentos tanto naturais como acidentais exemplificam situações em que o conhecimento do comportamento de escoamentos água/óleo se faz necessário, tanto para a eficiência da produção quanto para a remediação e quantificação de danos ambientais.

A força envolvida no deslocamento das fases água/óleo é a diferença de densidades entre os líquidos. A densidade e salinidade da água são propriedades extremamente importantes para o estudo de vazamentos em sistemas imiscíveis ou parcialmente miscíveis, a densidade por ser a força motriz deste fenômeno de escoamento e a salinidade por influenciar de forma direta a tensão interfacial. Estas propriedades podem sofrer variações no ambiente marinho, provocadas pela profundidade do espelho de água.

A movimentação ou distribuição de um fluido é ocasionada pelo cisalhamento, definido como a força necessária para causar o movimento de uma camada do fluido. Quanto maior a viscosidade de um fluido, maior é o cisalhamento necessário para movimentá-lo, e tal viscosidade é dependente da velocidade da transferência da quantidade de momento molecular e da coesão, sendo esta última diretamente proporcional à viscosidade e inversamente proporcional à temperatura

(FOX e MC DONALD, 1992). Assim, a viscosidade do fluido tem grande influência na taxa de vazamento, bem como a temperatura no ambiente subaquático que tem influência diretamente proporcional, podendo modificá-la de forma significativa.

A tensão interfacial é o mais importante parâmetro na descrição de fenômenos interfaciais e é definida como a quantidade mínima de trabalho necessário para aumentar a área interfacial por unidade de área. A origem de forças tensivas no limite entre duas fases é atribuída ao seu caráter anisotrópico resultante da ausência de uniformidade em termos de número e de distribuição de moléculas na interface. A tensão interfacial, em misturas água/óleo, é o principal fator na imiscibilidade dos fluidos (SANTOS, 2003).

Na interface de separação entre dois líquidos imiscíveis ou entre um líquido e um gás forma-se uma força de atração entre as moléculas, denominada de tensão interfacial (NBR 6234, 1965). Essa propriedade é afetada pela presença de substâncias polares, mesmo em pequenas quantidades, pois estas além de afetar as propriedades elétricas do óleo, possuem centros ativos que aceleram o seu envelhecimento. A medida da tensão interfacial é representada pela força necessária para que um anel de platina rompa a interface água/óleo (GODINHO, 2009).

Para alguns sistemas água-óleo a medida desse parâmetro visa exatamente inferir a quantidade de substâncias polares presentes no óleo, uma vez que tais substâncias tendem a concentrar-se na interface do sistema. Quanto maior a concentração de substâncias polares, menor o valor da tensão interfacial. Dessa forma, a quantificação dessa propriedade é utilizada como um meio de avaliar e monitorar o estado de oxidação do óleo (KIM e BURGESS, 2001). Todas as propriedades acima citadas sofrem influência direta da temperatura em sua avaliação, refletindo, portanto, no comportamento fluidodinâmico do sistema, como estudado por Abramovič et al.(1998); Hempoonsert et al.(2010) e Dzida e Prusakiewicz (2008).

No presente trabalho foram utilizados três tipos de óleos distintos como fase dispersa: o óleo de soja comercial, óleo Spindura 10 (utilizado como lubrificante industrial) e óleo lubrificante automotivo usado, este óleo foi escolhido por testes realizados em projetos anteriores que apresentaram comportamento desejado para o presente trabalho. Já para a fase contínua foram utilizadas: água destilada e água

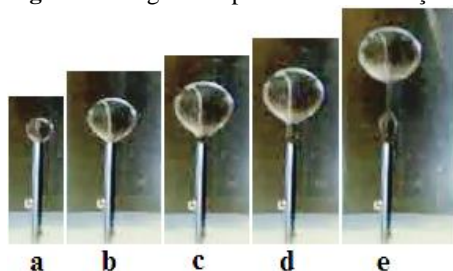
salina 3,5% (m/m), (salinidade média do mar), (ALVES, 2006). Suas propriedades físico-químicas como densidade, viscosidade e tensão interfacial são apresentadas no item 4.1 deste documento e as metodologias empregadas são descritas no item 3.1.1 do mesmo.

### **2.3. Formação da Gota**

Uma melhor compreensão da formação de gotas e desprendimento de um poro ou capilar pode ser utilizada para melhorar muitos processos industriais, incluindo reações químicas e processos de combustão e emulsificação. Gotas podem ser formadas em processos que envolvam micro canais, bocal ou poros numa membrana. Apesar de as gotas formadas geralmente dispersarem em outro líquido imiscível que flui ao redor da formação da gota, alguns modelos focalizam na formação da gota de um líquido em um líquido imiscível (TIMGREN et al., 2007).

A criação de gotas a partir de um capilar ou bocal envolve quatro passos principais como ilustrado na Figura 1: (1) a formação de gotas, em que a fase dispersa é forçada para fora do capilar (Figura 1a), (2) o crescimento da gota na abertura do bocal (Figura 1b), (3) a formação de um prolongamento (pescoço) na base da gota (Figura 1c) e (4) o desprendimento, quando a gota se desprendendo da fase de origem, movendo-se ascendentemente através da fase contínua (Figura 1d), (TIMGREN et al., 2007).

**Figura 1**-Imagens do processo de formação da gota.

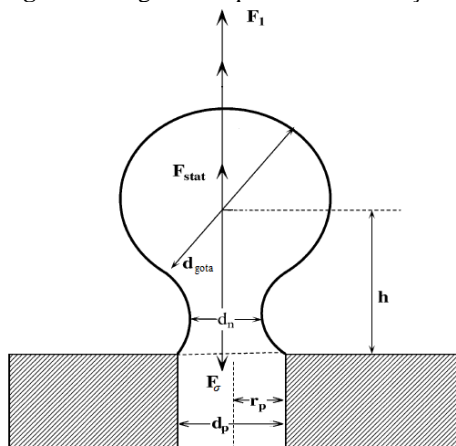


Fonte: Autora.

A formação e o desprendimento de uma gota de líquido em um líquido imiscível têm sido modelado através da dinâmica de fluidos computacional (CFD), por diferentes pesquisadores (ABRAHAMSE et al., 2001; KOBAYASHI et al., 2004; KOBAYASHI, 2007 e LI et al., 2012).

Considerando a liberação de uma gota de óleo através de um bocal cilíndrico a uma velocidade  $u_i$ , em um meio contínuo aquoso inicialmente estagnado, as principais forças que atuam sobre uma gota antes da sua separação, estão esquematicamente representadas na Figura 2.

**Figura 2**-Diagrama esquemático das forças atuantes na gota.



Fonte: Adaptado de XU et al.(2005).

As forças são descritas segundo as equações 1 a 11(ZHI et al., 1999 e PENG et al., 1999):

- Força de Tensão Interfacial  $F_\sigma$ , (Eq. 1)

$$F_\sigma = \pi d_n \sigma \quad \text{Eq. 1}$$

onde  $d_n$  é o diâmetro do pescoço (Figura 2) e  $\sigma$  é a tensão interfacial (N/m)

- diferença de pressão estática, força  $F_{Stat}$ , força devido à diferença de pressão estática entre o interior,  $P_d^0$  e o exterior da gota,  $P_c^0$ , (Eq. 2):

$$F_{Stat} = (P_d^0 - P_c^0)A_n \quad \text{Eq. 2}$$

onde  $A_n$  é a área normal à superfície da gota.

Em estado quasi estacionário (equilíbrio estático), (Eq. 3):

$$P_d^0 - P_c^0 = \Delta P_\sigma = \frac{4\sigma}{d_{gota}} \quad \text{Eq. 3}$$

Das equações 2 e 3, obtém-se a Eq. 4:

$$F_{Stat} = \frac{4\sigma}{d_{gota}} \frac{\pi}{4} d_n^2 = F_\sigma \frac{d_n}{d_{gota}} \quad \text{Eq. 4}$$

A força  $F_{Stat}$  está alinhada com a força  $F_\sigma$ , assim, das equações. 1 e 4, obtém-se a Eq. 5

$$F_\sigma - F_{Stat} = F_\sigma \left(1 - \frac{d_n}{d_{gota}}\right) = \pi d_n \gamma \left(1 - \frac{d_n}{d_{gota}}\right) \quad \text{Eq. 5}$$

Sendo  $d_n$  assumido o mesmo que o diâmetro  $d_p$  do bocal ou o comprimento do lado do bocal, o que é inferior  $d_{gota}$ , assim,  $F_\sigma - F_{Stat}$  é positivo. Portanto, a direção da força resultante até aqui aponta para o interior do bocal.

- $F_E$  Força de Empuxo, (Eq. 6):

$$F_E = \rho_c V_d g \quad \text{Eq. 6}$$

onde  $V_d$  é o volume da gota.

- Força de Inércia  $F_1$ , (Eq 7) (ZHI et al., 1999):

$$F_1 = \int_{AN} \rho_d u_d^2 dA = \frac{\pi}{4} \rho_d u_d^2 d_n^2 \quad \text{Eq. 7}$$

Dentre essas forças,  $F_\sigma$  é uma força de retenção, enquanto  $F_{Stat}$ ,  $F_E$  e  $F_1$  são forças que promovem o destacamento da gota. O aumento em  $F_\sigma - F_{Stat}$  irá aumentar o diâmetro das gotas no momento do destacamento, ao passo que o aumento da  $F_E$  e  $F_1$  irá diminuir o diâmetro das gotas.

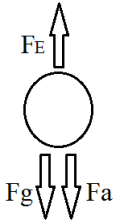
## 2.4. Escoamento Ascendente

No escoamento multifásico, o movimento de todas as fases é de interesse (WÖRNER, 2003).

Os escoamentos imiscíveis podem ocorrer em sistemas bifásicos, trifásicos com fases distintas ou não, como gás – líquido e líquido – líquido. O presente trabalho visa o estudo de um sistema bifásico, líquido – líquido, água/óleo, sendo as principais propriedades físicas consideradas são: densidade, viscosidade e tensão interfacial. Os valores, principalmente dessas duas últimas propriedades, podem apresentar grande variação com a temperatura e a pressão do meio a que estão expostos (MARIANO, 2008).

Diferentes configurações para escoamento de dois líquidos imiscíveis são estudadas. Na literatura, os regimes destes sistemas são classificados em dois grandes grupos, dependendo de qual fluido constitui a fase contínua, aparecendo assim os regimes baseados em óleo (*oil based*) e os baseados em água (*water based*) onde as fases contínuas são o óleo ou a água, respectivamente. No caso da ascensão de gotas em direção à superfície, temos determinadas forças atuantes que promovem o deslocamento, estas são ilustradas na Figura 3.

**Figura 3** – Ilustração das forças atuantes em uma gota de óleo submersa em água.



Fonte: Autora.

Assim tem-se:

- *Força de Empuxo*  $F_E$ , (Eq. 8):

Esta força atua na direção do movimento ascendente da gota.

$$F_E = \rho_c V_d g \quad \text{Eq. 8}$$

onde:  $\rho_c$  é a massa específica da fase contínua e  $g$  é a aceleração da gravidade (9,81m/s).

- *Força Gravitacional*  $F_g$ , (Eq. 9):

$$F_g = \rho_d V_d g \quad \text{Eq. 9}$$

onde:  $\rho_d$  é a massa específica da fase dispersa,  $V_d$  é o volume da gota e  $g$  é a aceleração da gravidade.

- *Força de Arraste*  $F_a$ , (Eq. 10):

$$F_a = \frac{1}{2} \rho_c A_p C_d u_r^2 \quad \text{Eq. 10}$$

onde:  $C_d$  é o coeficiente de arrasto,  $A_p$  é a área projetada da gota e  $u_r$  é a velocidade terminal da gota em ascensão.

A força resultante será Eq. 11, e expandindo Eq. 12:

$$F_r = F_E - F_g - F_a \quad \text{Eq. 11}$$

$$m_d a_r = (\rho_c V_d g) - \left( \frac{1}{2} \rho_c A_p C_d u_r^2 \right) - (\rho_d V_d g) \quad \text{Eq. 12}$$

Sendo  $m_d$  a massa da gota e  $a_r$  a aceleração resultante. Para o cálculo da velocidade terminal sendo,  $a_r = 0$ .

Rearranjando e isolando  $u_r$ , tem-se Eq. 13:

$$u_r = \sqrt{\frac{2(\rho_c - \rho_d)V_d g}{\rho_c A_p C_d}} \quad \text{Eq. 13}$$

No caso de uma gota esférica, tem-se Eq. 14 e Eq. 15:

$$A_p = \frac{\pi}{4} d_{gota}^2 \quad \text{Eq. 14}$$

e

$$V_d = \frac{\pi}{6} (d_{gota})^3 \quad \text{Eq. 15}$$

Substituindo Eq.15 e 16 em Eq. 13, tem-se Eq. 16:

$$u_r = \sqrt{\frac{4 d_{gota} g (\rho_c - \rho_d)}{3 C_d \rho_c}} \quad \text{Eq. 16}$$

O coeficiente de arraste  $C_d$  (Eq. 17) é função do número de Reynolds da partícula  $Re_p$ , (Eq. 18):

$$Re_p = \frac{d_{gota} u_r \rho_c}{\mu_c} \quad \text{Eq. 17}$$

$$C_d = f(Re_p) \quad \text{Eq. 18}$$

De acordo com o tipo de regime de escoamento:



**Tabela 1** – Equações para o coeficiente de arraste para cada regime de escoamento.

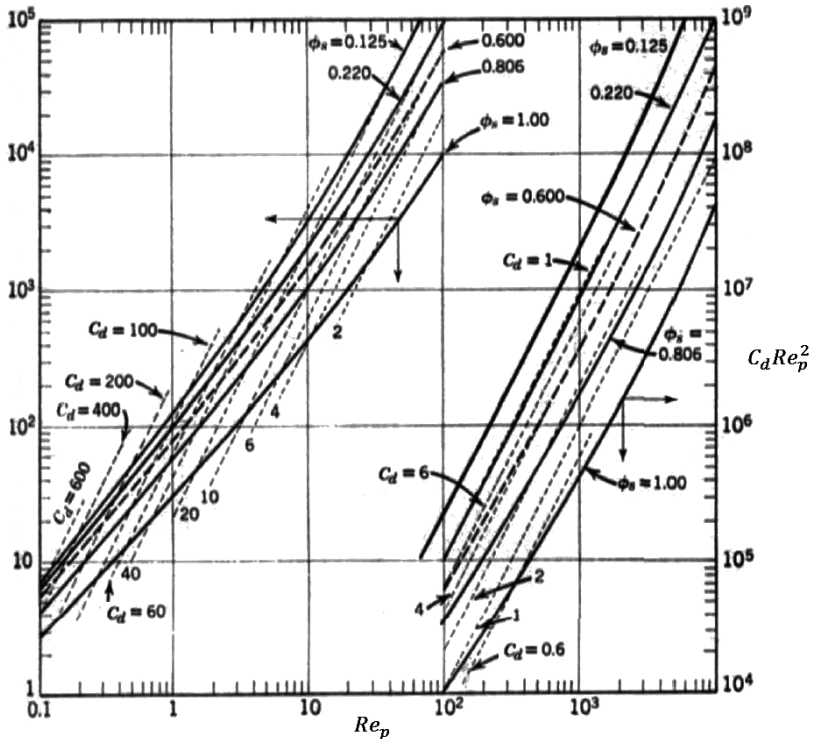
Regime Laminar (Eq. de Stokes)	$Re_p < 0,4$	$C_d = \frac{24}{Re_p}$
Regime Intermediário	$0,4 < Re_p < 500$	$C_d = \frac{10}{\sqrt{Re_p}}$
Regime Turbulento (Eq. Newton)	$500 < Re_p < 2 \times 10^5$	$C_d = 0,44$
Regime de Alta Turbulência	$Re_p > 2 \times 10^5$	$C_d = 0,2$

Fonte: McCABE et al.,2005.

#### Abordagens para o cálculo de $u_r$ .

Para encontrar a velocidade terminal  $u_r$ , calcula-se  $Re_p$ , para isso, aplicando-se um valor inicial para  $u_r$ , encontra-se no gráfico (Figura 5)  $Re_p$  vs.  $C_d Re_p^2$  um valor para  $C_d$ , este é aplicado na Eq. 17, encontrando-se um novo  $u_r$ . Este processo iterativo é continuado até encontrar-se consecutivamente o mesmo valor para  $u_r$ .

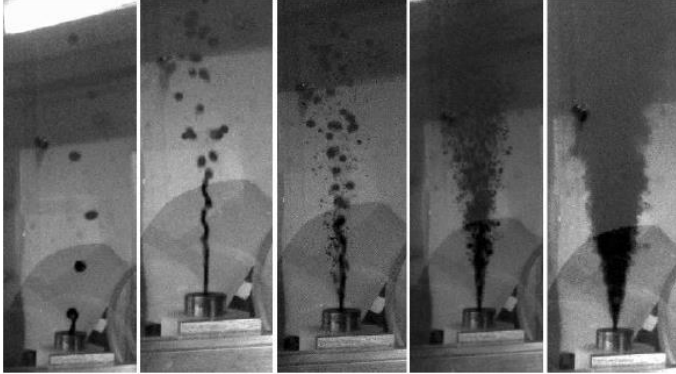
Figura 4 – Gráfico  $Re_p$  vs.  $C_d Re_p^2$ .



Fonte: McCABE et al.,2005.

Estudos realizados por Masutani e Adams (2001), ilustrados na Figura 5, mostram o comportamento fluidodinâmico experimental de petróleo em meio subaquático. Nesse caso, a velocidade de injeção de óleo foi aumentada, enquanto que as demais condições de operação foram mantidas constantes.

**Figura 5-** Experimentos de injeção de petróleo em meio subaquático com aumento gradativo da velocidade de injeção. Tamanho do orifício de 2 milímetros e temperatura de 18°C.



Fonte: Masutani e Adams, 2001.

Em baixa velocidade é produzida uma monodispersão de gotas próximo ao bocal de injeção, com diâmetros superiores à saída do bocal. Com o aumento da velocidade a altura de gotejamento se distancia do bocal de injeção e a coluna de óleo adquire uma instabilidade sinuosa, gerando uma polidispersão de gotas onde o diâmetro das gotas já apresenta variação perceptível.

Com o aumento da velocidade de injeção, ocorre a formação de um jato de óleo que torna-se instável e goteja próximo ao bocal. A liberação destas gotas provoca a formação de uma emulsão que causa diversas dificuldades na produção e transporte de petróleo.

## 2.5. Simulação Computacional

A modelagem computacional é de extrema importância em vários setores da engenharia. Além da resolução de problemas que analiticamente não têm resolução, a modelagem computacional conta com a agilidade de resolução de cálculos numéricos por métodos iterativos que, não seria possível ter uma resposta confiável a tempo para a resolução de problemas práticos da indústria. A busca por abordagens analíticas para problemas envolvendo vazamentos de óleo tem se tornado uma alternativa importante. Modelos computacionais

são comumente usados para tomar decisões relacionadas a controle e contenção de vazamentos de óleo durante emergências (YAPA e ZHEING, 1998).

As dificuldades na modelagem estão nos processos físicos de transferência que ocorrem através da interface, tais como transferência de quantidade de movimento, calor e massa, e troca de fases. As dificuldades numéricas surgem do fato de que as interfaces se movem, e determinadas grandezas são descontínuas através da interface, como densidade, viscosidade e pressão (WÖRNER, 2003).

Para o escoamento bifásico, o acompanhamento da interface é objeto de interesse. A resolução da interface simulada visa descrever em detalhes a sua deformação e evolução na separação entre os fluidos. A principal dificuldade da resolução da interface simulada é a interface móvel cuja forma é parte da solução. Lembrando que quantidades físicas como densidade, viscosidade e pressão são descontínuas ao longo da interface (WÖRNER, 2003).

Antes de se escolher uma *software* como ferramenta base, vários aspectos devem ser avaliados. Por exemplo, a facilidade de uso, a capacidade de gerar geometrias e malhas, a eficiência e robustez das técnicas numéricas implementadas e, por fim, a amplitude dos problemas físicos que o pacote pode resolver (SILVA, 2008). Atualmente diversos *softwares* de modelagem matemática e simulação são capazes de simular diferentes fenômenos físicos. Para a simulação de vazamentos de óleo no mar, estes *softwares* se tornam uma importante ferramenta que pode auxiliar no estudo do comportamento dos fluidos, (FELLER, 2012).

Existe ainda, uma gama de modelos e métodos para o acompanhamento da interface que tem sido aplicado a diferentes problemas computacionais de fluxo de fluidos. Neste trabalho foi utilizado o método *Level set* de acompanhamento da interface, que será apresentado no capítulo de Materiais e Métodos. Na sequência são apresentados alguns destes métodos.

### 2.5.1. Método de Volume de Fluidos- VOF

O *Volume of Fluid Method (VOF)* baseia-se no método de marcador de células (MAC). Os primeiros relatos do método conhecido

como VOF foram dados por Noh & Woodward (1976), onde a função fração  $C$  (Eq. 23) apareceu, embora a primeira publicação em um periódico foi feita por Hirt e Nichols (1981). O método VOF superou o MAC, diminuindo os requisitos de armazenamento computacional, rapidamente tornou-se popular. As primeiras aplicações incluem Torrey et al. de Los Alamos, que criou códigos VOF para a NASA (1985,1987). As primeiras implementações do VOF sofreram de descrição de imperfeita interface, que mais tarde foi sanada através da introdução de um cálculo de interface linear por partes, esquema PLIC. Usando VOF com PLIC é um padrão contemporâneo, usado em número de códigos de computador, como Gerris (*software*), ANSYS Fluent e STAR-CCM.

Na fluidodinâmica computacional, o método de fração de volume, VOF é uma técnica numérica para rastreamento e localização da superfície livre ou interface fluido-fluido. Pertence à classe dos métodos de Euler que são caracterizados por uma malha estacionária ou em movimento de forma prescrita para acomodar a forma evolutiva da interface. Como tal, VOF é um esquema advectivo, um esquema numérico, que permite ao programador controlar a forma e posição da interface. Sendo que as equações de Navier-Stokes que descrevem o movimento do fluido, devem ser resolvidas separadamente.

O método baseia-se na ideia da chamada função  $C$ , que é definido como a integral da função característica do fluido do volume de controle (ou seja- o volume de um elemento da malha computacional). Basicamente, quando o elemento está vazio, sem fluido rastreado no interior o valor de  $C$  é zero, quando o elemento está cheio,  $C = 1$ .  $C$  é uma função descontínua, o seu valor salta de 0 a 1 quando o argumento se move para o interior da fase rastreada.

A função  $C$  é escalar, e enquanto o fluido se move com velocidade  $v = (u(x, y, z), v(x, y, z), w(x, y, z))$  em três dimensões do espaço  $R^3$  a cada partícula de fluido mantém a sua identidade, então a derivada da função substancial  $C$  é igual a zero, (Eq. 19):

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \cdot \nabla C = 0 \quad \text{Eq. 19}$$

A equação 19 não pode ser facilmente resolvida diretamente, uma vez que  $C$  é descontínuo. A abordagem mais popular para a equação é a chamada reconstrução geométrica, tendo origem nos trabalhos de Hirt e Nichols, (1981). A abordagem mais popular para a reconstrução interface, o PLIC (linear por partes da interface de cálculo), baseia-se na ideia de que a interface pode ser representada como uma linha no  $\mathbb{R}^2$  ou um plano no  $\mathbb{R}^3$ , no último caso, que pode descrever a interface por, (Eq. 20):

$$n_x + n_y + n_z = \alpha \quad \text{Eq. 20}$$

onde  $n$  é um vetor normal à interface. Componentes da normal, podem ser encontrados por meio do método das diferenças finitas ou a sua combinação com a otimização dos mínimos quadrados. O termo livre  $\alpha$  é então encontrado (analiticamente ou por aproximação) através da aplicação de conservação de massa computacional dentro do elemento.

Uma vez que a descrição da interface é estabelecida, a equação advecção de  $C$ , (eq. 19) é resolvida usando técnicas geométricas, tais como encontrar o fluxo de  $C$  entre os elementos da malha, ou advectados os terminais de interface usando valores discretos da velocidade do fluido.

O método VOF é conhecido por sua capacidade de conservar a "massa" do fluido, também, quando a interface do fluido muda a sua topologia, esta mudança é rastreada facilmente, para que as interfaces possam, por exemplo, coalescer ou fragmentar.

### 2.5.2. Método Phase field

O método *phase field*, também disponível no *software* COMSOL *Multiphysics*, oferece uma alternativa atraente aos métodos mais tradicionais para a solução de problemas de fluxo multifásico. Em vez de controlar diretamente a interface entre dois fluidos, as propriedades e a evolução da camada interfacial é governada por uma variável *phase field*,  $\phi$ , que faz o papel de um parâmetro de ordem, obedecendo a equação de Cahn-Hilliard, que é uma EDP de quarta ordem. A interface *phase field* decompõe a equação Cahn-Hilliard em duas EDP's de segunda ordem. (YUE et al., 2006).

Para o método de *level set*, na interface líquida ocorre somente convecção e a equação de Cahn-Hilliard assegura que a energia total do sistema diminua gradativamente.

No método *phase field*, a interface entre dois fluidos é tratada como uma fina camada de mistura, através da qual as propriedades físicas variam de forma contínua.

Por padrão, a interface do Método *level set* e *phase field* usam a formulação de Navier-Stokes para fluidos incompressíveis, Eq. 21:

$$\rho \frac{\partial u}{\partial t} + \rho(u \cdot \nabla)u = \nabla \cdot [-PI + \mu(\nabla u + \nabla u^T)] + F_g + F_\sigma \quad \text{Eq. 21}$$

$F_E$  e  $F_a$ , são adicionados ao equacionamento devido a hipótese de incompressibilidade dos fluidos envolvidos, (admite-se que a massa específica total não varie através da interface).

Para fluidos incompressíveis, Eq. 22:

$$(\nabla \cdot u) = 0 \quad \text{Eq. 22}$$

### *Equações do Método*

A energia livre é uma função do parâmetro adimensional *phase field*,  $\phi$ , (Eq. 23):

$$F(\phi, \nabla\phi, T) = \int \left( \frac{1}{2} \varepsilon^2 |\nabla\phi|^2 + f(\phi, T) \right) dV = \int f_{tot} dV \quad \text{Eq. 23}$$

onde  $\varepsilon$  é uma medida das iterações moleculares e tem unidade de energia/comprimento. A Equação 24 descreve a evolução do parâmetro de campo de fase:

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + (u \cdot \nabla)\phi = \nabla \cdot \left[ \gamma \nabla \left( \frac{\partial f_{tot}}{\partial \phi} - \nabla \cdot \frac{\partial f_{tot}}{\partial \nabla \phi} \right) \right] \quad \text{Eq. 24}$$

onde  $f_{tot}$  (unidade SI: J/m<sup>3</sup>) é a função de densidade total de energia livre do sistema, e  $u$  (unidade SI: m/s) o campo de velocidade para o advecção. O lado direito da equação 23 esforça-se para minimizar a

energia livre total, com um tempo de relaxação controlada pela mobilidade  $\gamma$ .

A densidade de energia livre de uma mistura isotérmica de dois fluidos imiscíveis, é a soma da energia de mistura e energia elástica. A energia misturada assume a forma Ginzburg-Landau, (Eq. 25):

$$f_{mix}(\phi, \nabla\phi) = \frac{1}{2} \lambda |\nabla\phi|^2 + \frac{\lambda}{4\varepsilon^2} (\phi^2 - 1)^2 \quad \text{Eq. 25}$$

onde  $\phi$  é a variável *phase field* adimensional, definida de tal forma que a fração de volume dos componentes do fluido são  $(1 + \phi) / 2$  e  $(1 - \phi) / 2$ . A quantidade  $\lambda$  (unidade SI: N) representa a densidade de energia misturada e  $\varepsilon$  (unidade SI: m) é um capilar de largura que se adapta com a espessura da interface. Estes dois parâmetros estão relacionados com o coeficiente de tensão interfacial,  $\sigma$  (unidade SI: N/m), por meio da Eq. 26:

$$\sigma = \frac{2\sqrt{2}\lambda}{3\varepsilon} \quad \text{Eq. 26}$$

O PDE rege a variável *phase field* é a equação de Cahn-Hilliard, Eq.27:

$$\frac{\partial\phi}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla\phi = \nabla \cdot (\gamma \nabla G) \quad \text{Eq. 27}$$

onde  $G$  (unidade SI: Pa) é o potencial químico e  $\gamma$  (unidade SI:  $\text{m}^3 \cdot \text{s} / \text{kg}$ ) é a mobilidade. A mobilidade determina a escala de tempo da difusão Cahn-Hilliard e deve ser grande o suficiente para manter uma espessura interfacial constante, mas pequeno o suficiente para que os termos convectivos não sejam excessivamente amortecidos. No COMSOL *Multiphysics* a mobilidade é determinada por um parâmetro de ajuste que é uma função da espessura da interface  $\gamma = \chi \varepsilon^2$ . O potencial químico é, Eq. 28:

$$G = \lambda \left[ -\nabla^2\phi + \frac{\phi(\phi^2 - 1)}{\varepsilon^2} \right] \quad \text{Eq. 28}$$



As forças de Cahn-Hilliard, assumem um valor de 1 ou -1, exceto numa região muito fina na interface fluido-fluido. A interface *Phase field* é dividida em duas EDP's de segunda ordem, Eq. 29, onde  $\psi$  é, Eq. 30:

$$\frac{\partial \Phi}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \phi = \nabla \cdot \frac{\gamma \lambda}{\varepsilon^2} \nabla \psi \quad \text{Eq. 29}$$

$$\psi = -\nabla \cdot (\varepsilon^2 \nabla \phi) + (\phi^2 - 1) \phi \quad \text{Eq. 30}$$

#### *Forma Conservativa e Não-Conservativa*

Se o campo de velocidade é de divergência livre, usa-se a formulação conservativa, Eq. 31:

$$\frac{\partial \Phi}{\partial t} + \nabla \cdot (\mathbf{u} \phi) = \nabla \cdot \left( \frac{\gamma \lambda}{\varepsilon^2} \nabla \psi \right) \quad \text{Eq. 31}$$

Usando a forma *phase field* conservativa obtém-se a integral numérica exata da função  $\Phi$ . No entanto, a forma não conservativa é mais adequada para cálculos numéricos e geralmente converge mais facilmente. A forma não conservativa, que é a forma padrão, só conserva a integral da função *phase field* aproximadamente, mas é suficiente para a maioria das aplicações.

#### *Fontes Adicionais de Energia*

Em alguns casos, a expressão para a energia livre podem incluir outras fontes. É possível incorporá-las, modificando a Equação 32:

$$\psi = -\nabla \cdot (\varepsilon^2 \nabla \phi) + (\phi^2 - 1) \phi + \left( \frac{\varepsilon^2}{\lambda} \right) \frac{\partial f}{\partial \phi} \quad \text{Eq. 32}$$

onde  $f$  é a densidade de energia livre (SI unit: J/m<sup>3</sup>).

#### *Inicialização da Função Phase field*

Se o estudo transiente com inicialização é usado no modelo, a variável *phase field* é primeiro inicializada para que varie suavemente

entre zero e um ao longo da interface. Para isso, dois passos são criados, Fase de Inicialização e Dependente do Tempo. O passo da fase de Inicialização resolve a distância à interface inicial,  $D_{wi}$ . O passo dependente do tempo usa a condição inicial para a função *phase field* de acordo com a seguinte expressão, Eq. 33:

$$\phi_0 = \tanh\left(\frac{D_{wi}}{\sqrt{2}\varepsilon}\right) \quad \text{Eq. 33}$$

### *Variáveis e Expressões*

Ao contrário do método *level set*, o método *phase field* não requer expressões para o vetor unitário normal à interface ou funções delta suavizadas, então estes não estão disponíveis para análise. As variáveis são definidas como o potencial químico, que pode ser reescrita em termos da variável dependente  $\psi$ , Eq. 34.

$$G = \frac{\lambda\psi}{\varepsilon^2} \quad \text{Eq. 34}$$

E a força de tensão interfacial é:

$$F_\sigma = G\nabla\phi \quad \text{Eq. 35}$$

### *Usando o Método Phase field*

Se o método *phase field* é usado para controlar a interface, o *software* adiciona as seguintes equações 36 e 32:

$$\frac{\partial\phi}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla\phi = \nabla \cdot \frac{\gamma\lambda}{\varepsilon^2} \nabla\psi \quad \text{Eq. 36}$$

onde a quantidade  $\lambda$  (unidade SI: N) representa a densidade de energia de mistura e  $\varepsilon$  (unidade SI: N/m) é um capilar de largura que se adapta com a espessura da interface. Estes dois parâmetros estão relacionados com o coeficiente de tensão interfacial,  $\sigma$  (unidade SI: N/m), por meio da equação 37.

$$\sigma = \frac{2\sqrt{2}\lambda}{3\varepsilon} \quad \text{Eq. 37}$$

A fração de volume de fluido 2 é calculado como, Eq. 38:

$$V_i = \min(\max([(1 + \Phi)/2], 0), 1) \quad \text{Eq. 38}$$

onde os operadores mínimo e máximo são utilizados de modo que a fração de volume tem um limite inferior de 0 e um limite superior de 1. A densidade é então calculada pela Eq. 39:

$$\rho = \rho_d + (\rho_c - \rho_d)V_i \quad \text{Eq. 39}$$

E a viscosidade dinâmica de acordo com Eq. 40:

$$\mu = \mu_d + (\mu_c - \mu_d)V_i \quad \text{Eq. 40}$$

onde  $\rho_d$  e  $\rho_c$  são as densidades e  $\mu_c$  e  $\mu_d$  são as viscosidades dinâmicas de fluido disperso e contínuo, respectivamente.

A curvatura média da interface (unidade SI: 1/m) pode ser calculado inserindo a Eq. 41:

$$\kappa = 2(1 + \phi)(1 - \phi) \frac{G}{\sigma} \quad \text{Eq. 41}$$

onde  $G$  é o potencial químico, definido pela Eq. 42:

$$G = \lambda \left[ -\nabla^2 \phi + \frac{\phi(\phi^2 - 1)}{\varepsilon^2} \right] + \frac{\partial f}{\partial \phi} \quad \text{Eq. 42}$$

### *Termos de Força*

As quatro forças no lado direito da equação 24 são devido à gravidade, a tensão interfacial, uma força devido a uma contribuição externa para a energia livre (usando somente o método *phase field*), é uma força de volume definida pelo usuário.

### A Força de Tensão Interfacial para o Método *Phase field*

A força de tensão interfacial pelo método *phase field* é implementada como uma força de corpo, Eq. 43:

$$F_{\sigma} = \left( G - \frac{\partial f}{\partial \phi} \right) \nabla \phi \quad \text{Eq. 43}$$

Força da Gravidade

A força da gravidade é  $F_g = \rho gh$ , onde  $g$  é a aceleração da gravidade, deve ser adicionada ao domínio do fluido.

A Força de Volume é definida pelo usuário.

Quando se usa uma interface *phase field*, surge uma força devido a definição do usuário para a energia livre que é calculada de acordo com a Eq. 44:

$$F_{\text{ext}} = \left( \frac{\partial f}{\partial \phi} \right) \nabla \phi \quad \text{Eq. 44}$$

Esta força é adicionada quando um  $\phi$  – derivado da energia livre externa que é definido na aba de propriedades dos fluidos.

## 2.6. Comentários Finais- Capítulo 2

Tendo em vista o conteúdo apresentado no presente capítulo, é fundamental salientar a importância do tema abordado nesta dissertação para a indústria de petróleo, e sua relevância quanto à contribuição para o conhecimento deste tipo de sistema de escoamento multifásico imiscível, preenchendo uma lacuna na predição de comportamento de vazamentos subaquáticos e possibilitando a estratégia de ações mais eficazes no combate a desastres ambientais, minimizando os efeitos nocivos.



### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

Para melhor compreensão, este capítulo é dividido em uma etapa experimental, onde são apresentadas as análises físico-químicas e os experimentos realizados; e uma etapa de simulação, onde são expostos os parâmetros de simulação e demais informações.

#### 3.1. Etapa Experimental

##### 3.1.1. Avaliação de Propriedades Físico-Químicas dos Fluidos

É de fundamental importância o conhecimento das propriedades físico-químicas dos materiais envolvidos no sistema de estudo, pois os mesmos influenciam de forma significativa no comportamento fluidodinâmico apresentado para cada um dos sistemas a serem experimentados e simulados. Estas propriedades são utilizadas nas simulações para que se tenha amparo e justificativas físicas nas tentativas de reprodução dos resultados, tanto qualitativas como quantitativas.

##### 3.1.1.1. Determinação da Tensão Interfacial

Para as medidas de tensão interfacial foi utilizado o método da gota pendente invertida, (por se tratar do gotejamento de um líquido menos denso em um líquido mais denso), no goniômetro Ramé-Hart, modelo- 250-F1 do laboratório LCP, Departamento de Engenharia Química da UFSC, sob a supervisão da pós-doutoranda Alexandra Valério, como mostrado na Figura 10. Esse equipamento registra imagens da gota através de uma câmera, onde a imagem é capturada na secção medial da gota e o paralelismo dos feixes de luz que passam é conseguido através de uma lente de colimação adequada.

Para cada amostra foram realizadas triplicatas de 1000 leituras de tensão interfacial cada, com um espaçamento de 1 segundo entre as leituras. O resultado foi obtido pela média aritmética dos valores após a estabilização da tensão interfacial. Na Figura 6 tem-se a foto do equipamento utilizado nestas análises.

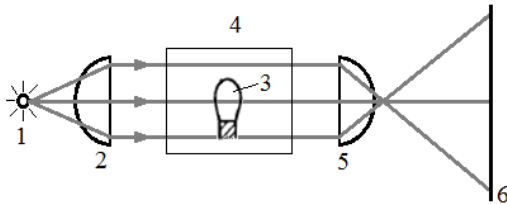
**Figura 6-** Imagem do Tensiômetro *Ramé-Hart* modelo 250- F1.



Fonte: *RAMÉ- HART INSTRUMENT CO*, 1990-2008, disponível em: <http://www.ramehart.com/250.htm>, acessado em 26/07/2013.

Na Figura 7 pode-se ter uma visão geral da configuração simplificada do equipamento.

**Figura 7** - Esquema principal da instalação experimental do método da gota pendente: 1 - fonte de luz, 2 - lente de colimação, 3 – gota pendente, 4 - célula que contém a fase contínua, 5 – lente de condensação (projeção), 6 - plano da imagem.



Fonte: Adaptado de RUSANOV e PROKHOROV , 1996.

Segundo o manual do equipamento, a imagem de vídeo consiste de uma matriz de pixels (dependendo da câmera e resolução), cada um com 256 níveis de intensidade de luz (níveis de cinza). A rotina de filtro para detecção do perfil de queda é uma simples rotina de rastreamento de borda com o aumento da precisão (sub-pixel) em comparação com

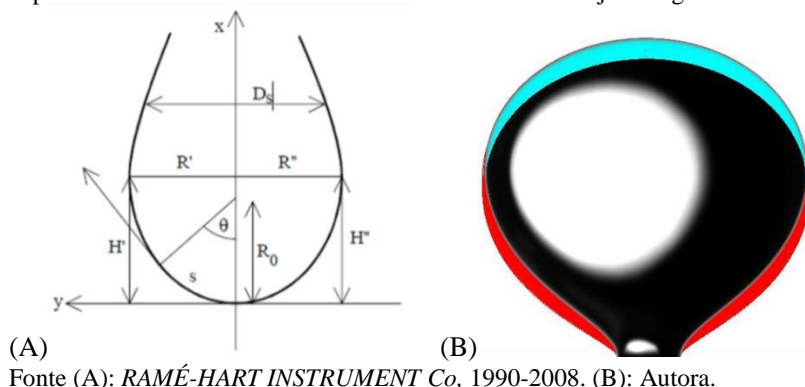
limiar global. A fim de discriminar a interface, o programa utiliza um limiar local e rotina de interpolação. As coordenadas do perfil da gota são encontradas por interpolação linear para uma dada fração,  $F$ , entre os valores máximo e mínimo locais de intensidade de luz, de acordo com (Ramé-Hart Instrument Co, 1990-2008).

$$I_{threshold} = F \times (I_{max} - I_{min}) \quad \text{Eq. 45}$$

A partir da análise dos níveis de cinza na vizinhança da interface da gota, numa comparação entre método conhecido para medição da tensão interfacial de líquidos, verifica-se que o valor ótimo a ser utilizado para fração é 0,55, (Ramé-Hart Instrument Co, 1990-2008).

Uma vez que um ponto no perfil de gota foi encontrado, a pesquisa para o ponto seguinte é limitada até o ponto mais próximo na linha seguinte. Na parte inferior da gota o sentido de pesquisa é comutado a partir da horizontal para a vertical. A maioria dos perfis de interface consiste de 700-1000 pontos, (Ramé-Hart Instrument Co, 1990-2008). Para compreender a metodologia de cálculo utilizada no *software* do equipamento, observe o diagrama da Figura 8.

**Figura 8-** (A) Dimensões e símbolos usados neste programa. (B) Imagem experimental da análise de tensão interfacial do óleo de soja em água destilada.





- *Embasamento teórico*

Um processo de duas etapas determina a tensão interfacial. Inicialmente, o tamanho dos parâmetros  $R_0$  e  $\beta$  são determinados a partir do perfil de queda, por outro lado a tensão interfacial é calculada a partir dos parâmetros da equação 47:

$$\gamma = \Delta\rho g R_0^2 / \beta \quad \text{Eq. 46}$$

onde  $\Delta\rho$  é a diferença entre a densidade da gota e o meio circundante,  $g$  é a aceleração da gravidade,  $R_0$  é o raio de curvatura no vértice da gota e  $\beta$  é o fator de forma, tal como definido pela equação. As equações que descrevem o perfil da gota são derivadas a partir da equação de Young-Laplace e podem ser representadas na forma adimensional, Eq. 48, 49 e 50:

$$d\theta/dS = 2 - \beta Y - \sin\theta/X \quad \text{Eq. 47}$$

$$dX/dS = \cos\theta \quad \text{Eq. 48}$$

$$dY/dS = \sin\theta \quad \text{Eq. 49}$$

As coordenadas  $x$ ,  $y$ ,  $\theta$  e  $s$  são ilustrados na Figura 8 A. O parâmetro,  $s$ , é a distância ao longo do perfil da gota a partir do vértice.  $X$ ,  $Y$  e  $S$  são parâmetros adimensionais dadas pela divisão de  $x$ ,  $y$ , e  $s$ , respectivamente, por  $R_0$ . Um grande número de perfis adimensionais teóricos foi calculado para toda a gama  $\beta$ -possível, a partir de  $\beta = 0,55$ -1020 por meio do algoritmo de integração numérica de Kutta-Merson com ajuste automático do comprimento do passo. O erro relativo máximo foi definido para  $10^{-4}$ . Cada perfil foi calculado usando interpolação cúbica. Desta forma, as curvas correlacionando os parâmetros  $\beta$  e  $R_0$  com parâmetros mensuráveis, foram produzidas, e estas curvas foram ajustadas com polinômios pelo método dos mínimos quadrados.

Para gotas pendentes "normais" (isto é, gotas que sejam suficientemente longas a fim de medir  $D_S$ ) o diâmetro máximo,  $D_E$ , e a

proporção  $\varphi = D_S / D_E$ , é usado ( $D_S$  é o diâmetro à distância  $D_E$  partir do ápice da gota). A equação encontrada é, Eq. 51:

$$\beta = -0.12836 + 0.7577\varphi - 1.7713\varphi^2 + 0,5426\varphi^3 \quad \text{Eq. 50}$$

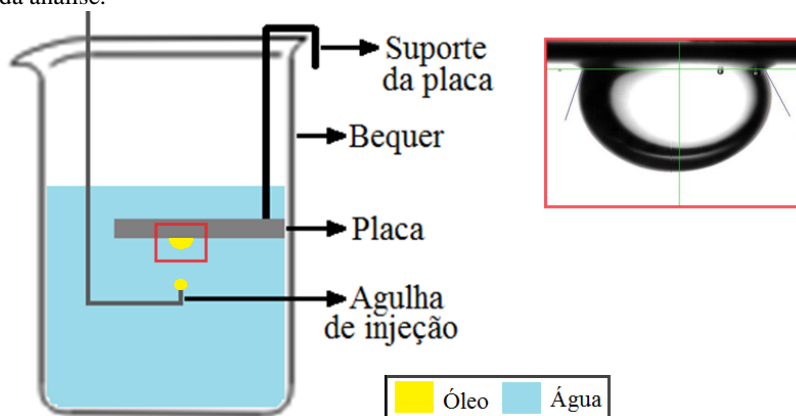
### 3.1.1.2. Ângulo de Contato

Os dados de ângulo de contato foram utilizados na seleção de parede molhada (*wetted wall*), pois é uma característica de cada sistema ensaiado.

Para avaliação do ângulo de contato foi utilizado o goniômetro Ramé-Hart, modelo- 250-F1 do laboratório LCP, Departamento de Engenharia Química da UFSC.

O aparato apresentado na Figura 9 foi colocado no equipamento e posicionado para a obtenção das imagens e medida dos valores de ângulos de contato.

**Figura 9**-Esquema utilizado para análise de ângulo de contato de óleo/água em uma superfície de aço inoxidável, com imagem experimental do detalhamento da análise.



Fonte: Autora.

Normalmente o goniômetro pode ser usado, tanto para a análise dos ângulos de contato do tamanho e formato da gota. Em um

goniômetro manual, ângulos de contato, são medidos por meio de uma escala graduada e uma cruz no retículo óptico (*Ramé-Hart Instrument Co*, 1990-2008).

O programa implementa métodos para calcular o ângulo de contato de cada um dos lados da gota de forma independente por meios geométricos puros. Estes métodos são os mesmos tal como utilizados no programa DROPimage padrão. Os métodos são: ajuste de curva circular, extrapolação secante e ajuste linear. Uma vez que apenas uma parte da gota é utilizada, as medições de avanço e recuo de ângulos de contato por meio do método de pipeta são fáceis. Um ou ambos os lados da gota pode ser medido separadamente e, em último caso, a diferença média é também calculada (*Ramé-Hart Instrument Co*, 1990-2008).

Para cada amostra foram realizadas duplicatas de 10 leituras cada, com um espaçamento de 1 segundo entre as leituras. O resultado foi obtido pela média dos ângulos de contato lidos para o lado direito e esquerdo para gotas de 25mm<sup>3</sup>.

#### *3.1.1.3. Determinação da Viscosidade*

As análises de viscosidade foram realizadas no laboratório CERMAT no Departamento de Engenharia Mecânica, em um viscosímetro Brookfield Digital Modelo DV-III, utilizando geometria para baixas viscosidades. Os ensaios foram realizados em triplicata para o aumento e diminuição da taxa de cisalhamento a uma temperatura de 22°C, como todos os óleos apresentaram comportamento de fluido newtoniano os valores utilizados foram da média da viscosidade quando houve sua estabilização do valor.

#### *3.1.1.4. Determinação da Massa Específica*

As avaliações de densidades dos óleos foram avaliadas a temperatura de 22°C, com densímetro flutuante Brand tendo faixa de medição de 0,700 a 1,000, divisão da escala de 0,005. Avaliações realizadas no laboratório LASIPO. Inicialmente colocou-se a amostra em uma proveta de vidro e ajustou-se a temperatura. Imediatamente antes da medição, agitou-se o líquido com o auxílio de um bastão de vidro para minimizar diferenças de densidade e de temperatura. O

densímetro limpo foi então introduzido cuidadosamente no líquido. Ao estabilizar o menisco foi procedida a leitura.

Para as amostras de água salina a 3,5%, as densidades foram avaliadas com o uso de um picnômetro, também a temperatura de 22°C, este procedimento foi adotado, pois a densidade da água salina apresentou-se fora da faixa alcançado pelo densímetro flutuante. Sabendo que a temperatura de referência tanto do picnômetro quanto do densímetro flutuante é de 20°C, foi realizado o cálculo da correção de densidade, a equação utilizada é, Eq. 52:

$$K_t = (1 - \gamma(T - T_0))\rho \quad \text{Eq. 51}$$

onde:

$K_t$  : Massa específica após a correção [g/mL];

$\gamma$  : Coeficiente de dilatação volumétrica do vidro ( $10^{-6} \text{ K}^{-1}$ );

$T$  : Temperatura de medição [K];

$T_0$  : Temperatura de referência [K];

$\rho$  : Massa específica lida [g/mL].

Fonte: BRAND, 2013.

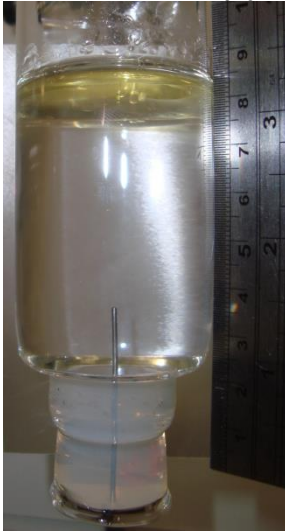
### 3.1.2. *Análise Fluidodinâmica Experimental*

#### 3.1.2.1. *Bancada Experimental*

O aparato experimental foi concebido segundo um recipiente cilíndrico encamisado, com diâmetro interno de 4 cm e altura de 20 cm. Este recipiente tem uma abertura na parte inferior para acoplar a rolha de silicone transpassada por uma agulha de aço inoxidável com 0,6mm de diâmetro interno e parede de 0,1mm, que funciona como bocal de entrada do óleo, na parte superior o recipiente é aberto e munido de uma tampa com respiro. O óleo é injetado através de uma mangueira de 3,5mm de diâmetro e impulsionado por uma bomba de seringa.

Na Figura 10 pode ser observada a bancada usada para a realização dos ensaios experimentais.

**Figura 10-** Foto da bancada experimental, coluna preenchida com o meio contínuo e bocal de injeção do fluido disperso posicionado na base do sistema.



Fonte: Autora.

### *3.1.2.2. Procedimentos e Parâmetro de Operações*

Com a coluna preenchida pela fase contínua, o óleo foi injetado no fundo do recipiente através de uma mangueira presa a rolha de silicone com um dispositivo de entrada do óleo no sistema.

Para os experimentos com o bocal as velocidades de injeção foram escolhidas empiricamente de acordo com a visualização de diferentes escoamentos de ascensão (Tabela 2). Esta ideia surgiu com a divulgação de imagens do vazamento ocorrido no Campo de Frade, na costa do Rio de Janeiro em novembro de 2011, de responsabilidade da empresa americana Chevron.

**Tabela 2** - Valores de velocidade de injeção para testes fluidodinâmicos no sistema de vazamento bocal.

Sistema	Velocidades [m/s]		
	Baixa	Média	Alta
Óleo de Soja x Água Destilada	0,225	0,333	0,446
Óleo de Soja x Água Salina	0,204	0,315	0,439
Óleo Spindura 10 x Água Destilada	0,236	0,360	0,453
Óleo Spindura 10 x Água Salina	0,224	0,354	0,429
Óleo Lubrificante Queimado x Água Destilada	0,172	0,264	0,352
Óleo Lubrificante Queimado x Água Salina	0,177	0,276	0,349

Fonte: Autora.

Para a fenda, as velocidades foram escolhidas sob o mesmo viés, e nos testes preliminares observaram-se duas velocidades de interesse, Tabela 3.

**Tabela 3** - Valores de velocidade de injeção para testes fluidodinâmicos no sistema de vazamento fenda.

Sistema	Velocidades [m/s]	
	Baixa	Alta
Óleo de Soja x Água Destilada	0,0554	0,1477
Óleo de Soja x Água Salina	0,0493	0,1487
Óleo Spindura 10 x Água Destilada	0,0901	0,1120
Óleo Spindura 10 x Água Salina	0,0559	0,0223
Óleo Lubrificante Queimado x Água Destilada	0,0152	0,0430
Óleo Lubrificante Queimado x Água Salina	0,0106	0,0149

Fonte: Autora.

### 3.1.2.3. Avaliações Realizadas

As avaliações de diâmetro médio de gota e altura de gotejamento no sistema de injeção através do bocal foram realizadas através das imagens geradas pelo vídeo experimental. Para as simulações os dados de diâmetro e altura de gotejamento foram obtidos a partir da medida fornecida através da imagem gerada pelo *software* COMSOL *Multiphysics 4.3b*. Para o sistema do bocal foram avaliados os aspectos:

Diâmetro da gota formada, altura de gotejamento de óleo com a velocidade de injeção e comportamento fluidodinâmico ascendente do óleo;

Para o sistema de injeção através da fenda foram avaliados os aspectos qualitativos do comportamento fluidodinâmico de saída e ascendente do óleo.

### 3.2. Etapa de Modelagem

Neste item, são detalhados: os métodos de acompanhamento da interface utilizado pelo *software*, o método numérico utilizado para a resolução das simulações, bem como a geometria, condições iniciais, condições de contorno e malhas construídas para os dois sistemas modelados: injeção através de um bocal cilíndrico e injeção através de uma fenda. Todas as figuras foram geradas através do *software* COMSOL de modo a ilustrar os aspectos de interesse.

#### 3.2.1. Método de Acompanhamento da Interface

No caso do presente trabalho houve a tentativa de uso do método *Phase Field* para o acompanhamento da interface sem sucesso, assim o método utilizado para o acompanhamento da interface foi a *Level set* e o Método dos Elementos Finitos foi utilizado para a discretização e resolução das simulações através do *software* COMSOL *Multiphysics* 4.3b.

##### 3.2.1.1. Equações de Transporte e do Método Level set

As equações da continuidade e de Navier-Stokes para fluidos incompressíveis, incluindo o tensor interfacial, descrevem o escoamento do sistema bifásico. Os líquidos envolvidos neste problema podem ser considerados incompressíveis. Para este caso, a equação de Navier-Stokes é dada por, Eq. 53:

$$\rho \frac{\partial u}{\partial t} + \rho(u \cdot \nabla)u = \nabla \cdot [-P\mathbf{I} + \mu(\nabla u + \nabla u^T)] + F_g + F_\sigma \quad \text{Eq. 52}$$

$F_E$  e  $F_a$ , são adicionados ao equacionamento devido a hipótese de incompressibilidade dos fluidos envolvidos, (admite-se que a massa específica total não varie através da interface).

Equação da continuidade para fluidos incompressíveis, Eq. 54:

$$(\nabla \cdot u) = 0 \quad \text{Eq. 53}$$

onde:  $\rho$  é a massa específica ( $\text{kg/m}^3$ ),  $\mu$  é a viscosidade dinâmica (Pa.s),  $u$  é a velocidade (m/s),  $p$  é a pressão (Pa),  $F_g$  é a força da aceleração gravitacional,  $F_\sigma$  é a força da tensão interfacial,  $F_E$  é a força de empuxo e  $F_A$  é a força de arraste na interface. Estas sendo definidas como:

Força gravitacional, Eq. 55:

$$F_g = \rho_d g h \quad \text{Eq. 54}$$

onde:  $\rho_d$  é a massa específica da fase dispersa,  $V_d$  é o volume da gota e  $g$  é a aceleração da gravidade.

Força de Empuxo, Eq. 56:

$$F_E = m \cdot a \quad \text{Eq. 55}$$

Força de tensão interfacial, Eq. 57, sendo  $T$ , Eq. 58:

$$F_\sigma = \nabla \cdot T \quad \text{Eq. 56}$$

$$T = \sigma(I - (nn^T))\delta \quad \text{Eq. 57}$$

onde  $I$  é a matriz identidade,  $n$  é a normal a interface,  $\sigma$  é o coeficiente de tensão interfacial (N/m) e  $\delta$  é a função delta Dirac que só não é nula na interface. A normal,  $n$ , é dada pela Eq. 59:

$$n = \frac{\nabla\phi}{|\nabla\phi|} \quad \text{Eq. 58}$$



Na formulação diferencial das equações de Navier-Stokes, a localização das forças de tensão interfacial singulares, são representadas por uma função delta de Dirac, (TORNBERG, ENGQUIST, 2000).

A função delta de Dirac  $\delta$ , segundo o equacionamento padrão utilizado pelo *software* COMSOL, é aproximada pela Eq. 60:

$$\delta = 6|\phi(1 - \phi)||\nabla\phi| \quad \text{Eq. 59}$$

Esta equação tem influência diretamente proporcional nas equações residuais direcionais utilizadas para o fechamento de quantidade de movimento do modelo.

Os valores das propriedades dos fluidos foram obtidos a partir dos experimentos realizados para densidade, viscosidade e tensão interfacial, apresentados na seção 3.1.1. Avaliação das propriedades físico-químicas, do presente trabalho.

Para problemas de escoamento multifásicos é importante traçar a interface óleo/água, e para isso, no presente trabalho foi utilizado o método *Laminar Two-Phase Flow Level set* (OLSSON e KREISS, 2005). Este método utiliza um reinicializador  $\gamma$ , para preservar a equação do método *Level set*, que descreve a convecção na interface dos fluidos. O contorno de 0,5 da função *Level set* define a interface entre os fluidos:

Quando  $\phi = 0$  corresponde ao óleo;

Quando  $\phi = 1$  corresponde à água;

Em uma camada de transição próxima a interface,  $\phi$  é suavizado de 0 até 1. A interface se move com o fluido a mesma velocidade,  $u$ .

A equação que descreve a reinicialização da Função *Level set*, (Eq. 61):

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + u \cdot \nabla \phi = \gamma \nabla \cdot \left( \varepsilon \nabla \phi - \phi(1 - \phi) \frac{\nabla \phi}{|\nabla \phi|} \right) \quad \text{Eq. 60}$$

A espessura da camada de transição é proporcional a  $\varepsilon$ . Para este modelo foi adotado  $\varepsilon_{ls} = tpf \cdot hmax/4$ , onde  $hmax$  corresponde ao maior elemento da malha.

O parâmetro  $\gamma$  determina o incremento da reinicialização, sendo que seu valor máximo adequado deve ser da mesma ordem de

grandeza da velocidade atingida pelo sistema. Paralelamente a definição da interface, a função *Level set* usa um suavizador de densidade e viscosidade que é definido a cada valor da interface através das equações 62 e 63:

$$\rho = \rho_{oil} + (\rho_{oil} - \rho_{water})\Phi \quad \text{Eq. 61}$$

$$\mu = \mu_{oil} + (\mu_{oil} - \mu_{water})\Phi \quad \text{Eq. 62}$$

### 3.2.2. Método dos Elementos Finitos

No estudo de problemas ou domínios complexos é natural que engenheiros e cientistas utilizem a subdivisão de sistemas em componentes ou “elementos” individuais e mais simples para posterior reconstruir do domínio original no intuito de estudar seu comportamento.

Quando um sistema a ser estudado tem propriedades e formas regulares, é mais adequado o uso do método de diferenças finitas. Mas quando ocorrem descontinuidades, heterogeneidades e formas irregulares de contorno, o método de elementos finitos é mais adequado, como é o caso dos escoamentos multifásicos. Apesar de mais sofisticado matematicamente, este último método é uma alternativa para alcançar mais qualidade nas soluções (KUKRETI et al., 1989).

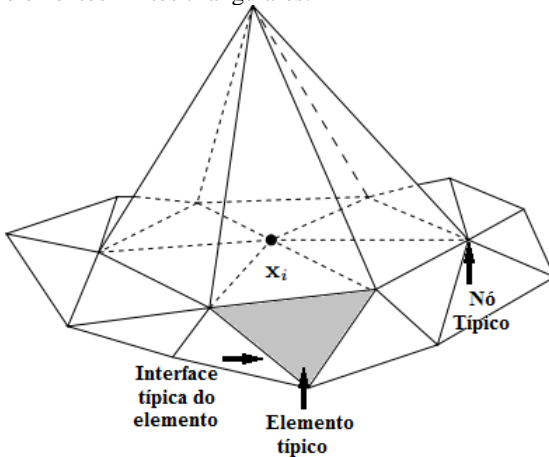
Na resolução numérica de um determinado sistema, o domínio de cálculo é representado por um conjunto de subdivisões, também chamados de *elementos finitos*. Estes elementos são interconectados em pontos chamados *nós*. Segundo Zienkiewicz et al. (2005), método dos elementos finitos é uma técnica numérica para resolver equações diferenciais parciais, sendo subdividido em células que formam uma malha.

O processo de subdivisão do domínio é também conhecido como discretização da continuidade. Os elementos finitos podem possuir várias formas (triangular, retangular, quadrilateral, etc.), como também podem possuir bordas retas ou curvas. Geralmente os nós são selecionados nos cantos de um elemento e às vezes ao longo das interfaces dos elementos. A Figura 10 ilustra a discretização de um

domínio bidimensional em um sistema de elementos finitos triangulares (KUKRETI et al., 1989).

Para o método dos elementos finitos, a malha não precisa ser estruturada. Com malhas não estruturadas e células curvas e de geometrias complexas podem ser criadas com facilidade. Essa importante vantagem é compartilhada pelo método dos volumes finitos (FVM). Não sendo o caso do método das diferenças finitas (FDM), que precisa de uma grade estruturada, sendo admitidos elementos retilíneos ou curvos (FELLER, 2012). A combinação da representação da solução numa dada função espaço, com uma formulação integral tratando rigorosamente as condições de contorno, fornece ao método uma extremamente forte e rigorosa fundamentação matemática (WENDT e ANDERSON, 2009). Na Figura 11, pode-se observar a representação da discretização de um domínio.

**Figura 11** - Representação da discretização de um domínio bidimensional por elementos finitos triangulares.



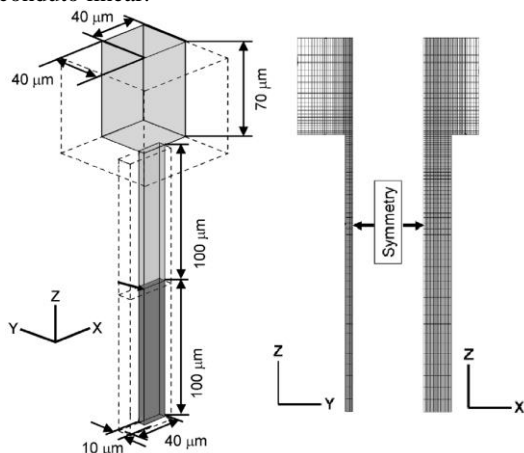
Fonte: KUZMIN, 2010.

Em cada nó dos elementos finitos, valores são considerados incógnitos, e são conhecidos como valores nodais. Funções polinomiais simples, chamadas de funções de molde, expressas em termos de coordenadas espaciais  $(x,y)$  são escolhidas para aproximar a variação

dos valores nodais sobre cada elemento finito em cada fase. As incógnitas dos valores nodais estão compreendidas pela amplitude da respectiva função de molde, definidas separadamente sobre cada elemento do domínio (KUKRETI et al., 1989).

Kobayashi et al (2007) utiliza o método de elementos finitos para estudar escoamento de óleo através de um capilar para formar emulsões, por ser um método que “manipula” o escoamento multifásico. É possível, em uma modelagem de escoamento, controlar os efeitos de pressão capilar, por exemplo. A Figura 12 ilustra uma malha estruturada de elementos quadriláteros, aplicada a um conduto linear.

**Figura 12** - Malha estruturada de elementos quadriláteros, aplicada a um conduto linear.



Fonte: KOBAYASHI et al. (2007).

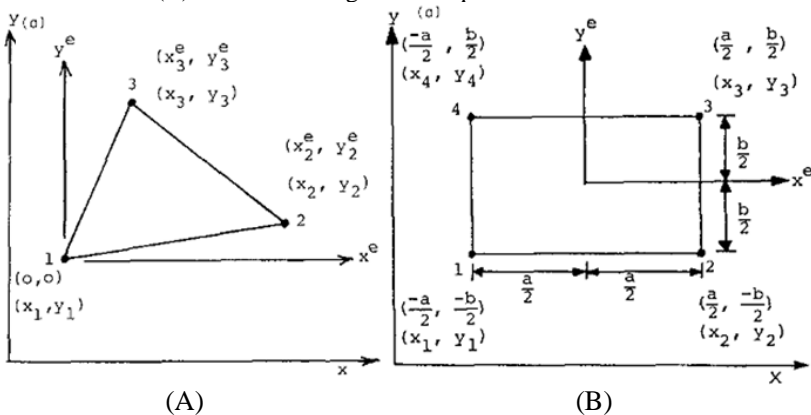
Nos elementos triangulares, pode ser adotada uma aproximação linear da função molde para expressar a variação dos valores nas duas fases no elemento, enquanto que para o elemento quadrático uma aproximação bilinear (equação cujo primeiro membro é linear em relação a duas variáveis diferentes ou a dois grupos diferentes de variáveis) pode ser selecionada. A seleção da função molde e o cálculo das matrizes dos elementos são simplificados e generalizados pelo conceito dos *parâmetros isométricos*. Neste conceito, o *sistema natural*

de coordenadas é adotado para definir a geometria dos elementos e para expressar a função (KUKRETI et al., 1989).

Na formulação de elementos finitos, geralmente um sistema local de coordenadas é definido por um elemento típico. O sistema de coordenadas usado para definir a geometria da configuração do domínio é chamado de sistema global. A Figura 13 ilustra um sistema de coordenada local para um elemento triangular de três nós e um elemento retangular de quatro nós, estes alocados nos eixos locais cartesianos  $x^e$  e  $y^e$  (a), enquanto que o sistema global nos eixos  $x$  e  $y$  (b) cartesianos. Portanto, o sistema de coordenada local troca de elemento a elemento enquanto que o sistema de coordenada global não se altera (KUKRETI et al., 1989).

Um sistema natural de coordenadas para um elemento é um sistema local que permite a expressão das coordenadas por qualquer ponto do elemento por um conjunto de números adimensionais e as suas magnitudes não ultrapassam valores unitários (KUKRETI et al., 1989). Para montar uma matriz de elementos, é essencial que todos os elementos sejam referenciados em um sistema de coordenadas global e outro sistema de coordenadas (Figura 13).

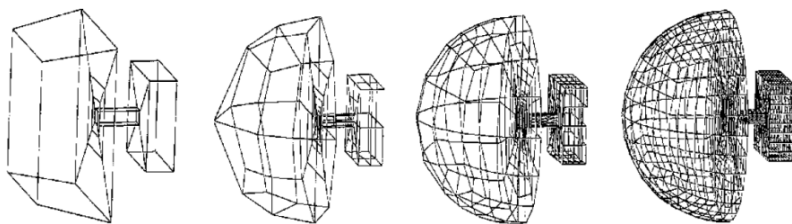
**Figura 13** - Sistema de coordenada local e global para (A) elemento triangular com três nós e (B) elemento retangular com quatro nós.



Fonte: KUKRETI et al. 1989.

Vemos, portanto, que a construção e refinamento da malha é de extrema importância, pois tem íntima ligação com a resolução de problemas através do Método dos Elementos Finitos. Influi na similaridade das respostas de simulação com relação aos experimentos. Também tem influência direta com a representatividade do domínio, como pode ser observado na Figura 14.

**Figura 14** - Resultado de etapas sucessivas de refinamento de uma malha hexaédrica 3D.



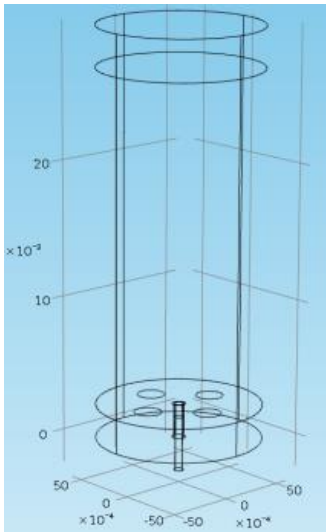
Fonte: RANNACHER, 1999.

### 3.2.3. Geometria

Para o bocal:

O domínio de simulação é um cilindro de 3cm de altura e 1,2cm de diâmetro, este domínio faz parte do volume de interesse para o presente trabalho e foi estabelecido após testes para não influenciar o escoamento da gota. Na parte superior do domínio tem-se uma espessura de 0,25cm de óleo e centralizado na base do domínio posicionou-se um bocal de 0,6mm de diâmetro interno a 0,25cm da base do domínio (Figura 15). Foi adicionado um “*work plane*” na altura de saída do bocal, com quatro geometrias circulares distribuídas de forma equidistante ao centro, para facilitar a construção da malha e refinar a área onde ocorre o escoamento das gotas.

**Figura 15** – Imagem do domínio utilizado nas simulações com injeção através do bocal cilíndrico.

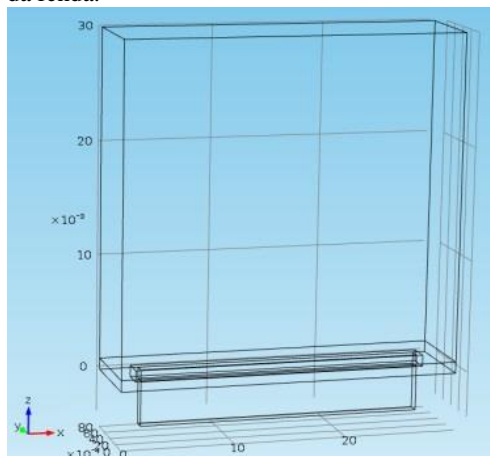


Fonte: Autora.

Para a fenda:

O domínio de simulação foi construído com um bloco de 3cm de altura, 3cm de largura e 0,8cm de profundidade, 0,25cm da base foi posicionada uma entrada de óleo com a forma de uma fenda com 2,5cm de comprimento e 0,1cm de espessura, (Figura 16).

**Figura 16** - Imagem do domínio utilizado nas simulações com injeção através da fenda.



Fonte: Autora.

#### 3.2.4. *Propriedades dos Fluidos*

As propriedades físico-químicas dos fluidos utilizadas nas simulações foram as mesmas medidas experimentalmente que são apresentadas na seção 4.1 dos resultados e discussões do presente trabalho.

#### 3.2.5. *Condições Iniciais e de Contorno*

Para o bocal:

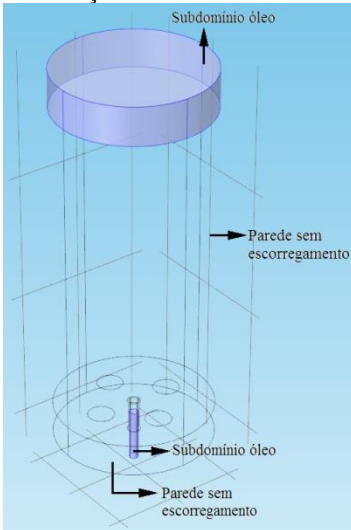
Para tornar a simulação próxima à realidade, todo o domínio foi selecionado com a atuação da aceleração da gravidade, com uma variável interna ao *software*: *g\_const*.

A condição de parede selecionada como sem escorregamento (*no slip*) está indicada na Figura 16, que corresponde à base e às laterais do recipiente, implicando em velocidade zero junto à parede, ( $u = 0$ ). As demais paredes foram selecionadas como parede molhada, (*wetted wall*), com ângulo de contato:  $\theta$  variável dependendo da simulação.



Tem-se na Figura 16 a indicação dos subdomínios ocupados pelo óleo para o início da simulação. Os domínios que não estão marcados na Figura 17 são os subdomínios ocupados pela água. Todos os subdomínios tem em suas condições iniciais um perfil de pressão hidrostática.

**Figura 17** – Imagem do domínio de simulação para injeção através de bocal e distribuição inicial dos fluidos.

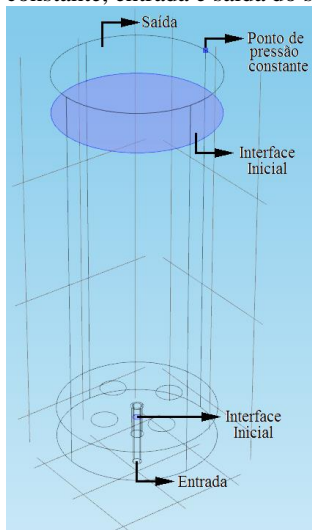


Fonte: Autora.

As superfícies indicadas na Figura 18 correspondem à entrada e saída do sistema. A entrada é governada pela velocidade de injeção do óleo, já a saída tem condição inicial de pressão zero, ( $p = p_0$ ).

Foram indicadas as interfaces iniciais óleo/água, estas são reconhecidas e assumidas pelo *software* no processo de inicialização da simulação. Também na Figura 18 está indicado um ponto selecionado como pressão constante e igual a zero para facilitar a convergência da simulação.

**Figura 18** - Imagem do domínio de simulação para a injeção através de bocal com indicação das interfaces iniciais óleo/água, localização do ponto de pressão constante, entrada e saída do sistema.

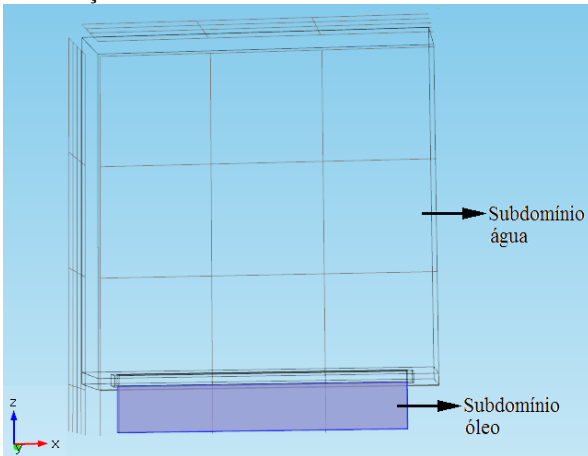


Fonte: Autora.

Para a fenda:

Na Figura 19 pode-se ver a distribuição inicial de materiais nos subdomínios. Para as condições iniciais de todos os subdomínios foi imposto um perfil de pressão hidrostática.

**Figura 19** - Imagem do domínio de simulação para a injeção através da fenda e distribuição inicial dos fluidos.

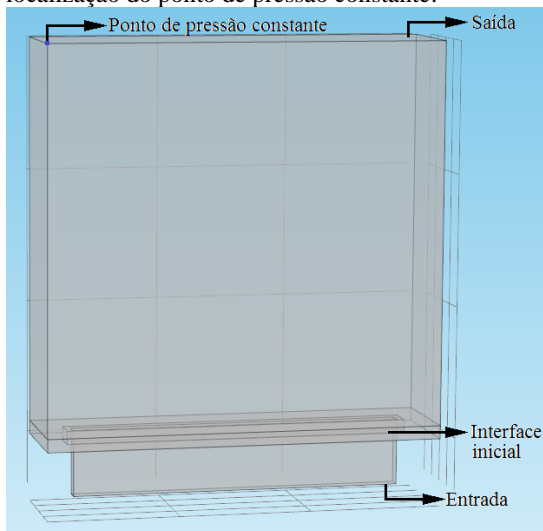


Fonte: Autora.

Na Figura 20 são mostradas as superfícies de entrada e saída do sistema. A entrada é governada pela velocidade de injeção do óleo, já a saída tem condição de pressão zero imposta, ( $p = p_0$ ).

Também está indicada a interface inicial e na parte superior do domínio tem-se um ponto de referência de pressão constante igual a zero para facilitar a convergência da simulação. Somente as paredes internas da fenda e suas bordas superiores foram selecionadas como parede molhada (*wetted wall*). As demais paredes foram selecionadas como parede sem escorregamento, (*no slip wall*).

**Figura 20** - Imagem do domínio de simulação para a injeção através da fenda com indicação da entrada e saída do sistema, interface inicial óleo/água e localização do ponto de pressão constante.



Fonte: Autora.

### 3.2.6. Malha

Neste item será apresentado o estudo de malha realizado e na sequência o detalhamento da malha utilizada.

#### 3.2.6.1. Estudo de Malha

Para este estudo foram construídas três malhas estruturadas hexaédricas para o domínio de injeção através do bocal e na simulação foram utilizados os mesmos parâmetros, para que se pudesse avaliar somente o efeito da malha sobre o resultado da simulação.

A primeira malha com 101.237 elementos, tem padrão pré-estabelecido pelo *software* como *finer* sendo adicionado um refinamento em todo o domínio, A segunda com 167.285 elementos, tem padrão *extra fine* e terceira malha com 204.544 elementos, tem padrão *extra fine* sendo adicionado um refinamento em todo o domínio.

Tendo em vista que as simulações para cada malha cobriram um tempo de fenômeno de 6 segundos, com o mesmo conjunto de parâmetros, a escolha da malha foi pautada por três aspectos principais:

- Diâmetro médio da gota formada;
- Altura de gotejamento;
- Representação adequada da dimensão e forma das gotas;
- Custo computacional.

As simulações foram realizadas com o seguinte conjunto de parâmetros: velocidade de injeção de 0,0413 m/s, parâmetro de reinicialização  $\gamma=0,05$ m/s, tensão interfacial  $\sigma =0,030$  N/m e ângulo de contato  $\theta = \pi/2$ .

Para o sistema de injeção através da fenda não foi realizado um estudo de malha próprio, sendo transportados os conhecimentos do estudo do sistema de injeção através do bocal para a geometria de injeção através da fenda.

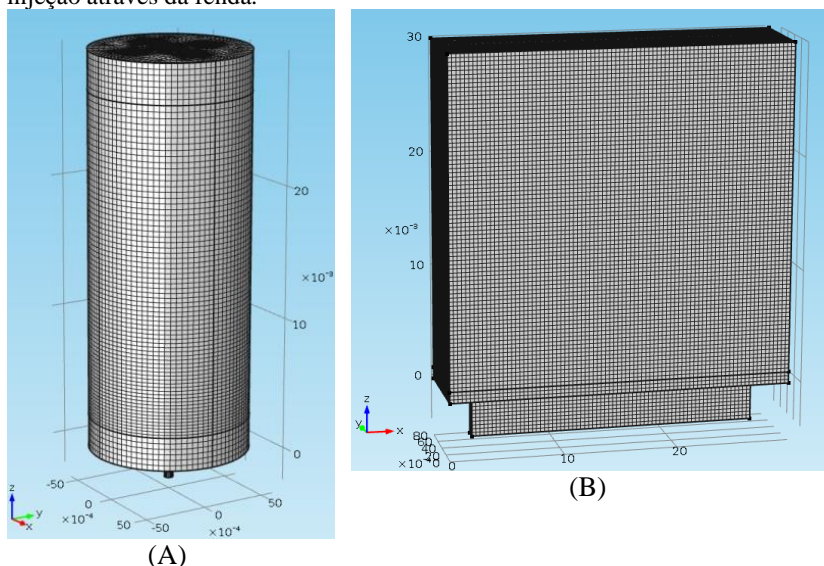
### *3.2.6.2. Malha Utilizada*

As malhas utilizadas nas simulações foram construídas de forma estruturada com elementos hexaédricos.

Para a injeção de óleo através de um bocal cilíndrico foi utilizada a malha com 204.544 elementos (Figura 21A) justificada pelo estudo de malha realizado, que tem seus resultados apresentados na seção 4.4 deste documento.

Para o modelo com injeção através da fenda o domínio de simulação apresentou 199.194 elementos (Figura 21B); esta malha foi suficiente para a representação do sistema de interesse.

**Figura 21** – (A) Imagem da malha utilizada nas simulações para a injeção através do bocal. (B) Imagem da malha utilizada para as simulações com injeção através da fenda.



Fonte: Autora.

### 3.2.7. Simulações

As simulações foram realizadas através do *software* COMSOL *Multiphysics 4.3b*®, em um computador com processador Core i7, 4700MQ, com 16GB de memória RAM e placa de vídeo dedicada NVIDIA GEFORCE 750M com 2Gb.

Para todas as simulações foram utilizadas as propriedades físico-químicas de cada fluido envolvido na simulação, sendo alterado o valor de tensão interfacial, pois o valor apresentado no subitem 4.1, Tabela 7, do presente trabalho, diz respeito a uma gota estabilizada e estática, assim, como as simulações são realizadas para sistemas dinâmicos, a tensão interfacial foi aumentada, justificando-se pelos resultados dos experimentos, onde se observa uma tensão interfacial maior quando ainda há movimentação da gota e possível migração das moléculas para interface.

Inicialmente fez-se um estudo para visualizar a influência apresentada por cada um dos parâmetros elencados como importantes, que foram: parâmetro de reinicialização  $\gamma$  e ângulo de contato  $\theta$ , sendo mantidas constantes: a velocidade de injeção e tensão interfacial  $\sigma$ .

Posteriormente identificou-se a necessidade de detalhar o estudo para o ângulo de contato, assim ajustando velocidade de injeção de 0,0413 m/s, parâmetro de reinicialização  $\gamma=0,05$  m/s (parâmetro interno ao *software*), tensão interfacial  $\sigma =0,030$  N/m e variou-se o ângulo de contato  $\theta$  de 65 a 85° com intervalos de 5 em 5°, encontrando-se um valor de máximo entre 70 e 75°, assim neste intervalo variou-se o ângulo de 1 em 1°, seção de Resultados Tabela 16. Após ajustar os parâmetros, pode-se gerar as simulações utilizadas para as comparações com os ensaios experimentais.

Para as simulações com injeção através do bocal foram usados os parâmetros apresentados na Tabela 4.

**Tabela 4** – Tabela dos parâmetros utilizados para as simulações de injeção através do bocal.

Sistema	Velocidade de injeção [m/s]	Parâmetro de reinicialização $\gamma$ [m/s]	Ângulo de contato $\theta$ [°]	Tensão interfacial $\sigma$ [N/m]
Óleo de soja/ água destilada	0,225	0,05	73	0,030 /0,035 0,036
Óleo de soja/ água destilada	0,333	0,05	73	0,036 /0,038
Óleo de soja/ água destilada	0,446	0,05	73	0,036
Óleo soja / água salina	0,315	0,1	142,2	0,030
Óleo Spindura 10/ água destilada	0,236	0,10	114,3	0,040
Óleo lubrificante usado / água salina	0,177	0,11	134,7	0,030

Fonte: Autora.

Para as simulações com injeção através da fenda com parâmetros ajustados para comparação com os experimentos, foram usados os parâmetros apresentados na Tabela 5:

**Tabela 5** – Tabela dos parâmetros utilizados para as simulações finais de injeção através da fenda.

Sistema	Velocidade de injeção [m/s]	Parâmetro de reinicialização $\gamma$ [m/s]	Ângulo de contato $\theta$ [°]	Tensão interfacial $\sigma$ [N/m]
Óleo de soja/ água destilada	0,0554	0,05	73	0,036
Óleo de soja/ água destilada	0,1477	0,05	73	0,036
Óleo lubrificante usado / água salina	0,0152	0,05	134,7	0,030

Fonte: Autora.

Estes parâmetros foram definidos baseados nos ajustes realizados para o sistema de injeção através do bocal cilíndrico e transportados para o sistema da fenda.





## 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Esta seção do trabalho está separada em subitens que abrangem as análises físico-químicas, a etapa experimental e a análise comparativa entre os experimentos e as simulações de modo a facilitar a compreensão dos resultados obtidos.

### 4.1. Propriedades Físico-químicas Avaliadas dos Fluidos

Na avaliação das propriedades físico-químicas dos fluidos a temperatura de 22°C, foram obtidos os resultados apresentados na Tabela 6, (esta tabela não apresenta desvios padrão pois a observação estava abaixo da resolução do instrumento):

**Tabela 6** - Resultados das propriedades físico-químicas dos fluidos.

Componente	Propriedades	
	Massa Específica [Kg/m <sup>3</sup> ]	Viscosidade [Pa*s]
Água Destilada	997	0,0010
Água Salina 3,5%	1010	0,0010
Óleo de Soja	920	0,0621
Óleo Spindura 10	830	0,0175
Óleo Lubrificante usado	845	0,0180

Fonte: Autora.

Como pode ser observada, a tensão interfacial sofre alteração frente à mudança do meio contínuo, de água destilada para água salina 3,5%. Segundo Godinho (2009), este fato se dá pela presença de íons livres que agem na interface líquido-líquido, onde se encontram substâncias polares presentes no óleo, diminuindo assim a tensão interfacial do sistema. Na Tabela 7, podem ser observados os dados e o percentual de diminuição da tensão interfacial entre os sistemas de fase contínua água destilada e água salina para cada tipo de óleo.

**Tabela 7** - Resultados comparativos da redução da tensão interfacial entre sistemas com água destilada e água salina.

Tipo de Óleo	Tensão interfacial [N/m]		Percentual de redução
	Com água destilada	Com água salina	
Soja	0,02013	0,01487	26%
Spindura 10	0,03291	0,02797	15%
Lubrificante Usado	0,10099	0,02516	75%

Fonte: Autora.

Estes resultados mostram um percentual de diminuição de 26% na tensão interfacial do óleo de soja em água destilada em comparação ao óleo de soja em água salina 3,5%, valor maior do que o apresentado pelo óleo Spindura 10 nas mesmas condições, que foi 15%. Esta diferença ocorre basicamente pela composição dos óleos em questão, o primeiro, de soja é de origem vegetal rico em ácidos graxos que possuem uma região polar, que apesar de pequena em relação ao composto, influencia na tensão interfacial principalmente na presença de íons na fase contínua.

Já o Spindura 10 é um óleo lubrificante, derivado do petróleo (óleo mineral) ou sintéticos, tendo base parafínica e/ou naftalênica, compostos que são apolares. Assim a alteração da tensão interfacial na presença de íons se dá pela presença de aditivos ou heteroátomos que possam fazer parte da composição do produto.

O incremento na variação percentual entre o óleo Spindura 10 e o óleo lubrificante usado pode ser explicado pela presença de fuligem no óleo usado. Estas partículas de impureza agem na interface fazendo com que a molhabilidade da gota aumente, portanto tendo um decréscimo no valor da tensão interfacial.

Na Tabela 8 são apresentados os resultados do ângulo de contato medido entre o óleo de soja e o aço inoxidável submersos em água destilada.

**Tabela 8** - Resultados das medições de ângulo de contato do óleo de soja e aço inoxidável em água destilada.

Média dos Testes [°]	Desvio Padrão
72,7	± 0,8
72,6	± 0,8
72,7	± 0,5
72,8	± 0,7
72,8	± 0,8
72,4	± 0,5
72,7	± 0,5
72,9	± 0,4
72,9	± 0,6
73,1	± 0,8
Média final	72,7° ±0,64

Fonte: Autora.

No item 4.5.1 deste documento, foram testados os ângulos de contato para o sistema óleo de soja e água destilada nas simulações para avaliação do valor de máximo obtido para o diâmetro médio da gota, visando à maior proximidade com os resultados experimentais e avaliação da sensibilidade do modelo à alteração deste parâmetro.

Na Tabela 9, são apresentados os resultados experimentais de ângulo de contato do óleo de soja e aço inoxidável submerso em água salina.

**Tabela 9** - Resultados das medições de ângulo de contato do óleo de soja e aço inoxidável em água salina.

Média dos Testes [°]	Desvio Padrão
142,1	±2,4
142,4	±2,6
143,2	±3,5
142,1	±3,5
142,6	±3,8
142,1	±4,1
142,1	±4,4
141,8	±4,9
142,1	±5,1
142,1	±2,4
Média final	142,2° ±3,67

Fonte: Autora.

Na Tabela 10 são apresentados os resultados experimentais de ângulo de contato do óleo Spindura 10 e aço inoxidável submerso em água destilada.

**Tabela 10** - Resultados das medições de ângulo de contato do óleo Spindura 10 e aço inoxidável submersos em água destilada.

Média dos Testes [°]	Desvio Padrão
115,3	± 0,3
114,9	± 1,0
115,0	± 0,8
114,9	± 1,0
114,5	± 1,0
113,5	± 1,7
114,4	± 0,9
112,6	± 2,0
114,0	± 0,6
114,0	± 0,2
Média final	114,3° ±1,76

Fonte: Autora.

Na Tabela 11 são apresentados os resultados experimentais de ângulo de contato do óleo lubrificante queimado e aço inoxidável submerso em água salina.

**Tabela 11**- Resultados das medições de ângulo de contato do óleo lubrificante usado e aço inoxidável submersos em água salina.

Média dos Testes [°]	Desvio Padrão
134,3	± 1,7
134,7	± 1,8
135,0	± 0,5
135,2	± 1,6
135,1	± 1,6
135,0	± 1,0
134,3	± 1,5
134,4	± 1,3
135,0	± 1,1
134,7	± 1,5
Média final	134,7° ±1,36

Fonte: Autora.

Por se tratar de uma análise difícil de ser realizada, principalmente na situação de gota invertida, pelo fato da densidade do óleo ser menor que a do meio contínuo e a gota apresentar movimento ascendente, nesta etapa os ângulos de contato dos sistemas de óleo Spindura 10/ água salina e óleo lubrificante usado/ água destilada não foram apresentados, pois sua análise não foi possível, apresentando gotas excessivamente grandes para a janela de visualização disponível no equipamento e alta instabilidade no resultado, não podendo ser conclusivo.

#### **4.2. Variação do Diâmetro de Gota para os Sistemas Experimentais**

Nos dados apresentados na Tabela 12, observa-se que, para o sistema água destilada vs. óleo de soja a diminuição do diâmetro de gota frente ao aumento da velocidade de injeção é de 15,82%. Já para o sistema água salina vs. óleo de soja este percentual cai para 4,21%. Para água destilada vs. óleo Spindura 10 a diminuição no diâmetro da gota foi de 16,92%, para água salina vs. óleo Spindura 10 a diminuição foi de 16,94%.

Para água destilada vs. óleo lubrificante usado, a diminuição no diâmetro da gota foi de 6,85%, para água salina vs. óleo lubrificante usado à diminuição foi de 5,37%. Com a diminuição da tensão interfacial, frente à presença de sal na fase contínua, observamos uma alteração no diâmetro médio apresentado pelas gotas que teve menor importância frente ao aumento de velocidade.

Segundo XU et al. (2005), quanto maior a tensão interfacial, maior o diâmetro da gota formada, apesar da diferença de escalas presentes neste estudo e a discussão do documento atual, o comportamento mostrou-se semelhante. Assim, pode-se afirmar que o diâmetro da gota é afetado diretamente pela tensão interfacial, corroborando com os resultados obtidos na comparação entre os sistemas com e sem a presença de íons no meio contínuo (Tabela 7).

Na Tabela 12 podem ser observados os dados experimentais de diâmetro de gota formada para as três velocidades e sistemas óleo/água utilizados.

**Tabela 12-** Dados experimentais do diâmetro médio da gota com a velocidade de injeção.

Sistema	Diâmetro médio de gota [mm]		
	Velocidades aproximadas		
	0,2 m/s	0,3 m/s	0,4 m/s
Soja x Água destilada	5,53	5,24	4,65
Soja x Água salina	4,77	4,72	4,56
Spindura 10 x Água destilada	4,83	4,73	4,02
Spindura 10 x Água salina	4,75	4,64	3,95
Óleo lubrificante Usado x Água destilada	4,57	4,34	4,25
Óleo lubrificante Usado x Água salina	4,31	4,16	4,08

Fonte: Autora.

Na Tabela 13, são apresentados os dados comparativos percentuais para as velocidades e a alteração do meio contínuo para cada tipo de óleo.

**Tabela 13 -** Dados comparativos entre sistemas com e sem a presença de íons no meio contínuo para as diferentes velocidades.

Tipos de Óleo	% de diminuição do diâmetro da gota: água destilada/ água salina		
	Velocidades aproximadas		
	0,2 m/s	0,3 m/s	0,4 m/s
Soja	13,74	9,92	1,94
Spindura 10	1,66	1,90	1,74
Lubrificante Usado	5,69	4,15	4,00

Fonte: Autora.

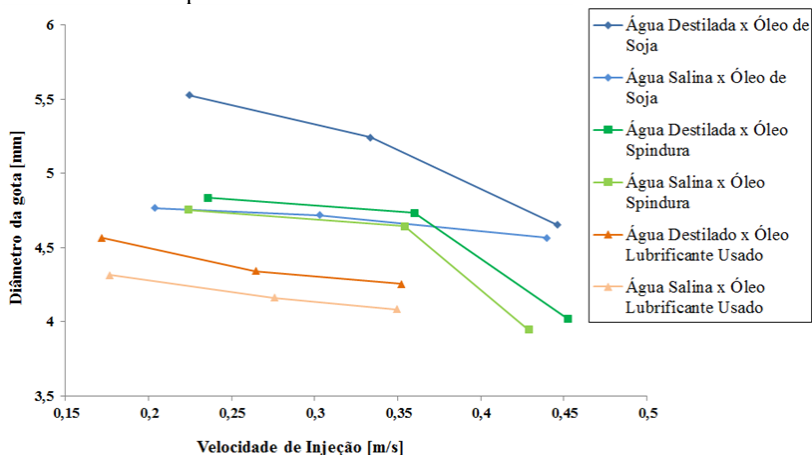
Frente aos dados da Tabela 13 pode ser observado que as alterações no diâmetro das gotas apresentadas para o óleo de soja são maiores e decaem com menos intensidade com o aumento da velocidade de injeção. Provando que a velocidade de injeção que provoca o desprendimento prematuro da gota, nestas situações, apresenta uma importância próxima à alteração apresentada pela diferença de tensão interfacial em decorrência à alteração do meio contínuo.

Para o óleo Spindura 10 o diâmetro da gota apresentou variação baixa com relação à alteração do meio contínuo e quase constante com relação ao aumento de velocidade de injeção.

Já para o óleo lubrificante usado, a perturbação no diâmetro de gota formada causada pela alteração do meio contínuo, apresentou-se pouco significativo, frente aos demais resultados, tendo em vista que a alteração do meio contínuo provocou uma redução de 75% na tensão interfacial, resultado apresentado na Tabela 7 da seção 4.1. Pode-se afirmar que o aumento da velocidade de injeção não provocou uma alteração com importância suficientemente grande como a apresentada pela alteração do meio de imersão do sistema.

Na Figura 22 são apresentados os resultados experimentais na forma de gráfica dos dados da tabela 12, que permite realizar uma análise comparativa da influência dos parâmetros de salinidade do meio contínuo e do aumento da velocidade de injeção.

**Figura 22** - Dados comparativos entre sistemas com e sem a presença de íons no meio contínuo para as diferentes velocidades.



Fonte: Autora.

Para os dados apresentados na Tabela 14, observa-se que no sistema com óleo de soja a tendência de aumento da altura de gotejamento foi mantida com o aumento da velocidade de injeção,



sendo que, em sua imersão em água destilada, houve um aumento mais acentuado da velocidade baixa para média e com menor intensidade para a velocidade alta. Já para a fase contínua água salina, a altura de gotejamento manteve uma taxa de crescimento constante, praticamente dobrando a altura a cada aumento de velocidade.

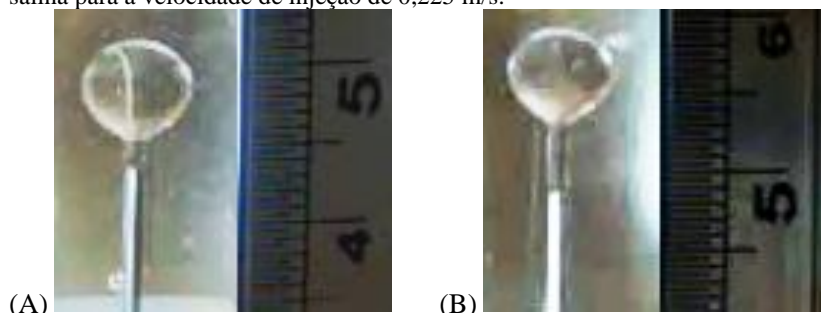
**Tabela 14** - Valores da altura média de gotejamento de óleo/desvio médio dos dados para as situações experimentais estudadas.

Sistema	Média de altura de gotejamento [mm] / Desvio Padrão		
	Velocidades aproximadas		
	0,2 m/s	0,3 m/s	0,4 m/s
Óleo de soja x Água destilada	2,00 ± 1,00	11,00 ± 1,0	17,50 ± 1,30
Óleo de soja x Água salina	5,00 ± 2,00	10,20 ± 1,10	20,30 ± 3,00
Spindura 10 x Água destilada	2,20 ± 0,30	6,30 ± 3,80	5,30 ± 0,60
Spindura 10 x Água salina	1,50 ± 0,50	1,20 ± 0,20	3,50 ± 2,30
Óleo lubrificante Usado x Água destilada	4,70 ± 2,00	23,50 ± 6,10	35,80 ± 1,20
Óleo lubrificante Usado x Água salina	3,20 ± 1,00	17,50 ± 3,60	33,50 ± 0,50

Fonte: Autora.

Na Figura 23 são apresentadas imagens comparativas experimentais para os instantes antes do gotejamento, para o sistema óleo de soja/ água destilada e óleo de soja/ água salina.

**Figura 23** – (A) Imagem do sistema óleo de soja/ água destilada para a velocidade de injeção de 0,225 m/s. (B) Imagem do sistema óleo de soja/ água salina para a velocidade de injeção de 0,225 m/s.

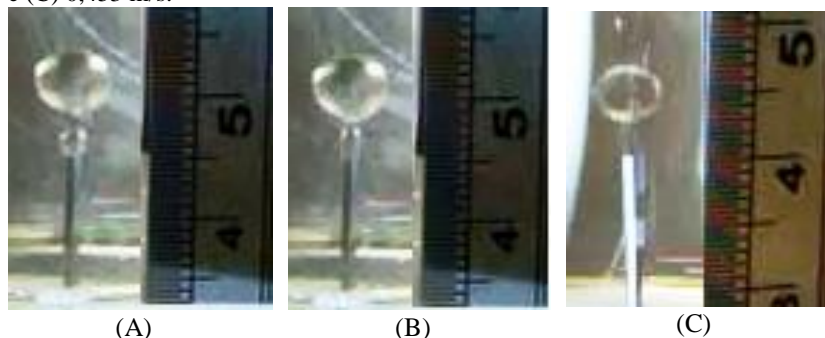


Fonte: Autora.

Neste comparativo pode-se observar que o sistema com fase dispersa água destilada apresenta um diâmetro médio de gota maior e a altura do fio de óleo é menor com relação ao sistema com fase dispersa de água salina, comprovando os resultados numéricos apresentados nas Tabelas 12 e 13.

Na Figura 24 são apresentadas as imagens dos experimentos para as três velocidades do sistema de injeção através do bocal com óleo Spindura 10 e água destilada.

**Figura 24** – Imagens experimentais do escoamento de óleo Spindura 10/água destilada, caso do bocal, para as velocidades de: (A) 0,236 m/s; (B), 0,360 m/s e (C) 0,453 m/s.

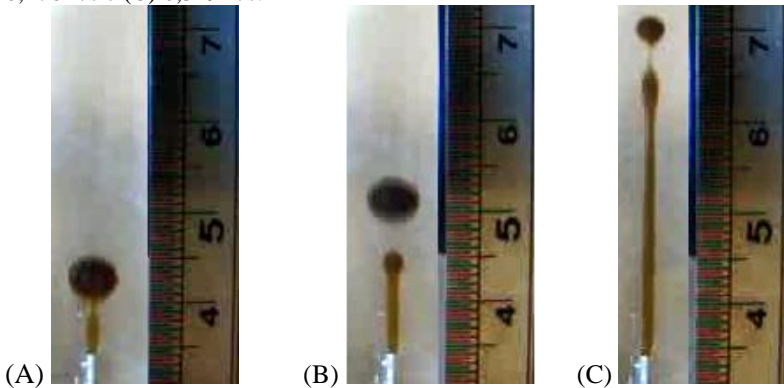


Fonte: Autora.

No caso do Spindura 10, o sistema com água destilada apresentou crescimento na altura de gotejamento da velocidade 0,2m/s para 0,3m/s, mas para a velocidade 0,4m/s a altura de gotejamento diminuiu, mostrando a influência da velocidade de injeção no desprendimento da gota, sendo este um fator importante frente à tensão interfacial. Estes dados foram apresentados nas Tabelas 11 e 13 e podem ser visualizados na Figura 23. Para a fase contínua água salina entre a velocidade 0,2m/s e 0,3m/s, a alteração na altura de gotejamento foi bastante sutil, tendo leve queda e aumentando somente na velocidade de 0,4m/s.

No caso do óleo lubrificante usado, para ambos os meios contínuos houve um aumento significativo, mostrando uma grande influência da velocidade de injeção na altura de gotejamento observada, como pode ser visto na Figura 25.

**Figura 25** - Imagens experimentais do escoamento de óleo lubrificante usado/água salina, caso do bocal, para as velocidades de: (A) 0,177m/s; (B) 0,276m/s e (C) 0,349m/s.



Fonte: Autora.

### 4.3. Etapa de Modelagem e Simulação

Neste subtítulo são apresentados os resultados do ajuste de cada parâmetro de importância para que as simulações representassem da melhor maneira possível os aspectos observados no sistema experimental. Posteriormente, com os parâmetros devidamente

ajustados, foram realizadas as simulações destinadas à comparação com os ensaios experimentais, sendo então possível avaliar o grau de representatividade da simulação para cada sistema e colocar em evidência alguns aspectos do campo de velocidades simulado, e que não é possível visualizar nos experimentos sem a presença de um traçador adequado.

#### 4.3.1. Estudo de Malha

Na Tabela 15 são apresentados os resultados do estudo de malha, que considerou aspectos importantes tanto da representação do fenômeno como dos custos computacionais requeridos.

**Tabela 15-** Dados obtidos das avaliações das malhas.

Nº de elementos das Malhas	Percentual do Diâmetro médio da gota simulada frente ao experimental	Percentual da Altura de gotejamento simulada frente ao experimental	Custo computacional
101.237	93,32	227,73	7,12Gb/ 18h, 4 min e 59s
167.285	95,64	278,77	9,47Gb/ 35h, 18min 35s
204.544	96,48	199,56	10,81Gb/ 29h, 35min e 18s

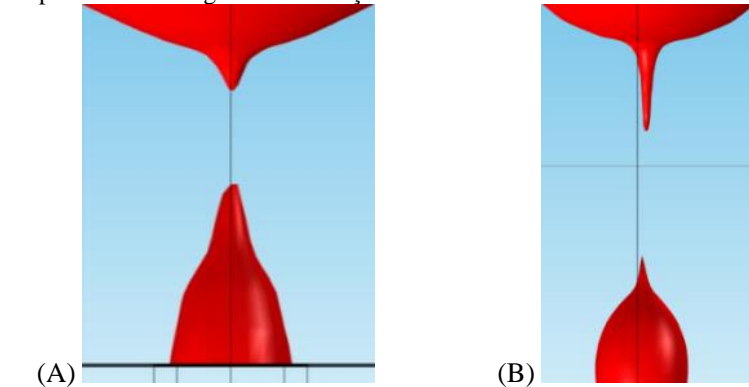
Fonte: Autora.

Nos dados apresentados na Tabela 15, observa-se um aumento no atingimento do diâmetro médio da gota com o aumento do número de elementos da malha. Com relação à altura de gotejamento pode-se observar um atingimento ainda distante do experimental, mas sinalizando um resultado mais próximo para a malha de 204.544 elementos. O custo computacional apresentou um aumento gradativo do uso de memória RAM sendo que o tempo de simulação para malha de 167.285 elementos foi maior do que o requerido para as outras malhas,

isso se deve ao fato de esta malha apresentar elementos com tamanhos desiguais, o que pode dificultar os cálculos e conseqüentemente, aumentar o tempo de simulação. Não houve um aumento ainda maior no número de elementos da malha, pois houve uma limitação de *hardware*.

Nas Figuras 26 e 27 pode-se visualizar de forma detalhada a resolução apresentada por cada malha no momento do gotejamento. Na Figura 26 (A) é apresentada a imagem gerada na simulação com 101.237 elementos e Na Figura 26 (B) é apresentada a imagem gerada na simulação com 167.285 elementos.

**Figura 26**– (A) Imagem detalhada do momento do desprendimento da gota na simulação com 101.237 elementos. (B) Imagem detalhada do momento do desprendimento da gota na simulação com 167.285 elementos.



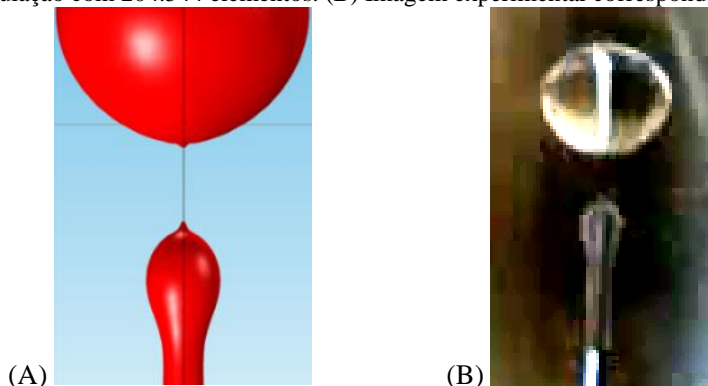
Fonte: Autora.

Na imagem apresentada na Figura 26 (A) pode-se observar que a definição do fio de óleo está comprometida, apresentando formas mais retas e não arredondadas como o experimental, não representando de forma adequada a realidade física.

Na imagem apresentada na Figura 26 (B) da malha de 167.285 elementos, veem-se formas mais arredondadas na lateral do fio de óleo, mas ainda tendo pontas agudas não esperadas na área central do fio de óleo e da gota formada.

Na Figura 27 (A) observa-se a imagem gerada pela simulação com a malha de 204.544 elementos e na Figura 27 (B) tem-se a imagem experimental comparativa.

**Figura 27** – (A) Imagem detalhada do momento do desprendimento da gota na simulação com 204.544 elementos. (B) Imagem experimental correspondente.



Fonte: Autora.

Na imagem gerada pela simulação com 204.544 elementos, as formas arredondadas são bastante definidas e como pode ser observado na comparação com a imagem experimental, bastante semelhante, justificando o uso desta malha para as demais simulações do trabalho.

Para o sistema de injeção de óleo através da fenda foi utilizado número de elementos semelhante ao utilizado para o bocal cilíndrico.

#### 4.3.2. *Análise Comparativa Entre Experimental e Simulação da Formação da Gota*

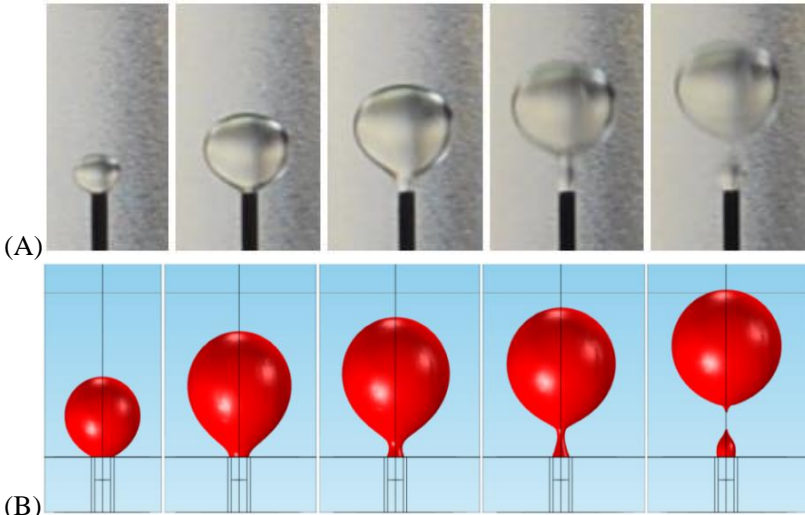
Com relação à formação da gota, pode ser observado que o comportamento fluidodinâmico da simulação, Figura 28 (B), apresentou grande semelhança com as imagens experimentais, Figura 28 (A).

Como a teoria vista na sessão 2.3. deste trabalho: a criação de gotas a partir de um capilar ou bocal envolve quatro passos principais; (1) a formação de gotas (Figura 1a), em que a fase dispersa é forçada para fora do capilar; (2) o crescimento da gota na abertura do bocal (Figura 1b); (3) a formação de um afinamento (pescoço) (Figura 1c; Figura 1d) e (4) o desprendimento (Figura 1e), quando a gota se

desprendendo da fase de origem, movendo-se através da fase contínua, (TIMGREN *et al.*, 2007). Este processo foi observado em cada uma de suas etapas na Figura 28 (A) sendo estas as imagens do processo experimental e reproduzida com sucesso na simulação, (Figura 28 B).

Para permitir uma visualização mais clara e detalhada das fases de formação e descolamento da gota, este experimento foi realizado a uma velocidade de injeção de óleo de 0,0413 m/s.

**Figura 28** – (A) Imagens experimentais da formação da gota de óleo de soja em água destilada a velocidade de 0,0413 m/s. (B) Imagens da simulação representando a formação da gota nas mesmas condições.



Fonte: Autora.

#### 4.3.3. Ajuste dos Parâmetros de Simulação e Imagens Comparativas

Inicialmente fixaram-se os valores de velocidade de injeção em de 0,0413 m/s e tensão interfacial  $\sigma = 0,030$  N/m e com a variação do parâmetro de reinicialização gamma  $\gamma$  ajustou-se o mesmo para  $\gamma = 0,05$  m/s, pois apresentou maior facilidade na convergência.

O ângulo de contato exigiu um estudo próprio e mais detalhado, assim além dos dados experimentais foi feito um estudo com as

simulações para comprovar a sensibilidade do simulador quanto aos principais parâmetros.

Inicialmente foi feita a avaliação de  $65^\circ$  a  $85^\circ$ , variando-se de 5 em  $5^\circ$ , sendo apresentado um valor de máximo entre  $70^\circ$  e  $75^\circ$ . Assim este intervalo foi explorado de 1 e  $1^\circ$ .

Para a obtenção destes dados, foi simulado o sistema óleo de soja/ água destilada, com as respectivas propriedades físico-químicas de densidade e viscosidade avaliadas experimentalmente e apresentadas no item 4.1 deste documento os demais parâmetro da simulação foram fixados como: velocidade de injeção de 0,0413 m/s, parâmetro de reinicialização  $\gamma=0,05$  m/s, tensão interfacial  $\sigma =0,03$  N/m, fazendo-se variar somente o ângulo de contato  $\theta$ .

Nas figuras desta seção, são apresentadas as imagens comparativas entre os experimentos e as simulações, com imagens geradas através de filmagens dos experimentos e através do *software* COMSOL que permite visualizar o contorno de fração de volume de 0,5, um corte central em escala de cores para ilustrar as diferentes velocidades apresentadas no domínio a cada instante e os vetores proporcionais de velocidade indicando a intensidade, sentido e direção. Para os sistemas com óleo de soja o contorno da fração de volume 0,5 é cinza e os vetores de velocidade são pretos, para os sistemas com óleo Spindura 10 o contorno da fração de volume 0,5 é branco e os vetores de velocidade são pretos e para os sistemas com óleo lubrificante usado o contorno da fração de volume 0,5 é preto e os vetores de velocidade são cinza.

Os resultados percentuais comparativos para o diâmetro médio de gota simulado são apresentados na Tabela 16.



**Tabela 16** – Resultado dos testes de ângulo de contato para o atingimento do diâmetro médio da gota formada.

Ângulos de contato testados [°]	Percentual do Diâmetro Médio da gota simulada frente ao experimental
65	88,70
70	88,75
71	88,75
72	88,79
73	89,15
74	87,97
75	88,61
80	87,70
85	86,80

Fonte: Autora.

Como apresentado na Tabela 8 (item 4.1), pode ser observado que o ângulo de contato formado para este sistema experimentalmente foi de 72,7°, o que corresponde ao valor obtido nas simulações que foi de 73°, justificando seu uso, mostrando a robustez e potencialidade da simulação desse tipo de modelo para representação deste sistema experimental.

#### 4.3.3.1. Bocal Cilíndrico

Neste item são apresentadas simulações referentes à injeção através do bocal cilíndrico para os sistemas de óleo de soja/ água destilada, óleo Spindura 10/água destilada e óleo lubrificante usado/ água salina.

Sendo a tensão interfacial um parâmetro de grande importância, este foi o último a ser ajustado; assim, para cada velocidade, foram testados valores de tensão interfacial, tendo-se como principal objetivo reproduzir o diâmetro da gota formada. Os resultados apresentados nas Tabelas a seguir são resultado da média de cinco gotas sucessivas simuladas para cada condição. Os desvios percentuais entre experimentos e simulações são mencionados no corpo do texto ao se discutir os resultados.

#### 4.3.3.1.1. Sistema Óleo de Soja/ Água Destilada Para a Velocidade de Injeção de 0,225m/s

Na Tabela 17, 18 e 19, podem ser observados os resultados do diâmetro da gota, altura de fragmentação e tempo entre liberação de gotas, para o sistema de injeção através do bocal com velocidade de 0,225 m/s. Na Tabela 17 temos os dados para a tensão interfacial  $\sigma=0,030$  N/m.

**Tabela 17** – Dados de Altura de gotejamento, Diâmetro médio da gota formada e Tempo entre liberação de gotas para a tensão interfacial  $\sigma =0,030$  N/m, para o sistema óleo de soja x água destilada com injeção através do bocal e velocidade de 0,225 m/s.

Tensão Interfacial de 0,030 N/m			
Dados	Altura de Gotejamento [mm]	Diâmetro Médio [mm]	Tempo entre Liberação de Gotas [s]
Dados Experimentais	2,00	5,53	1,32
Dados da Simulação	5,96	5,25	1,05
Desvio Percentual (Simulado frente ao Experimental)	+198,00	-5,06	-20,45

Fonte: Autora.

Na Tabela 18, são apresentados os resultados gerados através das simulações do sistema de óleo de soja e água destilada para o sistema de injeção através do bocal e velocidade de injeção de 0,225 m/s com tensão interfacial  $\sigma=0,035$  N/m.

**Tabela 18** – Dados de Altura de gotejamento, Diâmetro médio da gota formada e Tempo entre liberação de gotas para a tensão interfacial  $\sigma = 0,035$  N/m, para o sistema óleo de soja x água destilada com injeção através do bocal e velocidade de 0,225 m/s.

Tensão Interfacial de 0,035 N/m			
Dados	Altura de Gotejamento [mm]	Diâmetro Médio [mm]	Tempo entre Liberação de Gotas [s]
Dados Experimentais	2,00	5,53	1,32
Dados da Simulação	5,62	5,48	1,16
Desvio Percentual (Simulado frente ao Experimental)	+181,00	-0,90	-12,12

Fonte: Autora.

No intuito de melhorar os resultados de atingimento, fez-se uma nova simulação com  $\sigma = 0,036$  N/m e os resultados gerados são apresentados na Tabela 19.

**Tabela 19** – Dados de Altura de gotejamento, Diâmetro médio da gota formada e Tempo entre liberação de gotas para a tensão interfacial  $\sigma = 0,036$  N/m, para o sistema óleo de soja x água destilada com injeção através do bocal e velocidade de 0,225 m/s.

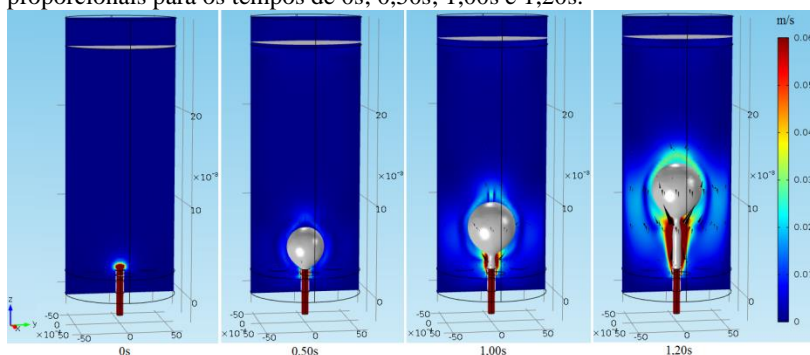
Tensão Interfacial de 0,036 N/m			
Dados	Altura de Gotejamento [mm]	Diâmetro Médio [mm]	Tempo entre Liberação de Gotas [s]
Dados Experimentais	2,00	5,53	1,32
Dados da Simulação	5,31	5,52	1,19
Desvio Percentual (Simulado frente ao Experimental)	+165,50	-0,18	-9,85

Fonte: Autora.

Como podem ser observados na Tabela 19, os valores gerados para o parâmetro de tensão interfacial de 0,036 N/m apresentaram maior proximidade com os experimentais tendo atingimento de 99,94% no diâmetro de gota, parâmetro de extrema importância para estudos de coalescência. O tempo entre liberação de gotas atingiu 90,15% e a altura de gotejamento foi o parâmetro que, apesar de melhor que as outras tensões interfaciais testadas, ainda é o valor mais distante do experimental, fato que pode ser justificado pela malha insuficientemente grande não representar de forma adequada um fio de óleo com cerca de: 0,026 mm de diâmetro.

A Figura 29 mostra a simulação óleo de soja/água destilada a 22°C injetada através de um bocal a velocidade de 0,225 m/s com os parâmetros de simulação apresentados na Tabela 19, e reúne imagens que mostram desde o instante inicial, a formação da gota, seu enchimento, a formação de um fio de óleo com a ascensão da gota.

**Figura 29** – Imagens da simulação do escoamento de óleo de soja/água destilada para a velocidade de injeção de 0,225 m/s, sendo em cinza a superfície que define a interface (fração de volume óleo de 0,5); em escala de cores, o plano central com o campo de velocidades, e em preto os vetores de velocidade proporcionais para os tempos de 0s; 0,50s; 1,00s e 1,20s.



Fonte: Autora.

Ainda na Figura 29 pode-se visualizar a formação dos vetores de velocidade e o perfil de velocidade formado no plano de corte central a gota em formação. No tempo de 1,20s pode-se perceber a formação de uma zona de velocidade zero a certa distância da gota, pois os vetores

ascendentes que acompanham o movimento da gota são anulados pelos vetores descendentes que promovem a realocação da água deslocada da região central por onde ocorre o escoamento da gota de óleo.

Na Figura 30 tem-se a imagem experimental das mesmas condições da simulação, que mostra forte semelhança com o tempo de 1,00s da simulação, com o crescimento da gota e formação do fio de óleo.

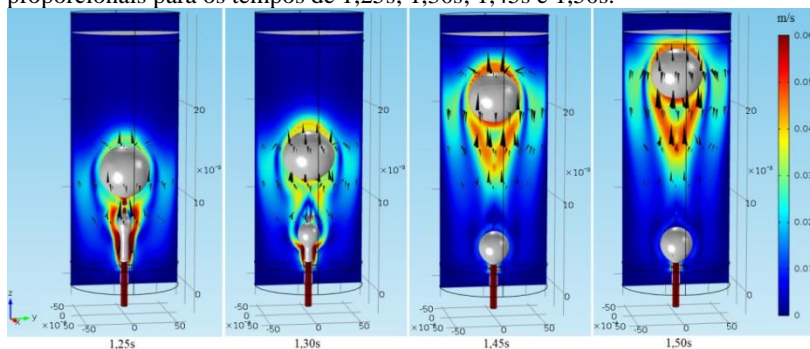
**Figura 30** – Imagem experimental do escoamento de óleo de soja/água destilada, para o caso do bocal, correspondente ao tempo de 1,00s para a velocidade de injeção de 0,225 m/s.



Fonte: Autora.

A Figura 31 apresenta a continuidade das imagens da simulação onde pode ser observado o desprendimento da gota de óleo do fio formado e o vetor de velocidade que mostra a repulsão gerada por esta ruptura, (quadro 1,25s). Nos demais quadros, podem ser observadas, a ascensão da gota formada, bem como os vetores de velocidade que ganham maior proporção à medida que ocorre o deslocamento da gota e o perfil de velocidade formado por este deslocamento pode ser visto no plano de corte central ilustrado em escala de cinza, e ao mesmo tempo na parte inferior do domínio podemos visualizar o crescimento de uma nova gota junto ao bocal.

**Figura 31** – Imagens da simulação do escoamento de óleo de soja/água destilada para a velocidade de injeção de 0,225 m/s, sendo em cinza a superfície que define a interface (fração de volume óleo de 0,5); em escala de cores, o plano central com o campo de velocidades, e em preto os vetores de velocidade proporcionais para os tempos de 1,25s; 1,30s; 1,45s e 1,50s.



Fonte: Autora.

Na Figura 32, encontram-se as imagens experimentais que se assemelham respectivamente com os quadros de 1,25s e 1,45s da simulação, (Figura 29), que mostram momentos após o desprendimento da gota e a ascensão da gota com o crescimento de uma nova gota junto ao bocal.

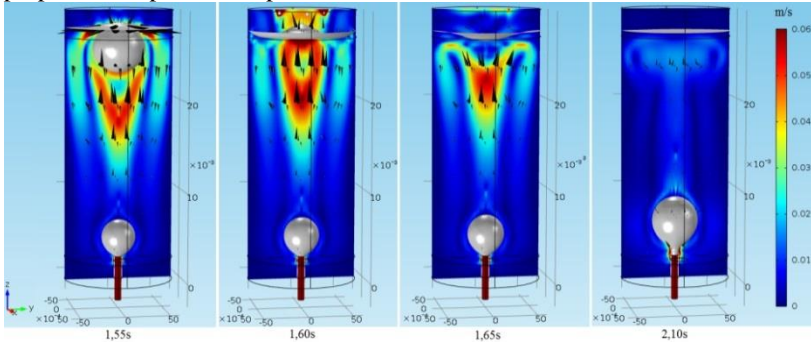
**Figura 32** - Imagens experimentais do escoamento de óleo de soja/água destilada, para o caso do bocal, correspondente aos tempos de 1,25s e 1,45s para a velocidade de injeção de 0,225 m/s.



Fonte: Autora.

Na Figura 33, têm-se os quadros da simulação que mostram a chegada da gota até a fase superior de óleo livre, sua coalescência com a fase óleo e a formação de vórtices com simetria bilateral no sentido vertical que mostram o retorno da água que foi arrastada com a gota. No último quadro, podemos ver os vórtices laterais perdendo intensidade, enquanto a próxima gota está em crescimento.

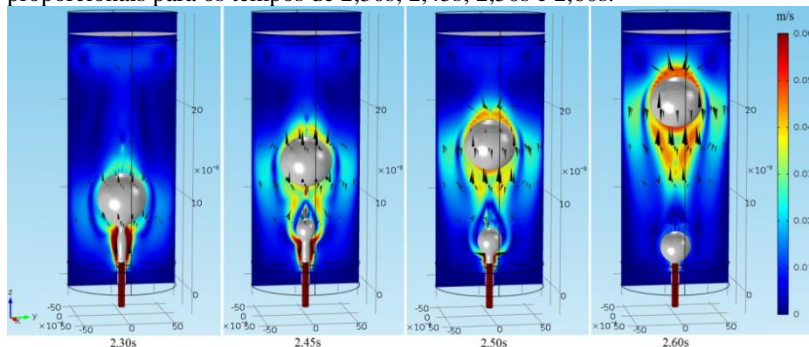
**Figura 33** - Imagens da simulação do escoamento de óleo de soja/água destilada para a velocidade de injeção de 0,225 m/s, sendo em cinza a superfície que define a interface (fração de volume óleo de 0,5); em escala de cores, o plano central com o campo de velocidades, e em preto os vetores de velocidade proporcionais para os tempos de 1,55s; 1,60s; 1,65s e 2,10s.



Fonte: Autora.

E no último conjunto de quadros, Figura 34, pode ser observado novamente o processo de formação de um fio de óleo, o desprendimento da gota e seu movimento de ascensão, apresentando um perfil de velocidade diferenciado, por se tratar de uma segunda gota e a fase contínua ainda ter vetores de velocidade oriundos da liberação da primeira gota.

**Figura 34** – Imagens da simulação do escoamento de óleo de soja/água destilada para a velocidade de injeção de 0,225 m/s, sendo em cinza a superfície que define a interface (fração de volume óleo de 0,5); em escala de cores, o plano central com o campo de velocidades, e em preto os vetores de velocidade proporcionais para os tempos de 2,30s; 2,45s; 2,50s e 2,60s.



Fonte: Autora.

#### 4.3.3.1.2. Sistema Óleo de Soja- Avaliação da Alteração do Meio Contínuo Para a Velocidade de Injeção de 0,3m/s

Na Tabela 20 são apresentados os resultados gerados através das simulações do sistema de óleo de soja e água destilada para o sistema de injeção através do bocal e velocidade de injeção de 0,333 m/s com tensão interfacial  $\sigma=0,036$  N/m.



**Tabela 20** – Dados de Altura de gotejamento, Diâmetro médio da gota formada e Tempo entre liberação de gotas para a tensão interfacial  $\sigma = 0,036$  N/m, para o sistema óleo de soja x água destilada com injeção através do bocal e velocidade de 0,333 m/s.

Tensão Interfacial de 0,036 N/m			
Dados	Altura de Gotejamento [mm]	Diâmetro Médio [mm]	Tempo entre Liberação de Gotas [s]
Dados Experimentais	11,00	5,24	0,79
Dados da Simulação	10,29	4,70	0,62
Desvio Percentual (Simulado frente ao Experimental)	-6,45	-10,31	-21,52

Fonte: Autora.

Ainda buscando a melhoria do percentual de atingimento para que os resultados da simulação fiquem mais próximos dos experimentais, fez-se a simulação alterando o valor da tensão interfacial.

Na Tabela 21 são apresentados os resultados gerados através das simulações do sistema de óleo de soja e água destilada para o sistema de injeção através do bocal e velocidade de injeção de 0,333 m/s com tensão interfacial  $\sigma = 0,038$  N/m.

**Tabela 21** – Dados de Altura de gotejamento, Diâmetro médio da gota formada e Tempo entre liberação de gotas para a tensão interfacial  $\sigma = 0,038$  N/m, para o sistema óleo de soja x água destilada com injeção através do bocal e velocidade de 0,333 m/s.

Tensão Interfacial de 0,038 N/m			
Dados	Altura de Gotejamento [mm]	Diâmetro Médio [mm]	Tempo entre Liberação de Gotas [s]
Dados Experimentais	11,00	5,24	0,79
Dados da Simulação	9,62	5,26	0,62
Desvio Percentual (Simulado frente ao Experimental)	-12,54	+0,38	-21,52

Fonte: Autora.

Para a velocidade de 0,333 m/s, a tensão interfacial de 0,038 N/m apresentou maior proximidade com os resultados experimentais percentual de atingimento do diâmetro da gota de 10,36% e 78,85% para o tempo entre liberação de gotas e 87,48% para a altura de gotejamento.

Na Tabela 22, são apresentados os resultados gerados através das simulações do sistema de óleo de soja e água salina para o sistema de injeção através do bocal e velocidade de injeção de 0,315 m/s com tensão interfacial  $\sigma = 0,030$  N/m.

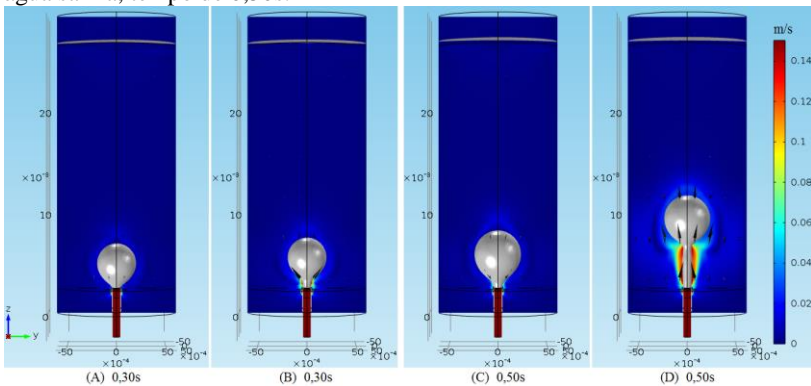
**Tabela 22** – Dados de Altura de gotejamento, Diâmetro médio da gota formada e Tempo entre liberação de gotas para a tensão interfacial  $\sigma = 0,030$  N/m, para o sistema óleo de soja/água salina com injeção através do bocal e velocidade de 0,315 m/s.

Tensão Interfacial de 0,030 N/m			
Dados	Altura de Gotejamento [mm]	Diâmetro Médio [mm]	Tempo entre Liberação de Gotas [s]
Dados Experimentais	11,20	4,72	0,68
Dados da Simulação	10,33	4,55	0,48
Desvio Percentual (Simulado frente ao Experimental)	-7,77	-3,60	-29,41

Fonte: Autora.

Na Figura 35 são apresentadas as imagens geradas pelas simulações de injeção de óleo de soja em água destilada e água salina para cada tempo.

**Figura 35** – Imagens das simulações. (A)- Sistema óleo de soja/ água destilada, tempo de 0,30s. (B)- Sistema óleo de soja/ água salina, tempo de 0,30s. (C)- Sistema óleo de soja/ água destilada, tempo de 0,50s. (D)- Sistema óleo de soja/ água salina, tempo de 0,50s.

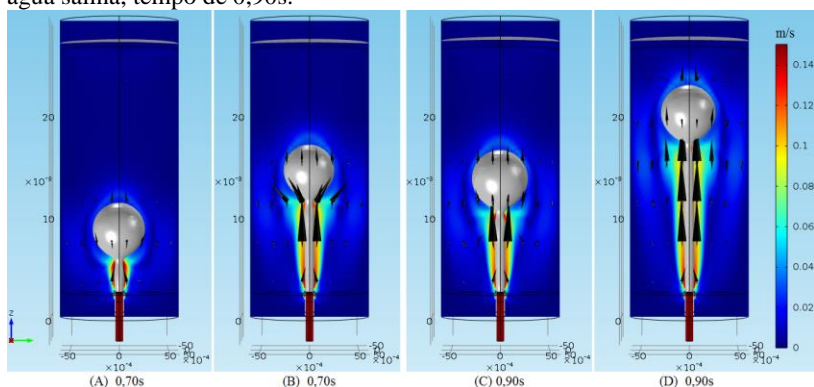


Fonte: Autora.

Nestas percebem-se as diferenças evolutivas apresentadas, que refletem a influência exercida pelo meio contínuo em cada simulação, que por sua vez afeta diretamente a tensão interfacial, principal parâmetro que atua na fronteira mais importante deste tipo de sistema que é a interface.

Na Figura 36 tem-se a continuidade do comparativo de imagens com a alteração do meio contínuo do sistema óleo de soja e água destilada/ salina.

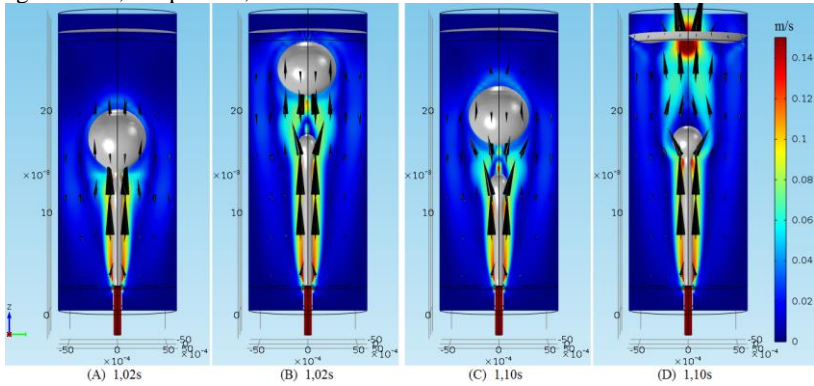
**Figura 36** - Imagens das simulações. (A)- Sistema óleo de soja/ água destilada, tempo de 0,70s. (B)- Sistema óleo de soja/ água salina, tempo de 0,70s. (C)- Sistema óleo de soja/ água destilada, tempo de 0,90s. (D)- Sistema óleo de soja/ água salina, tempo de 0,90s.



Fonte: Autora.

A Figura 37 apresenta a sequência dos quadros comparativos das simulações com a alteração do meio contínuo do sistema óleo de soja e água destilada/ salina.

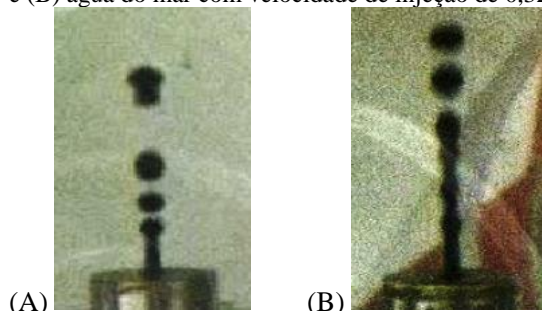
**Figura 37** - Imagens das simulações. (A)- Sistema óleo de soja/ água destilada, tempo de 1,02s. (B)- Sistema óleo de soja/ água salina, tempo de 1,02s. (C)- Sistema óleo de soja/ água destilada, tempo de 1,10s. (D)- Sistema óleo de soja/ água salina, tempo de 1,10s.



Fonte: Autora.

Masutani, (1999), utilizando um óleo cru do campo de Neptune Spar (Surface Piercing Articulated Reservoir, em português Reservatório Penetrante Articulado de Superfície) com massa específica de  $861 \text{ kg/m}^3$  e viscosidade dinâmica de  $0,0130 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ , (propriedades a  $25^\circ\text{C}$ ), realizou um experimento injetando este por um orifício de  $1\text{mm}$  de diâmetro em água potável, (velocidade de  $0,36\text{m/s}$ ) e água do mar, (velocidade de  $0,32\text{m/s}$ ). As imagens obtidas podem ser visualizadas na Figura 38.

**Figura 38** – Imagens dos experimentos realizados por Masutani, (1999), injetando óleo cru em: (A) água potável com velocidade de injeção de 0,36 m/s e (B) água do mar com velocidade de injeção de 0,32 m/s.



(A) Fonte: Masutani, (1999).

(B)

Apesar deste óleo possuir características físico-químicas diferentes do óleo de soja, pode-se observar que a velocidades bastante próximas o resultado de altura de gotejamento para a injeção em água potável e em água do mar também apresentou aumento, corroborando os dados experimentais obtidos no presente trabalho e representados de forma bastante próxima pelas simulações, Figura 37 B (óleo de soja injetado em água salina) e Figura 37 C (óleo de soja injetado em água destilada).

#### 4.3.3.1.3. Sistema óleo de Soja/ Água Destilada Para a Velocidade de Injeção de 0,446m/s

Na Tabela 23 são apresentados os resultados gerados através da simulação do sistema de óleo de soja e água destilada para o sistema de injeção através do bocal e velocidade de injeção de 0,446 m/s com  $\sigma=0,036$  N/m.

**Tabela 23** – Dados de Altura de gotejamento, Diâmetro médio da gota formada e Tempo entre liberação de gotas para a tensão interfacial  $\sigma = 0,036$  N/m, para o sistema óleo de soja x água destilada com injeção através do bocal e velocidade de 0,446 m/s.

Tensão Interfacial de 0,036 N/m			
Dados	Altura de Gotejamento [mm]	Diâmetro Médio [mm]	Tempo entre Liberação de Gotas [s]
Dados Experimentais	17,50	4,65	0,46
Dados da Simulação	14,97	4,59	0,50
Desvio Percentual (Simulado frente ao Experimental)	-14,46	-1,29	+8,69

Fonte: Autora.

Para a velocidade de 0,446 m/s a maior aproximação foi apresentada para o valor de tensão interfacial de 0,036 N/m, com atingimento de 98,78% do diâmetro da gota, 108,69% do tempo entre liberação de gotas e 88,07% da altura de gotejamento.

A altura de gotejamento simulada para as velocidades de 0,333 m/s e 0,446 m/s ficou mais próxima do valor experimental; especula-se que este fato pode ser atribuído a uma coincidência numérica, pois não há equações dos modelos que orientem, coordenem ou governem a ruptura desta massa de óleo de sua fonte de origem, principalmente no que tange os fenômenos interfaciais. Neste caso a suposição de que a malha teria provocado a totalidade neste desvio, não é válida, pois para as três velocidades a malha foi mantida constante, sendo o desvio de magnitude diferenciada para cada uma destas simulações e o diâmetro do fio de óleo apresenta a mesma ordem de grandeza para as três velocidades.

#### 4.3.3.1.4. Sistema óleo de Spindura 10/ Água Destilada Para a Velocidade de Injeção de 0,236m/s

Na Tabela 24 são apresentados os resultados gerados através da simulação do sistema de óleo Spindura 10 em água destilada para o sistema de injeção através do bocal e velocidade de injeção de 0,236 m/s com  $\sigma = 0,030$  N/m.

**Tabela 24** – Dados de Altura de gotejamento, Diâmetro médio da gota formada e Tempo entre liberação de gotas para a tensão interfacial  $\sigma = 0,030$  N/m, para o sistema óleo Spindura 10 /água destilada com injeção através do bocal e velocidade de 0,236 m/s.

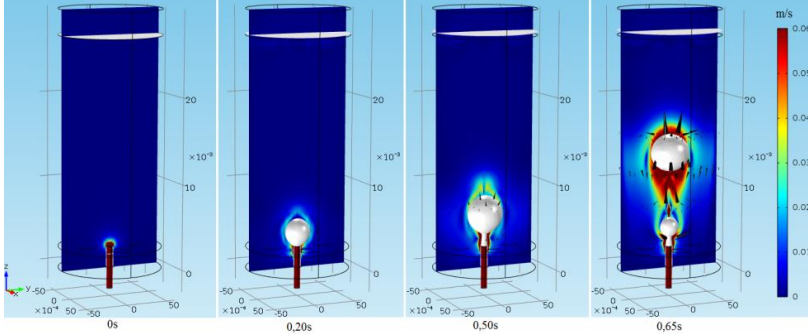
Tensão Interfacial de 0,030 N/m			
Dados	Altura de Gotejamento [mm]	Diâmetro Médio [mm]	Tempo entre Liberação de Gotas [s]
Dados Experimentais	2,20	4,83	0,80
Dados da Simulação	3,60	4,31	0,56
Desvio Percentual (Simulado frente ao Experimental)	+63,64	-10,77	-30,00

Fonte: Autora.

As figuras a seguir mostram a sequência gerada pelas simulações e as imagens experimentais comparativas para o sistema de óleo Spindura 10 em água destilada injetado através de um bocal cilíndrico à velocidade de 0,236m/s, iniciando-se na Figura 39.



**Figura 39** - Imagens da simulação do escoamento de óleo Spindura 10/água destilada para a velocidade de injeção de 0,236 m/s, sendo em branco a superfície que define a interface (fração de volume óleo de 0,5); em escala de cores, o plano central com o campo de velocidades, e em preto os vetores de velocidade proporcionais para os tempos de 0s; 0,20s; 0,50s e 0,65s.

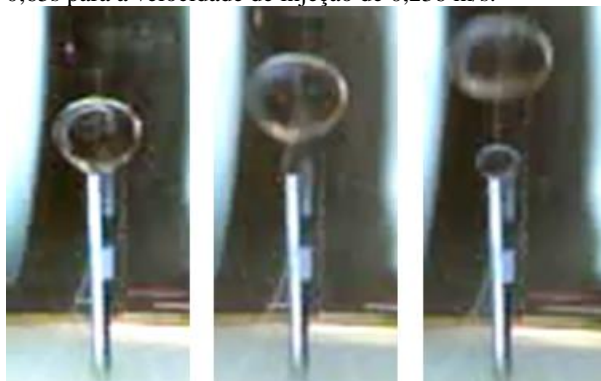


Fonte: Autora.

Na Figura 39 observam-se as fases sequenciais de formação da gota, alongamento com a formação do “pesçoço” e no quadro de 0,65s o desprendimento da gota da sua fase de origem. Apresentando comportamento similar ao óleo de soja.

Na Figura 40 são apresentadas imagens experimentais do sistema de injeção através do bocal cilíndrico de óleo Spindura 10 em água destilada

**Figura 40** - Imagens experimentais do escoamento de óleo Spindura 10/água destilada, para o caso do bocal, correspondente aos tempos de 0,20s; 0,50s e 0,65s para a velocidade de injeção de 0,236 m/s.



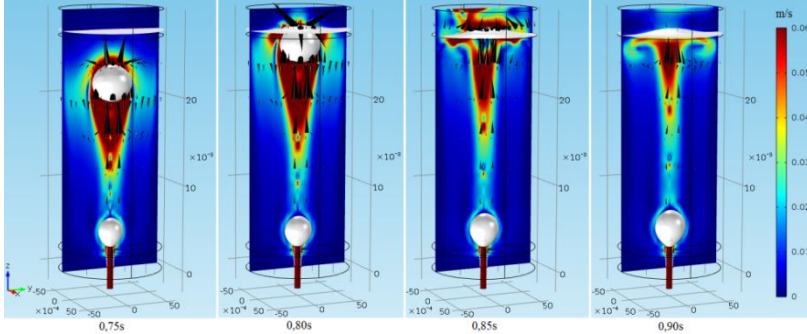
Fonte: Autora.

Observa-se na Figura 39, (quadros 0,20s; 0,50s e 0,65s) a semelhança apresentada com as imagens experimentais presentes na Figura 38, mostrando a compatibilidade qualitativa entre simulação e experimental.

Na Figura 41 é apresentada a sequência de imagens da simulação de óleo Spindura 10/água destilada, para a velocidade de 0,236m/s. Para os tempos de 0,75s a 0,90s.

Nesta pode ser observada a ascensão da gota de óleo Spindura 10 em direção à camada superior de óleo, sua coalescência com a mesma e, no último quadro os vórtices laterais de recirculação da fase contínua, provocados pelo escoamento da gota de óleo.

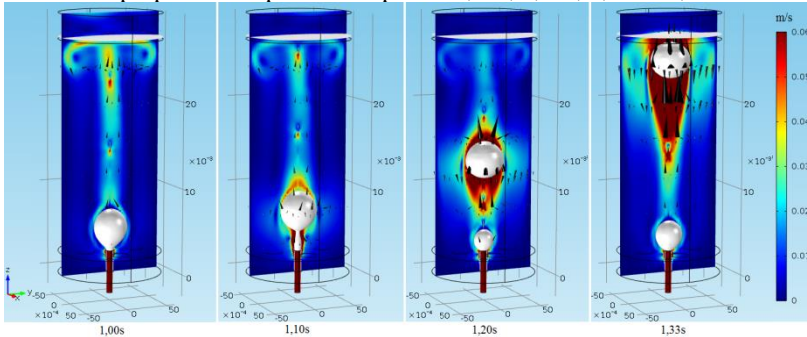
**Figura 41** – Imagens da simulação do escoamento de óleo Spindura 10/água destilada para a velocidade de injeção de 0,236 m/s, sendo em branco a superfície que define a interface (fração de volume óleo de 0,5); em escala de cores, o plano central com o campo de velocidades, e em preto os vetores de velocidade proporcionais para os tempos de 0,75s; 0,80s; 0,85s e 0,90s.



Fonte: Autora.

Na Figura 42 tem-se a sequência de imagens da simulação de óleo Spindura 10/água destilada, para a velocidade de 0,236m/s, para os tempos de 1,00s a 1,33s.

**Figura 42** – Imagens da simulação do escoamento de óleo Spindura 10/água destilada para a velocidade de injeção de 0,236 m/s, sendo em branco a superfície que define a interface (fração de volume óleo de 0,5); em escala de cores, o plano central com o campo de velocidades, e em preto os vetores de velocidade proporcionais para os tempos de 1,00s; 1,10s; 1,20s e 1,33s.



Fonte: Autora.

Na Figura 42 observa-se a diminuição do vórtice provocado pelo escoamento da primeira gota, a formação da segunda gota, bem como seu alongamento e desprendimento da fase de origem e seu movimento de ascensão para o limite superior do domínio.

#### 4.3.3.1.5. Sistema Óleo de Lubrificante Usado/ Água Salina Para a Velocidade de Injeção de 0,177m/s

Na Tabela 25 são apresentados os dados comparativos entre simulação e experimental para o sistema com óleo lubrificante usado/água salina com velocidade de injeção de 0,177m/s e tensão interfacial ajustada em  $\sigma = 0,030$  N/m.

**Tabela 25**– Dados de Altura de gotejamento, Diâmetro médio da gota formada e Tempo entre liberação de gotas para a tensão interfacial  $\sigma = 0,030$  N/m, para o sistema óleo lubrificante usado/água salina com injeção através do bocal e velocidade de 0,177m/s.

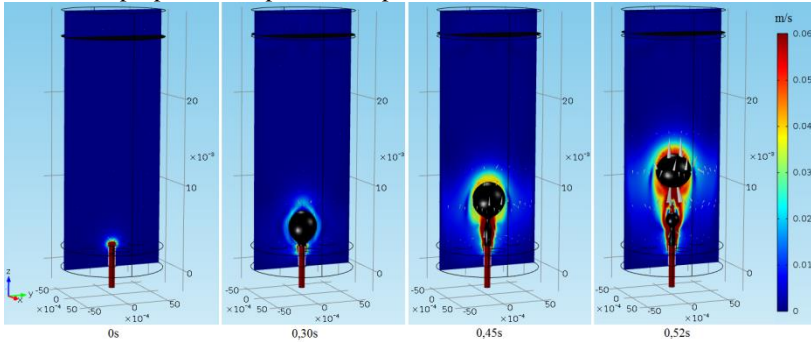
Tensão Interfacial de 0,030 N/m			
Dados	Altura de Gotejamento [mm]	Diâmetro Médio [mm]	Tempo entre Liberação de Gotas [s]
Dados Experimentais	3,20	4,31	0,85
Dados da Simulação	5,01	3,80	0,40
Desvio Percentual (Simulado frente ao Experimental)	+56,56	-11,83	-52,94

Fonte: Autora.

Observando os dados da Tabela 25 e considerando-os suficientes para o presente estudo são apresentadas as figuras a seguir, imagens geradas pela simulação da injeção de óleo lubrificante usado em água salina através de um bocal cilíndrico com velocidade de 0,177m/s. Iniciando na Figura 43, que apresenta a sequência dos tempos de 0s a 0,52s.

De forma similar às simulações com óleo de soja e óleo Spindura 10, pode-se observar as fases de crescimento da gota, seu alongamento com a formação do pescoço e seu desprendimento.

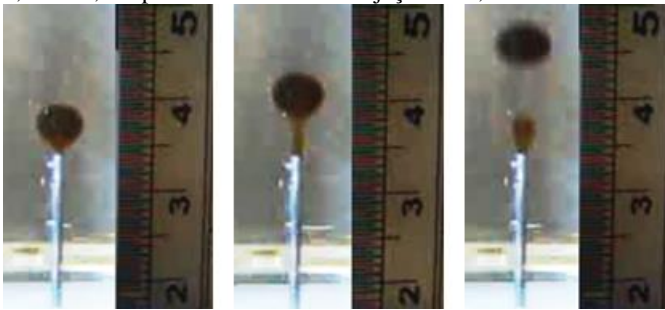
**Figura 43** – Imagens da simulação do escoamento de óleo lubrificante usado/água salina para a velocidade de injeção de 0,177 m/s, sendo em preto a superfície que define a interface (fração de volume óleo de 0,5); em escala de cores, o plano central com o campo de velocidades, e em cinza os vetores de velocidade proporcionais para os tempos de 0s; 0,30s; 0,45s e 0,52s.



Fonte: Autora.

Na Figura 44, observam-se as imagens experimentais comparativas aos quadros de 0,30s; 0,45s e 0,52s da Figura 42.

**Figura 44** - Imagens experimentais do escoamento de óleo lubrificante usado/água salina, para o caso do bocal, correspondente aos tempos de 0,30s; 0,45s e 0,52s para a velocidade de injeção de 0,177 m/s.

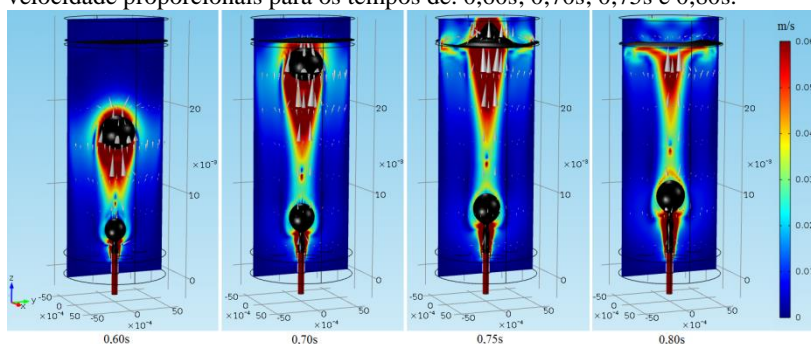


Fonte: Autora.

Mais uma vez, pode-se observar a similaridade qualitativa dos resultados apresentados entre a simulação e experimental.

Dando sequência às imagens geradas pela simulação da injeção de óleo lubrificante usado em água salina através de um bocal cilíndrico com velocidade de 0,177m/s, tem-se a Figura 45, que contempla os tempos de 0,60s a 0,80s.

**Figura 45** – Imagens da simulação do escoamento de óleo lubrificante usado/água salina para a velocidade de injeção de 0,177 m/s, sendo em preto a superfície que define a interface (fração de volume óleo de 0,5); em escala de cores, o plano central com o campo de velocidades, e em cinza os vetores de velocidade proporcionais para os tempos de. 0,60s; 0,70s; 0,75s e 0,80s.

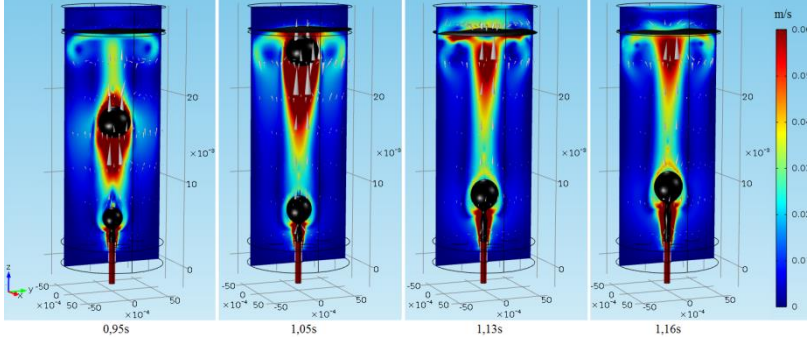


Fonte: Autora.

Nesta sequência observa-se o escoamento ascendente da gota até sua coalescência com a fase superior de óleo livre e a formação dos vórtices laterais mostrando a ocorrência de recirculação da fase contínua do sistema.

Para finalizar esta sequência a Figura 46 traz os quadros de 0,95s a 1,16s da simulação da injeção de óleo lubrificante usado em água salina através de um bocal cilíndrico com velocidade de 0,177m/s.

**Figura 46** - Imagens da simulação do escoamento de óleo lubrificante usado/água salina para a velocidade de injeção de 0,177 m/s, sendo em preto a superfície que define a interface (fração de volume óleo de 0,5); em escala de cores, o plano central com o campo de velocidades, e em cinza os vetores de velocidade proporcionais para os tempos de 0,95s; 1,05s; 1,13s e 1,16s.



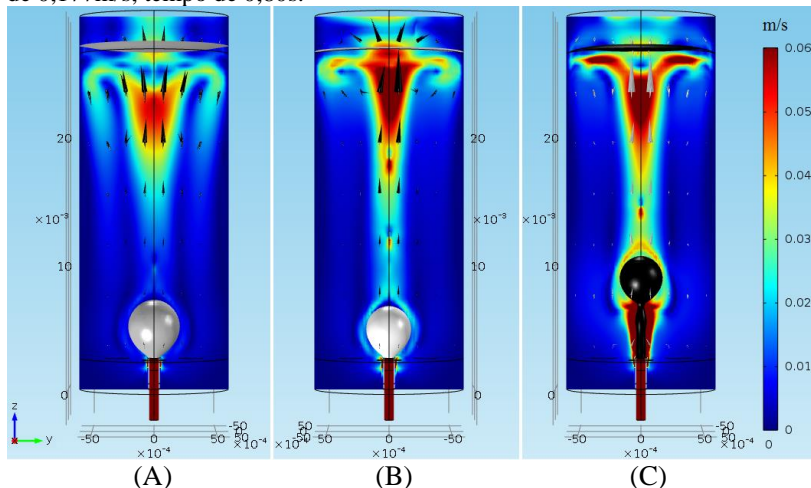
Fonte: Autora.

Esta figura mostra a dissipação dos vórtices de recirculação, a formação da segunda gota, sua ascensão, coalescência com a fase superior e os vórtices provocados pelo escoamento desta gota.

#### 4.3.3.1.6. *Visualização da Intensidade de Recirculação do Meio Contínuo Para a Velocidade de Injeção de 0,2m/s*

Na Figura 47 são apresentadas as imagens dos vórtices formados pela primeira gota para o sistema com óleo de soja/ água destilada, óleo Spindura 10/ água destilada e óleo lubrificante usado/água salina, nesta sequência da esquerda para a direita, para a menor velocidade de cada sistema.

**Figura 47** – Imagens comparativas dos vórtices laterais formados pela recirculação da fase contínua com injeção através do bocal para os sistemas: (A) Óleo de soja em água destilada para a velocidade de 0,225m/s, tempo de 0,69s; (B) Óleo Spindura 10 em água destilada para a velocidade de 0,236m/s, tempo de 0,90s e (C) Óleo lubrificante usado em água salina para a velocidade de 0,177m/s, tempo de 0,80s.



Fonte: Autora.

Na Figura 47 pode-se observar que nas imagens B e C as velocidades alcançadas pela recirculação do meio contínuo foram maiores que no sistema com óleo de soja, imagem A, este fato já era esperado, pois a diferença de densidade entre os fluidos dos sistemas B e C são maiores, assim o empuxo é maior, fazendo com que a velocidade terminal para a chegada da gota a superfície de óleo livre também seja maior.

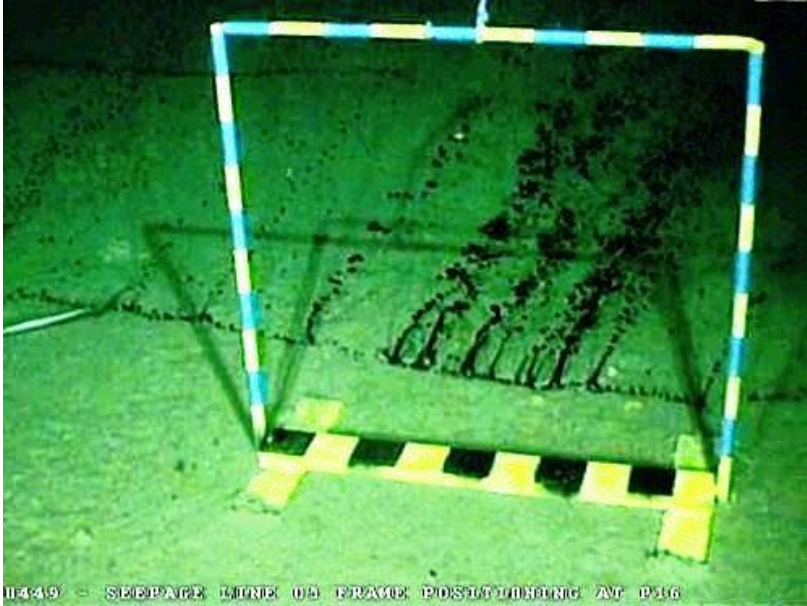
#### 4.3.3.2. Bocal em Forma de Fenda

Com a intenção de trazer este estudo ao contexto de situações reais de vazamento, como o ocorrido no Campo de Frade, na costa do Rio de Janeiro em novembro de 2011, onde foram liberados aproximadamente 3.700 barris de óleo, o que corresponde a 96% dos



vazamentos registrados naquele ano no Brasil. Na Figura 48 é apresentada uma imagem submarina do vazamento.

**Figura 48** – Imagem de divulgação da ANP do vazamento a partir de uma fissura, ocorrido na costa do Rio de Janeiro, Campo de Frade, em novembro de 2011.



Fonte: Divulgação/ ANP.

Neste item são apresentados os resultados de simulação para injeção através de uma fenda para os sistemas de óleo de soja/ água destilada e óleo lubrificante usado/ água salina.

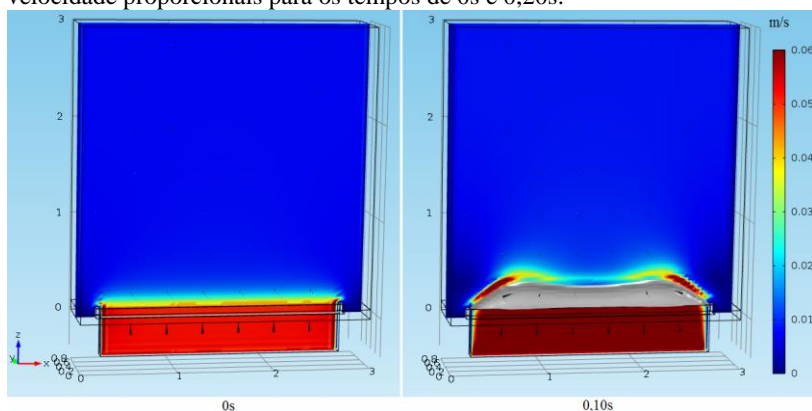
#### 4.3.3.2.1. Sistema Óleo de Soja/ Água Destilada Para a Velocidade de Injeção de 0,0554m/s

O primeiro sistema de estudo para a injeção de óleo através do bocal em forma de fenda, para ilustrar qualitativamente a funcionalidade do modelo frente a uma geometria de injeção diferenciada, as simulações foram realizadas com a mesma

configuração de paredes e parâmetros de simulação utilizados para a injeção através do bocal cilíndrico. Os testes foram realizados para duas velocidades de injeção no sistema óleo de soja/água destilada.

Na Figura 49, vemos os quadros dos instantes iniciais da injeção de óleo de soja a velocidade de 0,0554 m/s em um meio contínuo de água destilada.

**Figura 49** - Imagens da simulação do escoamento de óleo de soja/água destilada para a velocidade de injeção de 0,0554 m/s, sendo em cinza a superfície que define a interface (fração de volume óleo de 0,5); em escala de cores, o plano central com o campo de velocidades, e em preto os vetores de velocidade proporcionais para os tempos de 0s e 0,20s.

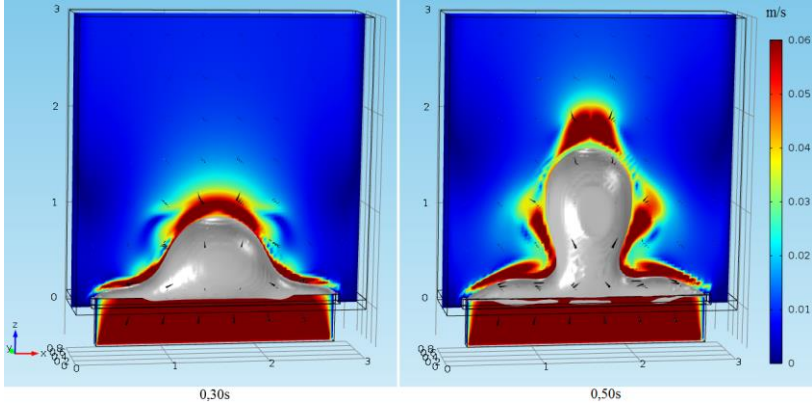


Fonte: Autora.

No instante 0s ainda não há perfil de velocidade formado no meio contínuo. Já para o quadro de 0,10s pode ser observado o deslocamento do óleo através da fenda direcionando-se para o centro.

Na sequência tem-se a Figura 50 que mostra as imagens da simulação do óleo de soja /água destilada com velocidade de injeção de 0,0554m/s para o bocal em forma de fenda, para os tempos de 0,30s e 0,50s.

**Figura 50** - Imagens da simulação do escoamento de óleo de soja/água destilada para a velocidade de injeção de 0,0554 m/s, sendo em cinza a superfície que define a interface (fração de volume óleo de 0,5); em escala de cores, o plano central com o campo de velocidades, e em preto os vetores de velocidade proporcionais para os tempos de 0,30s e 0,50s.



Fonte: Autora.

Para os quadros de 0,30s e 0,50s, podemos visualizar na Figura 48, que a massa de óleo concentra-se formando uma gota e inicia a ascensão para a porção superior do domínio. Nota-se que na lateral do bocal há a elevação do óleo com uma curva suave em direção ao centro, este comportamento também pode ser visto na Figura 51, originada do experimento nas mesmas condições que a simulação, apresentando semelhanças na centralização e no formato da massa de óleo que se agrupa em forma de gota na porção central e inicia a ascensão.

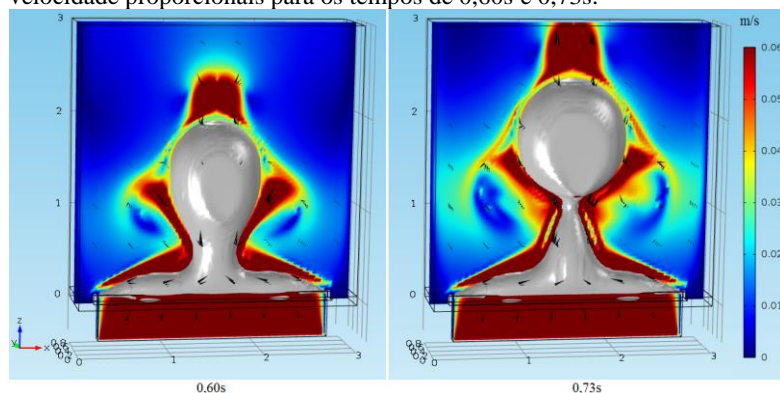
**Figura 51** - Imagem experimental do escoamento de óleo de soja/água destilada, para o caso da fenda, correspondente ao tempo de 0,50s para a velocidade de injeção de 0,0544 m/s.



Fonte: Autora.

Na Figura 52 tem-se a continuidade do escoamento para os quadros de 0,60s e 0,73s, onde foi delineado, de forma mais acentuada a silhueta de uma gota. Para o quadro de 0,73s ocorre a formação de um delta na porção central da fenda de onde se origina uma gota prestes a despendar-se.

**Figura 52** - Imagens da simulação do escoamento de óleo de soja/água destilada para a velocidade de injeção de 0,0554 m/s, sendo em cinza a superfície que define a interface (fração de volume óleo de 0,5); em escala de cores, o plano central exibe o campo de velocidades, e em preto os vetores de velocidade proporcionais para os tempos de 0,60s e 0,73s.



Fonte: Autora.

Nestes quadros pode-se observar uma falha no isocontorno de fração de volume de 0,5, isso se deve ao fato de que a gota formada é maior que a espessura utilizada para o domínio (eixo y), provocando esta falha, mas por se tratar de uma simulação qualitativa e que atingiu seus objetivos frente ao comparativo experimental não foi alterada, pois impactaria no custo computacional, que no caso deste trabalho já se encontrava próximo ao seu limite máximo.

Para ilustrar a semelhança apresentada pela simulação frente ao experimental temos a seguir a Figura 53, com as imagens experimentais para as mesmas condições da simulação.

A simulação que gerou os quadros da Figura 52 assemelha-se de forma próxima aos quadros gerados durante os ensaios experimentais que são expostos na Figura 53, apresentando um alongamento na gota e a formação de um pescoço.

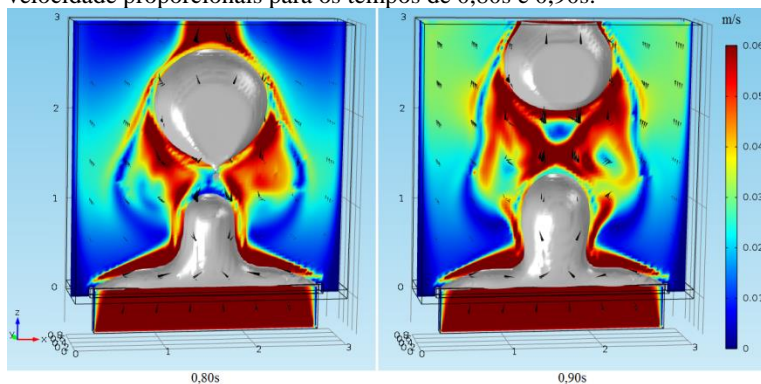
**Figura 53** - Imagens experimentais do escoamento de óleo de soja/água destilada, para o caso da fenda, correspondentes aos tempos de 0,70s e 0,78s para a velocidade de injeção de 0,0554 m/s.



Fonte: Autora.

Finalizando este conjunto de imagens para a simulação da fenda em velocidade de injeção de 0,0554 m/s, tem-se a Figura 54 onde os quadros de 0,80s e 0,90s mostram o desprendimento da gota e sua ascensão para a porção superior do domínio, chegando ao limite do domínio, sendo possível avaliar a recirculação de água gerada e a diminuição da intensidade dos vetores de velocidade, bem como a formação da nova gota junto à fenda.

**Figura 54** – Imagens da simulação do escoamento de óleo de soja/água destilada para a velocidade de injeção de 0,0554 m/s, sendo em cinza a superfície que define a interface (fração de volume óleo de 0,5); em escala de cores, o plano central exibe o campo de velocidades, e em preto os vetores de velocidade proporcionais para os tempos de 0,80s e 0,90s.



Fonte: Autora.

A Figura 55 apresenta a imagem experimental para as mesmas condições da simulação mostrando o desprendimento da gota e tendo grande semelhança com o quadro de 0,9s da simulação.

**Figura 55** - Imagem experimental do escoamento de óleo de soja/água destilada, para o caso da fenda, correspondente ao tempo de 0,90s para a velocidade de injeção de 0,0544 m/s.



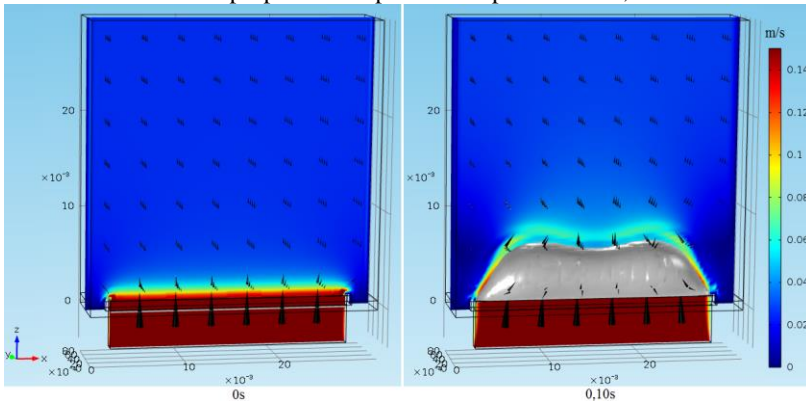
Fonte: Autora.

#### 4.3.3.2.2. Sistema Óleo de Soja/ Água Destilada Para a Velocidade de Injeção de 0,1477m/s

Também foi realizada a simulação da injeção de óleo através da fenda para a velocidade de 0,1477m/s para a comparação qualitativa com os ensaios experimentais. Estas imagens podem ser vistas no conjunto de Figuras abaixo.

Na Figura 56 podem-se visualizar os instantes iniciais da simulação, sendo que no quadro de 0,10s ocorre a liberação do óleo que, como para a menor velocidade direciona-se para a porção central da fenda.

**Figura 56** – Imagens da simulação do escoamento de óleo de soja/água destilada para a velocidade de injeção de 0,1477 m/s, sendo em cinza a superfície que define a interface (fração de volume óleo de 0,5); em escala de cores, o plano central exhibe o campo de velocidades, e em preto aparecem os vetores de velocidade proporcionais para os tempos de 0s e 0,10s.



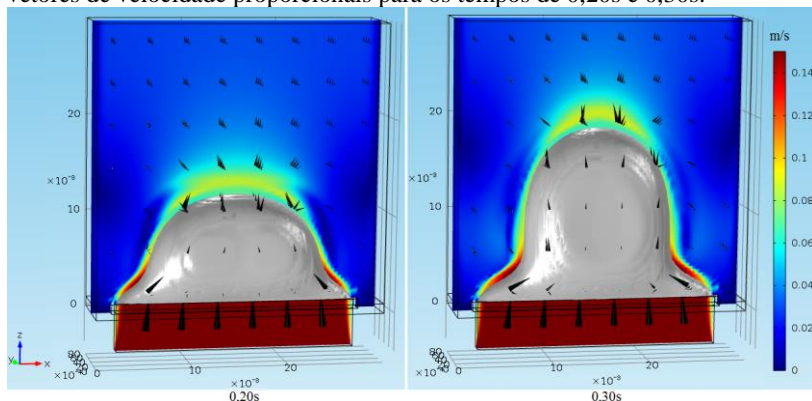
Fonte: Autora.

Na Figura 56 é possível visualizar o acúmulo da massa de óleo na posição central da fenda, podemos perceber a formação do perfil de velocidade apresentando velocidades mais altas na região próxima a interface, bem como os vetores de velocidade que empurram a água para fora do domínio e lateralmente provocando recirculação no interior do domínio.



Na Figura 57 são apresentados os quadros sequenciais da simulação do escoamento de óleo de soja/água destilada para a injeção através da geometria de fenda à velocidade de 0,1477 m/s, para os tempos de 0,20s e 0,30s.

**Figura 57** – Imagens da simulação do escoamento de óleo de soja/água destilada para a velocidade de injeção de 0,1477 m/s, sendo em cinza a superfície que define a interface (fração de volume óleo de 0,5); em escala de cores, o plano central exhibe o campo de velocidades, e em preto aparecem os vetores de velocidade proporcionais para os tempos de 0,20s e 0,30s.



Fonte: Autora.

A Figura 58 é uma imagem gerada através das filmagens do experimento realizado nas mesmas condições que a simulação ilustrada na Figura 56. Na imagem experimental pode ser observado o acúmulo de óleo na porção central e uma elevação suave do óleo na lateral da fenda, observação válida tanto nos experimentos quanto na simulação.



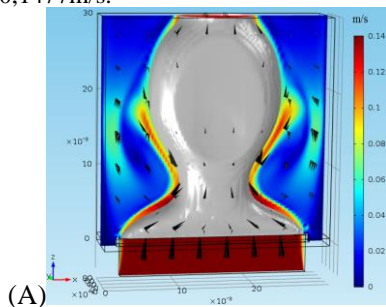
**Figura 58** – Imagem experimental do escoamento de óleo de soja/água destilada, para o caso da fenda, correspondente ao tempo de 0,20s para a velocidade de injeção de 0,1477 m/s.



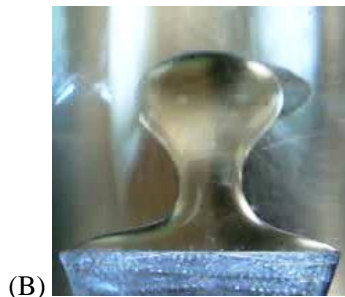
Fonte: Autora.

Seguindo para a Figura 59 observamos a formação de um pescoço e delinea-se a forma de uma gota que se alonga em direção ascendente para o desprendimento. No quadro 0,40s podemos visualizar a formação de uma zona de velocidade zero na lateral inferior da gota, anulada pelos vetores de ascensão, (junto à interface) e os vetores de recirculação, (próxima a lateral do domínio).

**Figura 59** – (A) Imagem da simulação do escoamento de óleo de soja/água destilada para a velocidade de injeção de 0,1477 m/s, sendo em cinza a superfície que define a interface (fração de volume óleo de 0,5); em escala de cores, o plano central exibe o campo de velocidades, e em preto aparecem os vetores de velocidade proporcionais para o tempo de 0,55s. (B) Imagem experimental do escoamento de óleo de soja/água destilada para o caso da fenda, correspondente ao tempo de 0,55s para a velocidade de injeção de 0,1477m/s.



(A)



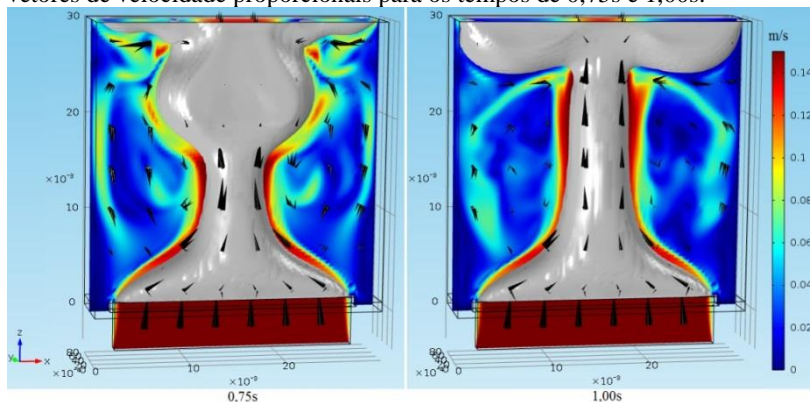
(B)

Fonte: Autora.

Observando a Figura 59, mais uma vez os resultados encontrados na simulação estão de acordo com os resultados experimentais e o quadro de 0,55s da simulação, Nesta podemos ver a centralização do fluxo de óleo, a curva de suavização na saída junto a lateral da fenda, o alongamento e afinamento do pescoço formado, projetando a forma de uma gota.

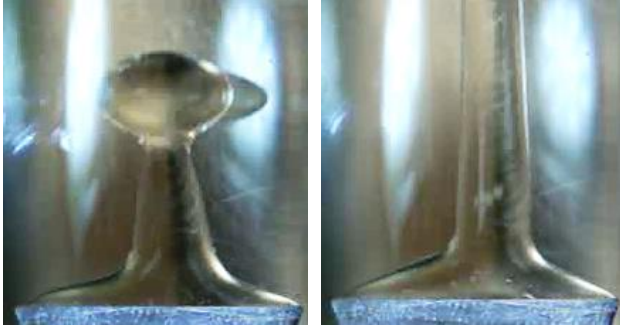
Nas Figuras 60 (simulação) e 61 (experimental) observamos a formação do delta com uma gota ainda ligada à fase de origem e posteriormente a formação de uma coluna de óleo contínua que atinge o limite superior do domínio, formando vórtices laterais visualizados no campo de velocidades, observando-se a recirculação da fase contínua no interior do domínio.

**Figura 60** – Imagens da simulação do escoamento de óleo de soja/água destilada para a velocidade de injeção de 0,1477 m/s, sendo em cinza a superfície que define a interface (fração de volume óleo de 0,5); em escala de cores, o plano central exhibe o campo de velocidades, e em preto aparecem os vetores de velocidade proporcionais para os tempos de 0,75s e 1,00s.



Fonte: Autora.

**Figura 61** - Imagens experimentais do escoamento de óleo de soja/água destilada, para o caso da fenda, correspondentes aos tempos de 0,75s e 1,00s para a velocidade de injeção de 0,1477 m/s.

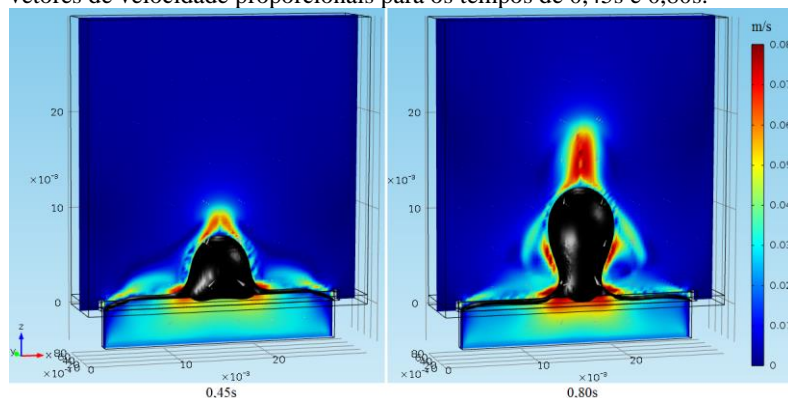


Fonte: Autora.

#### 4.3.3.2.3. *Sistema Óleo Lubrificante Usado/ Água Salina Para a Velocidade de Injeção de 0,0106m/s*

Para a geometria de injeção fenda, também foi realizada a simulação do escoamento de óleo lubrificante usado/água salina, para a velocidade de injeção de 0,0106 m/s. As imagens iniciam na Figura 62, apresentando os tempos de 0,45s e 0,80s.

**Figura 62** - Imagens da simulação do escoamento de óleo lubrificante usado/água salina para a velocidade de injeção de  $0,0106 \text{ m/s}$ , sendo em preto a superfície que define a interface (fração de volume óleo de 0,5); em escala de cores, o plano central exibe o campo de velocidades, e em cinza aparecem os vetores de velocidade proporcionais para os tempos de 0,45s e 0,80s.

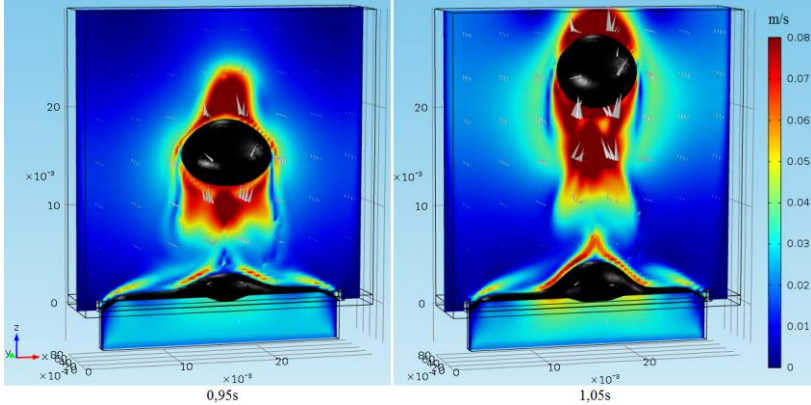


Fonte: Autora.

Este sistema tem basicamente o mesmo comportamento fenomenológico apresentado pelo sistema com injeção de óleo de soja, mostrando uma centralização no acúmulo de óleo na porção central da fenda, sendo que o alongamento da gota inicia-se com um volume menor de óleo, fato que se deve às diferenças nas propriedades físico-químicas dos óleos, neste sistema apresenta-se uma diferença de densidade maior entre os fluidos, a viscosidade do óleo lubrificante é menor e a tensão interfacial também.

Posteriormente é apresentada a Figura 63 com a sequência de imagens da simulação de óleo lubrificante usado/ água salina para injeção através da fenda, com velocidade de  $0,0106 \text{ m/s}$ .

**Figura 63** – Imagens da simulação do escoamento de óleo lubrificante usado/água salina para a velocidade de injeção de 0,0106 m/s, sendo em preto a superfície que define a interface (fração de volume óleo de 0,5); em escala de cores, o plano central exibe o campo de velocidades, e em cinza aparecem os vetores de velocidade proporcionais para os tempos de 0,95s e 1,05s.

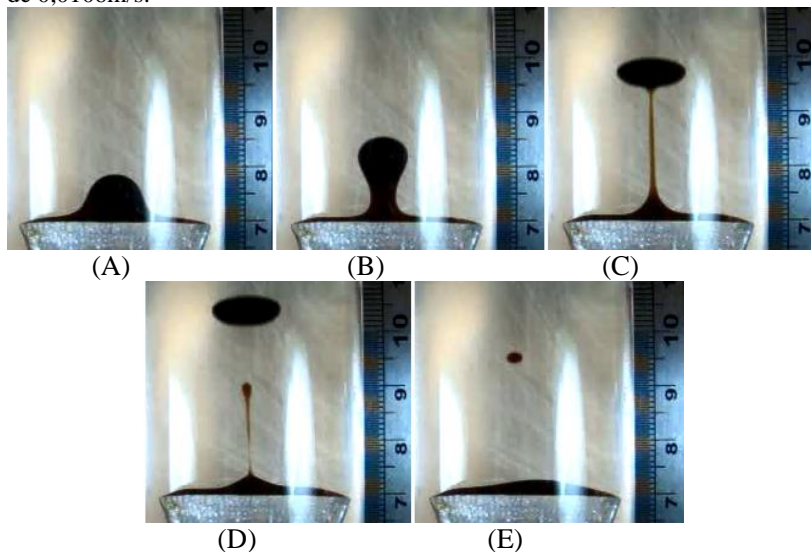


Fonte: Autora.

No quadro de 0,95s pode-se observar o desprendimento da gota, que se apresenta achatada pelo arraste de forma. Depois, em seu movimento de ascensão, a gota apresenta uma forma aproximadamente esférica, apesar do arraste.

Na Figura 64 tem-se as imagens do sistema experimental para as mesmas condições da simulação.

**Figura 64** - Imagens experimentais, entre 3s a 5s, do escoamento de óleo lubrificante usado/água salina, para o caso da fenda, com velocidade de injeção de 0,0106m/s.



Fonte: Autora.

No quadro A e B vemos grande semelhança com a Figura 62, com o acúmulo central de óleo para a formação da gota e posteriormente seu alongamento. No quadro C percebe-se o arraste de forma que também é visto na simulação, Figura 63 quadro 0,95s. neste mesmo quadro há formação de um filamento de óleo que não foi representado na simulação, podendo ser justificado pela presença de particular de fuligem, que não foram contempladas na simulação e por este fio de óleo apresentar um diâmetro de cerca de 0,0005m, assim, a malha não apresenta elementos suficientemente pequenos para representá-lo.



## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O levantamento bibliográfico proposto nos objetivos foi cumprido, trazendo materiais necessários para o conhecimento e compreensão do fenômeno de escoamento multifásico, as forças atuantes envolvidas no escoamento de ascensão das gotas de óleo formadas, bem como as condições de aplicabilidade e a importância deste estudo.

Foram avaliadas e estabelecidas as principais propriedades físico-químicas a temperatura de 22°C, sendo importante salientar a variação da tensão interfacial que teve valores menores para todos os óleos avaliados quando imersas em água salina 3,5% de NaCl (m/m) frente aos resultados obtidos com a sua imersão em água destilada.

Nos resultados da influência da variação da velocidade de injeção de óleo sobre a altura de gotejamento, diâmetro médio da gota formada e tempo entre liberação de gotas pode-se observar que o aumento da vazão do óleo provoca um aumento da altura e tempo entre liberação de gotas ao mesmo tempo em que leva a uma pequena redução no diâmetro das gotas. Em geral, o modelo reproduziu adequadamente o tamanho das gotas. O maior desvio do modelo em relação ao experimento foi observado na tentativa de reprodução da altura de gotejamento para a menor velocidade de injeção; de fato, os maiores desvios foram encontrados para esse aspecto do fenômeno, o qual está certamente relacionado ao tempo entre liberação de gotas. Isto demonstra que o modelo carece de aprimoramentos principalmente na descrição das forças interfaciais, que aqui são consideradas mediante um único valor para a tensão interfacial. Em sistemas dinâmicos, a variação e composição dessas forças atuando ao nível da interface apresentam grande complexidade e são de difícil representação.

Os experimentos de vazamento foram realizados para os sistemas de injeção bocal e fenda, com três óleos diferentes (óleo de soja, óleo Spindura 10 e óleo lubrificante usado), como fase dispersa e duas fases contínuas: água destilada e água salina 3,5%. Para o bocal foram realizados experimentos para três velocidades de injeção e para a fenda com duas velocidades, totalizando dezoito ensaios para o sistema de injeção através do bocal e doze ensaios para o sistema de injeção através da fenda.



O estudo de adequação de malha resultou em uma discretização com 204.544 elementos para o sistema de injeção de bocal cilíndrico, por apresentar menor desvio, em relação ao observado experimentalmente, do valor do diâmetro médio da gota formada e altura de gotejamento. Esta malha também se mostrou compatível com os recursos computacionais disponíveis, sem excedê-lo e nem permitir ociosidade, ainda apresentando melhoria no tempo total de simulação frente à malha intermediária testada.

Como teste inicial, fez-se a simulação do sistema óleo de soja/água destilada, comprovando-se de forma teórica e experimental a capacidade do modelo para representar de forma correta todas as fases de formação da gota.

Ressalta-se também o estudo de ângulo de contato, realizado tanto para o caso experimental quanto para a simulação, que apresentou desvio de 0,41%, permitindo comprovar a sensibilidade do modelo frente a alterações desta propriedade físico-química.

Com os dados obtidos experimentalmente, foi possível comparar os valores apresentados de altura de gotejamento, diâmetro da gota formada e tempo entre liberação de gotas para cada um dos sistemas. Partindo destes valores obteve-se base para os objetivos a serem reproduzidos nas simulações.

O parâmetro mais sensível a alterações foi a tensão interfacial. Foi necessário um estudo próprio para cada caso, sendo essa a última propriedade e ser ajustada. O seu ajuste teve como limite inferior o valor experimental obtido para uma gota estável e estática, incrementando-se a partir daí conforme a necessidade para a melhor reprodução do diâmetro médio de gota, da altura média de gotejamento e do tempo entre liberação das gotas, tal como observado no modelo físico.

As simulações apresentaram grande proximidade tanto do ponto de vista qualitativo como quantitativo, tendo atingimentos acima de 88% no quesito diâmetro médio da gota formada para todos os casos.

A avaliação qualitativa também obteve sucesso, tendo grande proximidade com os resultados experimentais, fato comprovado ao se comparar imagens experimentais e de simulações.

As imagens geradas através das simulações nos permitem visualizar o campo de velocidades do domínio, apresentaram aspectos

coerentes com o esperado neste tipo de escoamento, como os vórtices laterais formados quando ocorre a coalescência da gota com a fase superior e as zonas de estagnação, provocadas pelo movimento de recirculação do meio contínuo.

Variando-se o meio contínuo para o sistema de injeção de óleo de soja através de um bocal cilíndrico, obteve-se o resultado esperado, apresentando a formação de gotas com menor diâmetro e altura de gotejamento maior, corroborando o estudo de Masutani, (1999), que em seu trabalho utilizou como meio disperso o óleo cru, prova que, mesmo sendo fluidos distintos em suas propriedades físico-químicas, apresentam comportamento fluidodinâmico próximo.

Para o estudo de injeção de óleo através de um bocal em forma de fenda, observaram-se resultados compatíveis entre experimentos e simulações. Isto demonstra a possível aplicabilidade em situações reais de vazamento, indicando um modelo que pode se constituir na base de um futuro simulador que possibilite acelerar a remediação de acidentes e permita a maior assertividade das ações a serem tomadas.



## 6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Simular todas as velocidades experimentais para cada sistema avaliado nos ensaios em bancada.

Estudar a possibilidade de implementar a variação da tensão interfacial com a formação, crescimento e escoamento da gota.

Testar a utilização de uma malha adaptativa nas simulações, a fim de representar até a menor estrutura formada durante o escoamento bifásico.

Sugere-se explorar a diferentes temperaturas entre as fases, fator com grande importância frente às propriedades físico-químicas e válidas para situações reais de vazamentos.

Recomenda-se a ampliação do estudo experimental fazendo uso de petróleo como fase dispersa, realizando as análises físico-químicas necessárias e posteriormente ajustar os parâmetros para executar a simulação desta situação.

Proceder a testes aumentando a escala do sistema experimental visando sua possível aplicação em situações reais de vazamento.

Para trabalhos futuros e ligados ao processo de coalescência da emulsão gerada pela liberação de óleo em meio submerso, é importante a exploração de aspectos que evitam a coalescência imediata das gotas quando do seu contato com a fase de óleo livre sobrenadante, podendo-se assim validar uma modelagem completa do fenômeno de vazamento de óleo, desde seu afloramento, escoamento em meio aquoso, até a sua incorporação à fase de óleo livre.



## REFERÊNCIAS

- ABRAHAMSE, A. J., VAN DER PADT, A., e BOOM, R. M.. **Process Fundamentals of Membrane Emulsification: Simulation with CFD.** AICHe Journal. Vol. 47, No. 6. June 2001.
- ABRAMOVIĆ, H. e KLOFUTAR, C.. **The temperature dependence of dynamic viscosity for some vegetable oils.** Acta Chim. Slov. 45(1), p 69-77. 1998.
- ALVES, T. L.. **Estudo da formação de incrustações inorgânicas em membranas de nanofiltração utilizadas em processos de dessulfatação.** Tese apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Doutor pelo Programa de PósGraduação em Ciência dos Materiais e Metalurgia do Centro de Tecnologia da PUC-Rio. 2006.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS ABNT. **NBR 6234: Determinação da tensão interfacial de óleo água,** Brasil, 1965.
- BHATNAGAR, P. L., GROSS, E. P., KROOK, M.. **A model for collision processes in gases. I: small amplitude processes in charged and neutral one-component system.** *Phys. Rev.*94:511–525. 1954.
- BRAND. **Manual de medição de temperatura e densidade.** Disponível em: <http://www.brand.de/es/productos/liquid-handling/>, acessado em 14/05/2013.
- BROADWELL, J. E. **Study of rarefied shear flow by the discrete velocity method.** *J. Fluid Mech.* Vol.19. pg 401–14. 1964.
- CABRAL, C. A. O. e TEIXEIRA, L. da S. P. **Investigação do Incidente de Vazamento de Petróleo no Campo de Frade - Relatório Final.** Superintendência de Segurança Operacional e Meio Ambiente ANP. Julho De 2012.
- CHEN, H, CHEN, S e MATTHAEUS, W.H.. **Recovery of the Navier-Stokes equations using a lattice-gas Boltzmann method.** *Phys. Rev. A.* 45:R5339–42. 1992.

CHEN, S, CHEN, H. D., MARTINEZ, D. e MATTHAEUS, W.. **Lattice Boltzmann model for simulation of magnetohydrodynamics.** *Phys Rev. Lett.* 67:3776–79. 1991.

d'HUMIÈRES, D., LALLEMAND, P. e FRISCH U. **Lattice gas model for 3D hydrodynamics.** *Europhys. Lett.* 2:291–97. 1986.

DALING, P. S.; MOLDESTAD, M. O.; JOHANSEN, O.; LEWIS, A. e RODAL, J. **Norwegian Testing of Emulsion Properties at Sea—The Importance of Oil Type and Release Conditions.** *Spill Science & Technology Bulletin*, v. 8, n. 2, pp. 123–136, 2003.

DZIDA, M. e PRUSAKIEWICZ, P.. **The effect of temperature and pressure on the physicochemical properties of petroleum diesel oil and biodiesel fuel.** Elsevier, Fuel 87, p 1941–1948. 2008.

FELLER, R. **Estudo do vazamento e captura de óleo em ambiente subaquático.** (Mestrado). Departamento de Engenharia Química e Engenharia de Alimentos, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis. 2012.

FOX, R.W. MC DONALD, A.T.. **Introdução a Mecânica dos Fluidos.** 4ª Edição. Editora LTC, 1992. 662p.

FREITAS, A. G. B., SANTANA, C. R. e SILVA G. F. **Investigação das facilidades e métodos utilizados atualmente no processamento primário de petróleo em campos *onshore* e *offshore*.** 4º PDPETRO, Campinas, SP 21-24 de Outubro de 2007.

FRISCH, U., d'HUMIÈRES, D., HASSLACHER, .B, LALLEMAND, P., POMEAU, Y. e RIVET J. P.. **Lattice gas hydrodynamics in two and three dimensions.** *Complex Syst.* 1:649–707. 1987.

FRISCH, U., HASSLACHER, B., POMEAU, Y.. **Lattice-gas automata for the Navier-Stokes equations.** *Phys. Rev. Lett.* 56:1505–8. 1986.

GIORDANO, G. **Tratamento de Controle de Efluentes Industriais.** 2004 Disponível em:  
[www.ufmt.br/esa/Modulo\\_II\\_Efluentes\\_Industriais\](http://www.ufmt.br/esa/Modulo_II_Efluentes_Industriais/), Acesso em: 17 Nov. 2011.

GODINHO, M. da S.. **Determinação da tensão Interfacial de Óleos Isolantes usando Análise de Imagens e Espectroscopia no Infravermelho Próximo.** Dissertação de Mestrado em Ciências Moleculares / Universidade Estadual de Goiás. p.96, 2009.

HARDY, J., DE PAZZIS, O. e POMEAU, Y.. **Molecular dynamics of a classical lattice gas: transport properties and time correlation functions.** *Phys. Rev. A* 13:1949–61. 1976.

HEMPOONSERT, J., TANSEL, B. e LAHA, S., **Effect of temperature and pH on droplet aggregation and phase separation characteristics of flocs formed in oil–water emulsions after coagulation.** *Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects* 353, p 37–42. 2010.

HENDERSON, S. B., GRIGSON, S. J. W., JONHSON, P. e RODDIE, B. D. **Potencial impact of production chemicals on the toxicity of produced water discharges from North Sea Oil Platforms.** *Marine Pollution Bulletin*, v.38, n.12, p.1141-1151, 1999.

HENRIQUE, G. L. S.. **Técnicas de tratamento de efluentes oleosos.** Dissertação de Mestrado Universidade Federal de Alagoas. Maceió, 2008.

HIGUERA, F. J. e JIMÉNEZ, J.. **Boltzmann approach to lattice gas simulations.** *Europhys. Lett.* 9:663–68. 1989.

HIGUERA, F. J., SUCCI, S. e BENZI, R.. **Lattice gas dynamics with enhanced collisions.** *Europhys. Lett.* 9:345–49. 1989.

HIRT, C. W. e NICHOLS, B. D.. **Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries,** *Journal of Computational Physics* 39 (1): 201–225, doi:10.1016/0021-9991 (81) 90145-5. 1981.

INAMURO, T. e STURTEVANT, B. **Numerical study of discrete-velocity gases.** *Phys. Fluids* 2:2196–2203. 1990.

KADANOFF, L.. **On two levels.** *Phys. Today* 39:7–9. 1986.

KIM, H. C. e BURGESS, D. J.. **Prediction of interfacial tension between oil mixtures and water.** *Journal of Colloid and Interface Science* 241. P. 509, 2001.



- KOBAYASHI, I., K. Uemura, et al **CFD analysis of generation of soybean oil-in-water emulsion droplets using rectangular straight-through microchannels.** Food Science and Technology Research, v. 13, p. 187-192, 2007.
- KOBAYASHI, I., MUKATAKA, S. e NAKAJIMA, M. **CFD Simulation and Analysis of Emulsion Droplet Formation from Straight-Through Microchannels.** Langmuir 20, p 9868-9877.2004.
- KOREN, J. P. F. e SYVERSEN, U.. **State of the Art Electroflocculation:** Filtration and Separation, Elsevier Science. 1995.
- KUKRETI, A. R. e CIVAN, F.. **Finite element solution for flow of immiscible fluids in petroleum reservoirs.** Enhanced Oil Recovery II Processes and Operations, v.3, p. 511-577, 1989.
- KUZMIN, D.. **A Guide to Numerical Methods for Transport Equations.** Fridrich - Alexander- Universität. Erlangen-Nürnberg. 2010.
- LI, Y., JAIN, M. e NANDAKUMAR, K.. **Numerical Study of Droplet Formation inside a Microfluidic Flow-Focusing Device.** Excerpt from the Proceedings of the 2012 COMSOL Conference in Boston. 2012.
- LIST, E. J. **Turbulent jets and plumes.** *Annual Reviews of Fluid Mechanics*, v. 14, pp. 189-212, 1982.
- MARIANO, G. C.. **Estudo do Escoamento Imiscível Água/Óleo Mediante Experimentação em Célula de Hele-Shaw e Simulação CFD.** Dissertação submetida ao Programa de Pós Graduação em Engenharia Química, Centro de Tecnológico da Universidade Federal de Santa Catarina para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Química. Florianópolis. 2008.
- MASUTANI, S. M. e ADAMS, E. E. **Experimental Study of Multi-Phase Plumes with Application to Deep Ocean Oil Spills.** *Final Report by University of Hawaii to U.S. Department of the Interior Minerals Management Service. Contract N° 1435-01-98-CT-30964.*2001.

MASUTANI, S. M.. **Laboratory Experiments to simulate CO<sub>2</sub> ocean disposal**. Final Technical Report by *University of Hawaii to U.S. Department of Energ.*, 1999.

McCABE, W. L.; SMITH, J. C. e HARRIOTT, P.. **Unit operations of chemical engineering**. 7th ed. New York: McGraw-Hill Higher Education, 2005. 1140 p.

McNAMARA, G. R. e ZANETTI, G.. **Use of the Boltzmann equation to simulate lattice-gas automata**. *Phys. Rev. Lett.* 61:2332–35. 1988.

NOH, W.F.; WOODWARD, P.. **"SLIC (Simple Line Interface Calculation)**. In proceedings of 5th International Conference of Fluid Dynamics, edited by A. I. van de Vooren & P.J. Zandbergen, *Lecture Notes in Physics* **59**: 330–340. 1976.

OLSSON, E. e KREISS, G. **A Conservative Level set method for two phase flow**. *Journal of Computational Physics*, n. 210, pp. 225-246, 2005.

PENG, S. J. e WILLIAMS, R. A.. **Controlled production of emulsions using a crossflow membrane**. Part I. Droplet formation from a single pore. *Trans. IChemE* 76 (Part A) p. 894–901, (1998).

PERGHER, B. B., QUADRI, M. B., SOARES, G. S., FELLER, R., SANTOS, M. C., BOLZAN, A., **Estudo Teórico/Experimental sobre as Condições de Captura e Remoção de Óleo Proveniente de Vazamentos Subaquáticos**. 6º Congresso Luso-Moçambicano de Engenharia, CLME'2011-IIICEM, Maputo, pp. 793-794, 2011.

QIAN, Y. H., d'HUMIÈRES, D. e LALLEMAND, P.. **Lattice BGK models for Navier-Stokes equation**. *Europhys. Lett.* 17:479–84. 1992.

QIAN, Y. H.. **Lattice gas and lattice kinetic theory applied to the Navier-Stokes equations**. PhD thesis. *Université Pierre et Marie Curie*, Paris. 1990.

RANNACHER, R.. **Finite Element Methods for Incompressible Navier-Stokes Equations**. Institute of Applied Mathematics. University of Heidelberg. INF 293/294, D-69120. August, 1999.

- SANTOS, L. O. E. **Desenvolvimento de Modelos de Gás em Rede para Escoamentos Monofásicos e Bifásicos.** 174 p. Tese (Doutorado). Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina UFSC/EMC, Florianópolis, 2000. 174 p.
- SANTOS, R. G.. **Avaliação da molhabilidade de superfícies de oleodutos através de medidas de ângulo de contato:** Efeito de asfaltenos e de ácidos naftênicos. *Dissertação (Mestrado em Engenharia Química)*. Universidade Estadual de Campinas, 105p. 2003.
- SILVA, L.. **Desenvolvimento de metodologias para simulação de escoamentos polidispersos usando código livre.** (Doutorado). Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2008.
- SOO, S. L.. **Multiphase Fluid Dynamics.** Science Press, Beijing, 1995.
- THOMAS, J. E.. “Fundamentos de Engenharia de Petróleo.” PETROBRAS, Rio de Janeiro, 2001.
- THOMAZ FILHO, A., MIZUSAKI, A. M P. e ANTONIOLI, L.. **Magmatism and petroleum exploration in the Brazilian Paleozoic basins.** *Marine and Petroleum Geology* n° 25, 2008, pg143–151. Disponível em [www.elsevier.com/locate/marpetgeo](http://www.elsevier.com/locate/marpetgeo). Acessado em 22/09/2013.
- TIMGREN, A., TRÄGÅRDH G. e TRÄGÅRDH C. **CFD modelling of drop formation in a liquid-liquid system.** 6<sup>th</sup> International Conference on Multiphase Flow, ICMF 2007, Leipzig, Germany, July 9 – 13, 2007.
- TORNBERG, A. e ENGQUIST, B.. **A finite element based level-set method for multiphase flow applications.** *Comput. Visual. Sci.*, 3, p. 93–101. 2000.
- TORREY, M. e CLOUTMAN, L. (1985), **NASA-VOF2D: a computer program for incompressible flows with free surfaces** (unpublished), *LANL Technical Report LA-10612-MS*.
- WENDT, J. F. e ANDERSON, J. D. **Computational fluid dynamics: an introduction.** Editora Springer, USA, 332p, 2009.

WOLFRAM, S.. **Cellular automaton fluids**. 1: Basic theory. *J. Stat. Phys.* 45:471–526. 1986.

WÖRNER, M.. **A compact introduction to the numerical modeling of multiphase flows**. Forschungszentrum Karlsruhe, 2003.

XU, J.H., LUO, G. S., CHEN, G. G. e WANG, J. D. **Experimental and theoretical approaches on droplet formation from a micrometer screen hole**. *Journal of Membrane Science* 266 (2005) 121–131. 2005.

YAPA, P. D. e ZHENG, L.. **Modeling Underwater Oil/Gas Jets and Plumes**. *Journal of Hydraulic Engineering*, v. 125, p. 481, 1999.

YUE, P., ZHOU, C., FENG, J. J., OLLIVIER-GOOCH, C. F. e HU, H. H. **Phase-field Simulations of Interfacial Dynamics in Viscoelastic Fluids Using Finite Elements with Adaptive Meshing**. *J. Comp. Phys.*, vol.219, pp.47–67, 2006.

ZHI, W., SHICHANG, W., SCHROEDER, V. e SCHUBERT, H., **Influence of fluid flow on forces acting on droplet and emulsification results in membrane emulsification process**. *J. Chem. Ind. Eng. (China)* v.50 (4), p. 505–513, (1999).

ZIENKIEWICZ, O. C. e TAYLOR, R. L.. **The finite element method: its basis and fundamentals**. v.6, p. 733, 2005.