

## COMPORTAMENTO FLUIDODINÂMICO DA INTERFCE ÁGUA - AR: MODELAGEM E SIMULAÇÃO

**Marcella M. C. A. Aragão**

**Severino R. Farias Neto**

*marcella.may@hotmail.com*

*s.fariasn@gmail.com*

*Universidade Federal de Campina Grande*

*Rua Aprígio Veloso, 882, Universitário, Campina Grande, 58429-900, Paraíba, Brasil*

**Boniek E. Leite**

**Mábia R. S. Sena**

*boniek3@gmail.com*

*mabia\_ruana@hotmail.com*

*Universidade Federal de Campina Grande*

*Rua Aprígio Veloso, 882, Universitário, Campina Grande, 58429-900, Paraíba, Brasil*

**Abstract.** Pollution of watery regions such as rivers, lakes, and seas with contaminants that disperse in water has been a major concern in society in recent times. The dispersion of the various contaminants present in the aqueous regions is influenced by various parameters such as: water and air velocity. Therefore, it is of fundamental importance to know the relation of these properties in the propagation of these pollutants. The use of tools that employ numerical methods are applied to predict the dispersion behavior of contaminants present in free surface flows. The purpose of this study was to evaluate the influence of air currents on the water surface. In the proposed mathematical model the Eulerian-Eulerian approach was adopted for the two - phase (air-water) flow assuming the free surface model, standard  $k-\epsilon$  turbulence model. The constant physicochemical properties were adopted. Numerical simulations were performed using the Ansys CFX commercial package, varying the values of air velocity and height of the water level. The results of the simulations confirm that the behavior of the water-air interface is affected by the variation of the air velocity quantity and the height of the water level of the reservoir.

**Keywords:** Pollutant Dispersion, Two – phase, CFX.

## 1 Introdução

Na atualidade grande é a preocupação da humanidade com o meio ambiente, em especial o meio aquoso, isso porque o desenvolvimento populacional e industrial tem ocasionado impactos ambientais negativos. Estudos vêm sendo realizados com a finalidade de minimizar os danos sofridos pelos mares, rios e lagos.

De acordo com Beneditti [1] a água é um elemento vital no desenvolvimento da humanidade, sendo cerca de 75% da superfície da Terra ocupada por ela. O uso deste recurso tem como finalidade suprir necessidades pessoais, o desenvolvimento industrial, comercial e nas produções agrícolas.

Carmo *et al.*, [2] realizou um estudo que mostrou que 20% da água utilizada no Brasil destinam-se às atividades industriais e 62% às atividades agrícolas. Enquanto que Duarte *et al.*, [3] afirmaram que 40% das águas usadas em residências são para fins não potáveis.

Diversos poluentes são causadores da contaminação do meio aquático. O mau gerenciamento dos resíduos gerados pelas atividades domiciliares, urbanas e industriais ocasionam danos à saúde pública e principalmente aos recursos naturais.

Marchesan *et al.*, [4] verificaram que a degradação dos recursos naturais e as contaminações das águas são causadas por produtos químicos e fertilizantes trazendo sérias consequências para população e o meio.

As indústrias de mineração e de petróleo contribuem no despejo de resíduos químicos tais como: benzeno, tolueno, xileno, enxofre e mercúrio, esses poluentes contaminam solos e rios, causando danos irreversíveis à saúde da população e ao meio. A poluição de rios, lagos, baías, zonas costeiras geram danos contínuos devido aos volumes crescentes dos resíduos industriais e dejetos orgânicos, como também, o lançamento de esgotos não tratados com impactos severos sobre a fauna e a flora, Rattner [5].

A poluição dos ambientes aquosos é um problema sério e de nível global que afeta a saúde e bem estar dos seres humanos, plantas e animais. Geralmente, a introdução dos poluentes é através de fontes pontuais e fontes não pontuais. Portanto, o estudo do destino destes contaminantes e como se propagam tornou-se um fator preponderante para garantir a redução da poluição ambiental. Para isso é preciso ter uma boa compreensão do comportamento do fluxo em superfície livre, Rattner [5].

Segundo Mayerhoff [6] vários estudos estão sendo realizados buscando novas tecnologias com o intuito de garantir a qualidade da água e o tratamento de efluentes industriais. Outro fator fundamental para realizar a correção e a prevenção dos meios aquáticos é o conhecimento prévio do comportamento dos poluentes, bem como, das propriedades que influenciam na dispersão dos mesmos no meio.

De acordo com Paz [7] a identificação do comportamento hidrodinâmico da água nos diferentes meios auxilia no processo de planejamento e gerenciamento dos recursos hídricos, como também, na dinâmica dos nutrientes, poluentes e na distribuição do fitoplâncton e zooplâncton.

Ferramentas como a modelagem computacional são essenciais para o estudo ambiental, podendo ser aplicadas na determinação do comportamento hidrodinâmico e na modelagem da qualidade da água nas regiões de lago, rios, mares e estuários, Barros [8].

O estudo de parâmetros tais como: velocidade da água, velocidade do ar, temperatura, pressão, tipos de injeção do poluente, características físico-químicas do poluente é necessário para que seja realizada a correlação, entre esses parâmetros é o deslocamento do contaminante. Sendo assim, o objetivo deste trabalho foi avaliar a influência da variação das velocidades do ar sobre a superfície da água.

## 2 Metodologia

### 2.1 Domínio de estudo

O domínio físico adotado para o estudo da hidrodinâmica da água consiste em uma simplificação de um canal aberto estudado experimentalmente por Built [9] com as seguintes dimensões: com 4 metros de comprimento, altura de 0.5 metros e largura de 0,25 metros com uma elevação na saída de 0,09 metros. A altura da água foi definida igual a 0,1425 metros. A representação do domínio computacional foi feita no ANSYS ICEM – CFD® 15.0.

A malha representativa é do tipo hexaédrica, com aproximadamente 57 mil elementos de controle, com maior refinamento na região de interesse (interface água- ar). A Fig. 1 apresenta a malha utilizada.

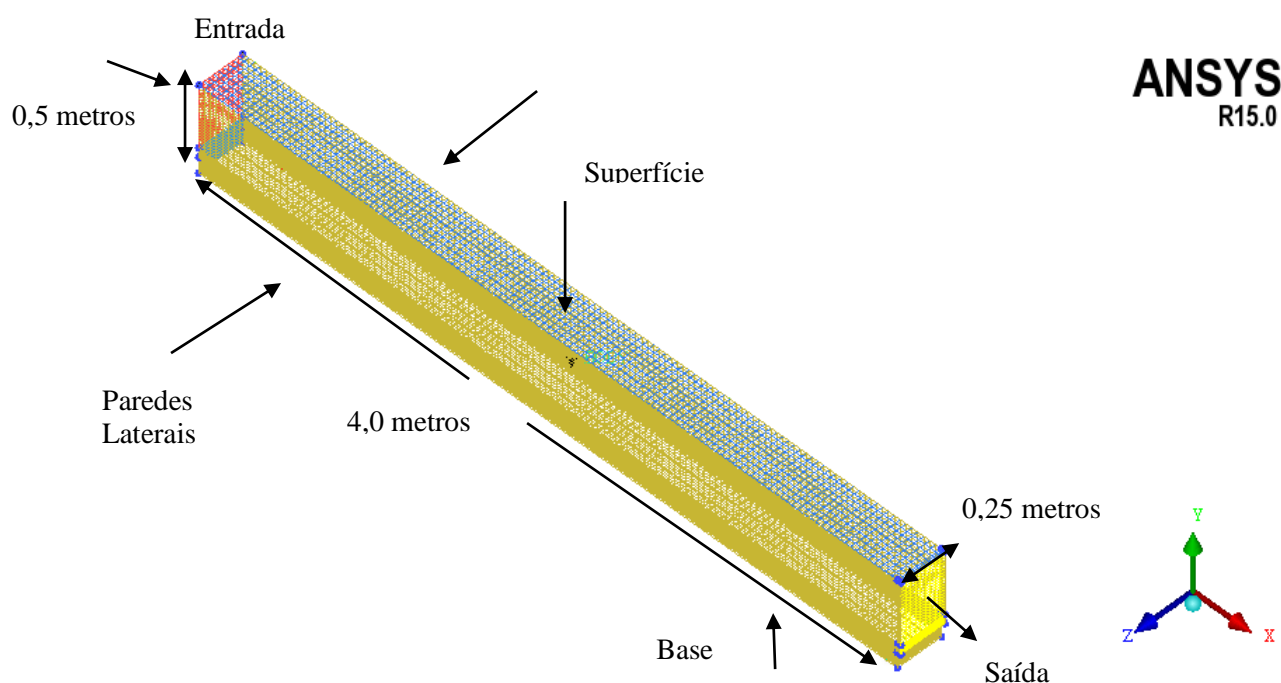


Figura 1. Malha hexaédrica, refinada na região de interesse.

### 2.2 Modelagem matemática

Nas simulações numéricas, para os casos estudados, foram adotadas algumas considerações para o escoamento bifásico (água – ar) em regime transiente e isotérmico. Tais considerações foram:

- Domínio tridimensional e escoamento isotérmico e transiente;
- Fluidos incompressíveis com propriedades físico – químicas constantes;
- Os fluidos estudados foram adotados como newtonianos e imiscíveis;
- Transferência de massa e fonte de massa são desconsideradas;
- O efeito da gravidade não foi considerado;
- Não há ocorrência de reações químicas;
- Foi adotada a abordagem Euleriana – Euleriana, empregando o modelo de transferência interfacial de superfície livre, adotando-se a água e o ar como fases contínuas;
- Modelo de turbulência utilizado foi o  $k-\epsilon$ ;
- As forças interfaciais de não arraste (forças de sustentação, lubrificação de parede, massa virtual, dispersão turbulenta e pressão do sólido) foram desprezadas;

- Foi adotado o valor de coeficiente de arraste constante e igual a 0,44.

Com base nestas considerações as equações de conservação de massa e momento linear são simplificadas da forma (Equações 1,2,3 e 4):

- Equação da conservação de massa

$$\frac{\partial}{\partial t}(f_\alpha \rho_\alpha) + \nabla \cdot (f_\alpha \rho_\alpha \bar{U}) = 0 \quad (1)$$

na qual  $f_\alpha$ ,  $\rho_\alpha$ ,  $\bar{U}_\alpha$  são respectivamente a fração volumétrica, a massa específica e o vetor velocidade da fase  $\alpha$ .

- Equação do momento linear

$$\frac{\partial}{\partial t}(f_\alpha \rho_\alpha \bar{U}_\alpha) + \nabla \cdot [f_\alpha (\rho_\alpha \bar{U}_\alpha \otimes \bar{U}_\alpha)] = -f_\alpha \nabla \rho_\alpha + \nabla \cdot \left\{ f_\alpha \mu_{ef} \left[ \nabla \bar{U}_\alpha + (\nabla \bar{U}_\alpha^T) \right] \right\} + \bar{M}_\alpha \quad (2)$$

na qual  $\mu_{ef}$  é a viscosidade efetiva definida como sendo

$$\mu_{ef} = \mu_\alpha + \mu_{tf} \quad (3)$$

$\mu_\alpha$  é a viscosidade dinâmica de  $\alpha$ .

O termo  $\bar{M}_\alpha$  corresponde as forças interfaciais da fase  $\alpha$  representa as forças interfaciais, das quais neste trabalho foi considerada somente a força de arraste, definida por:

$$\bar{M}_\alpha = \frac{3}{4} C_d f_\alpha \rho_\alpha |\bar{U}_\beta - \bar{U}_\alpha| (\bar{U}_\beta - \bar{U}_\alpha) \quad (4)$$

Foi utilizado o modelo de turbulência k- $\epsilon$  padrão (Equações 5 a 10) que é um modelo de viscosidade turbulenta, na qual os tensores de Reynolds são proporcionais aos gradientes de velocidade média, sendo a constante de proporcionalidade, identificada por uma viscosidade turbulenta, Ansys [10].

Para energia cinética turbulenta (k) e a taxa de dissipação turbulenta ( $\epsilon$ ), respectivamente pode-se escrever

$$\frac{\partial(\rho_\alpha f_\alpha k_\alpha)}{\partial t} + \nabla \cdot \left\{ f_\alpha \left[ \rho_\alpha \bar{U}_\alpha k_\alpha - \left( \mu + \frac{\mu_{t\alpha}}{\sigma_k} \right) \nabla k_\alpha \right] \right\} = f_\alpha (G_\alpha - \rho_\alpha \epsilon_\alpha) \quad (5)$$

$$\frac{\partial(\rho_\alpha f_\alpha \epsilon_\alpha)}{\partial t} + \nabla \cdot \left\{ f_\alpha \rho_\alpha \bar{U}_\alpha \epsilon_\alpha - \left( \mu + \frac{\mu_{t\alpha}}{\sigma_\epsilon} \right) \nabla \epsilon_\alpha \right\} = f_\alpha \frac{\epsilon_\alpha}{k_\alpha} (C_1 G_\alpha - C_2 \rho_\alpha \epsilon_\alpha) \quad (6)$$

Nestas equações,  $G_\alpha$  é a geração de energia cinética no interior da fase  $\alpha$ ,  $C_1$  e  $C_2$  são constantes empíricas de valores iguais a 1,44 e 1,92,  $\sigma_k$ ,  $\sigma_\epsilon$  são constantes iguais 1,0 e 1,3 respectivamente, o termo  $\epsilon_\alpha$  corresponde a taxa de dissipação de energia cinética turbulenta da fase  $\alpha$  e  $k_\alpha$  corresponde a energia cineticaturbulenta para fase  $\alpha$ , sendo expresso da seguinte forma

$$\varepsilon_\alpha = \frac{c_\mu q_\alpha^3}{l_\alpha} \quad (7)$$

$$k_\alpha = \frac{q_\alpha^2}{2} \quad (8)$$

Na qual  $l_\alpha$  é o comprimento da escala espacial,  $q_\alpha$  é a escala da velocidade,  $c_\mu$  é uma constante empírica podendo ser calculada pela expressão abaixo.

$$c_\mu = 4c_\alpha^2 \quad (9)$$

Na qual  $c_\alpha$  uma constante empírica. A viscosidade turbulenta:

$$\mu_{\tau\alpha} = c_\mu \rho_\alpha \frac{k_\alpha^2}{\varepsilon_\alpha} \quad (10)$$

De modo que  $c_\mu$  é igual a 0,09.

### 2.3 Condições inicial e de contorno

Adotaram-se velocidades nulas nas três direções no instante inicial. Na seção de entrada foi assumido uma velocidade do ar constante na direção x,  $U_x = U_{ar}$ , cujo valor está apresentado na Tabela 1. Para água foi assumido um valor constante igual a 0,2 m/s. Na seção de saída foi assumido a condição de pressão nula. Foi assumida a pressão de referência igual a 1 atm. Nas paredes laterais e na base foram assumidos  $U_x = U_y = U_z = 0$ . Na superfície superior foi assumido a condição de pressão igual a pressão de 1 atm.

Tabela 1. Dados utilizados na simulação.

Simulação	Velocidade do ar (m/s)
Caso 1	0,2
Caso 2	2,0
Caso 3	6,0
Caso 4	15,0

### 2.4 Propriedades físico – químicas da água e do ar

As propriedades da água e do ar utilizadas nas simulações foram extraídas de Evangelista [11] e Gomes [12], respectivamente.

Tabela 2: Propriedades físico – químicas da água e do ar.

Propriedades	Água	Ar
Densidade (kg/m <sup>3</sup> )	998,2	1,23
Viscosidade cinemática (m <sup>2</sup> /s)	1,003 x 10 <sup>-6</sup>	15,06 x 10 <sup>-6</sup>
Tensão superficial (N/m)	0,0728	

### 3 Resultados e Discussões

Na Figura 2 está representado o plano XY sobre o qual estão representados os campos de fração volumétrica da água onde foi analisado o comportamento da interface água - ar com o aumento da velocidade do ar em relação à da água que foi mantida igual a 0,2 m/s.

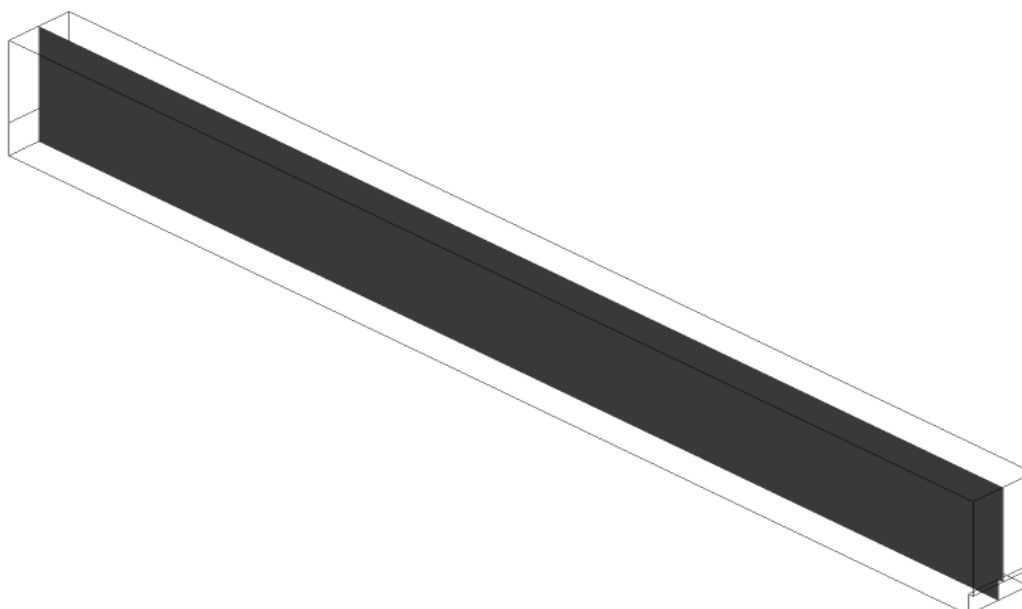


Figura 2. Seções escolhidas para análise das velocidades superficiais da água.

Das Figuras 3 a 5 estão representados os campos de fração volumétrica da água sobre o plano XY para quatro velocidades do ar (2, 6 e 15 m/s) mantendo-se a velocidade da água em 0,2 s para os tempos  $t_0=0$  s  $t_1 = 50$  s e  $t_2 = 100$  s, respectivamente. Esses resultados são apresentados nos tempos  $t_1 = 50$  s e  $t_2 = 100$  s.

A Figura 3 apresenta a fração volumétrica da água para o caso 4 em diferentes instantes de tempo. É possível observar a partir das figuras a evolução da formação das ondas na interface água – ar. Semelhante às instabilidades de Kelvin – Helmholtz que segundo White [13] são estruturas de turbulência originadas a partir das tensões viscosas na interface de dois meios em velocidades diferentes. A diferença de velocidade dos fluidos (água – ar) origina uma camada cisalhante que gera a formação de cristas e vales (evidenciadas nos tempos  $t_1$  e  $t_2$  para o caso 4). A diferença de velocidade ocasiona um escoamento instável e conseqüentemente forma essas instabilidades.

A Figura 4 apresenta o campo de a fração volumétrica da água para o tempo ( $t_1 = 50$  s) para os casos 1, 2, 3 e 4. A partir das imagens verificou-se uma pequena variação na superfície da água ocasionando um comportamento diferente na região de entrada e de saída com um formato de ondas evidenciados principalmente no caso 4 que possuía maior velocidade do ar ( $V_{ar} = 15$  m/s).

A Figura 5 apresenta o campo de fração volumétrica da água para o tempo ( $t_2 = 100$  s) para os casos 1, 2, 3 e 4. Para os resultados no tempo final ficou nítido uma variação na região de saída para todos os casos. A Figura 5 (d) mostrou que, com o aumento da velocidade do ar, é possível observar que as ondas formadas estiveram presentes até o tempo final deixando nítido a influência da velocidade do ar sobre a superfície da água. Assim, é possível afirmar que com o aumento da velocidade do ar tem-se uma variação no comportamento hidrodinâmico da água.

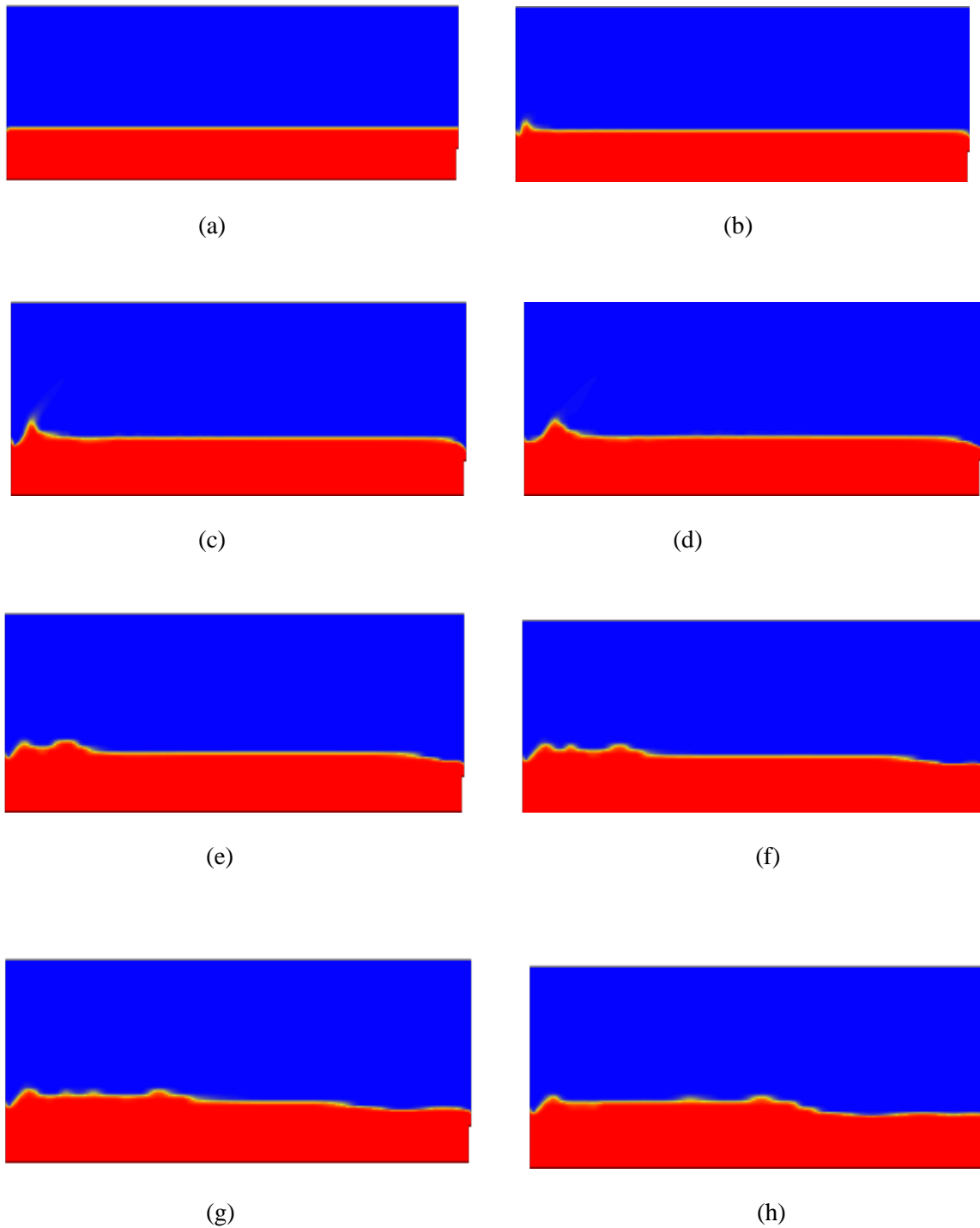


Figura 3. Evolução do comportamento da interface água –ar para o caso 4 nos tempos: (a)  $t_0 = 0$  s, (b)  $t_1 = 5$  s, (c)  $t_2 = 15$  s, (d)  $t_3 = 25$  s, (e)  $t_4 = 45$  s, (f)  $t_5 = 70$  s, (g)  $t_6 = 100$  s e (h)  $t_7 = 110$  s.



(a)



(b)



(c)



(d)

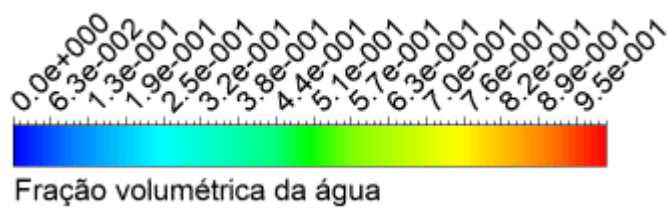
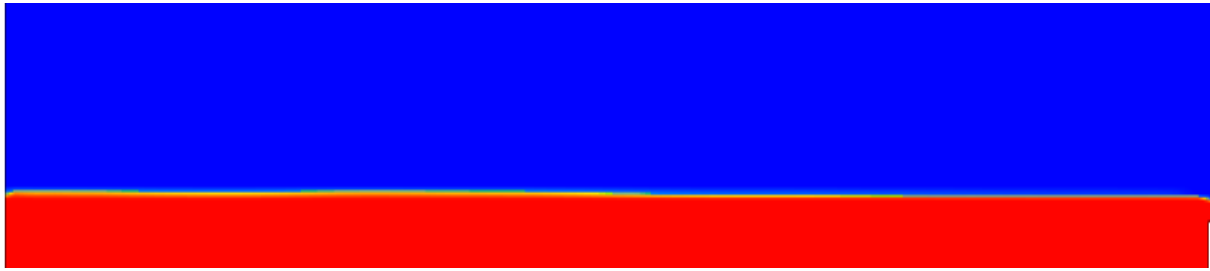
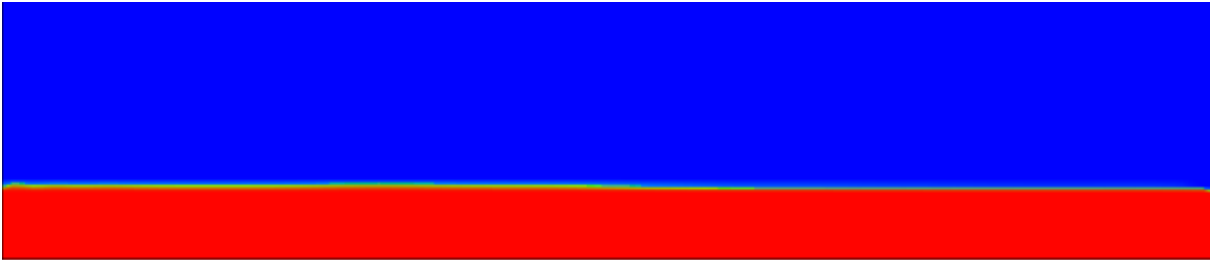


Figura 4. Fração volumétrica da água no tempo  $t_1 = 50$  s. (a) Para velocidade da água e do ar = 0,2 m/s. (b) Para velocidade da água e do ar = 2 m/s. (c) Para velocidade da água e do ar = 6 m/s. (d) Para velocidade da água e do ar = 15 m/s.





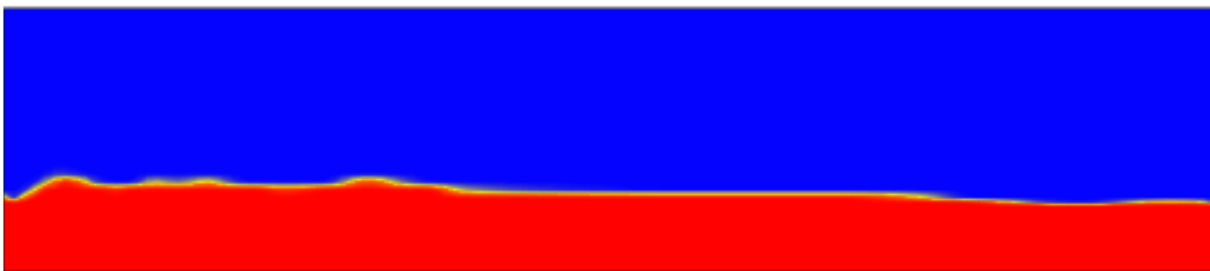
(a)



(b)



(c)



(d)

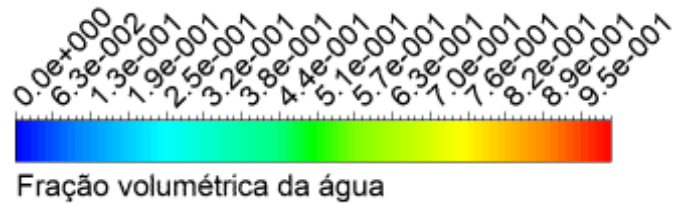


Figura 5. Fração volumétrica da água no tempo  $t_2 = 100$  s. (a) Para velocidade da água e do ar = 0 m/s. (b) Para velocidade da água e do ar = 2 m/s. (c) Para velocidade da água e do ar = 6 m/s. (d) Para velocidade da água e do ar = 15 m/s.

As Figuras 6, 7, 8 e 9 apresentam a relação da velocidade superficial da água com a altura da lâmina d'água, respectivamente, para os casos 1, 2, 3 e 4. Observa-se a partir das imagens que na região inicial ( $L = 1$  m) a velocidade superficial da água aumentou com o aumento da velocidade do ar variando para os casos de 0,21 m/s a 0,58 m/s para o caso 4. Verificou-se ainda que para os casos 1 e 2 os quais as velocidades da água e do ar eram próximas a alteração da velocidade superficial da água e o formato das curvas apresentaram-se de maneira semelhante.

Para  $L = 2$  m o comportamento com relação a região  $L = 1$  m foi semelhante, houve um aumento da velocidade da água a mediada que a velocidade do ar crescia, porém foi possível identificar que o comportamento na região mediana não variou muito com relação ao comportamento na posição inicial.

Para  $L = 3$  m a velocidade superficial da água foi a que apresentou uma menor variação no valor para todos os casos, com valores de 0,21 a 0,25 m/s.

Nas Figuras 6 e 7 é possível observar-se que o perfil velocidade apresentou comportamento característico de canais conforme visto em Porto [14], as tensões de cisalhamento entre a água e o ar e a resistência entre as paredes e o fundo do canal originam diferentes velocidades, tendo um valor tendendo a zero nas paredes e no fundo do canal e um valor máximo na direção da superfície livre. Observa-se que para os casos 1 e 2 os quais a velocidade do ar e da água eram semelhantes o perfil de velocidade apresentou um formato mais parabólico como mostra a literatura.

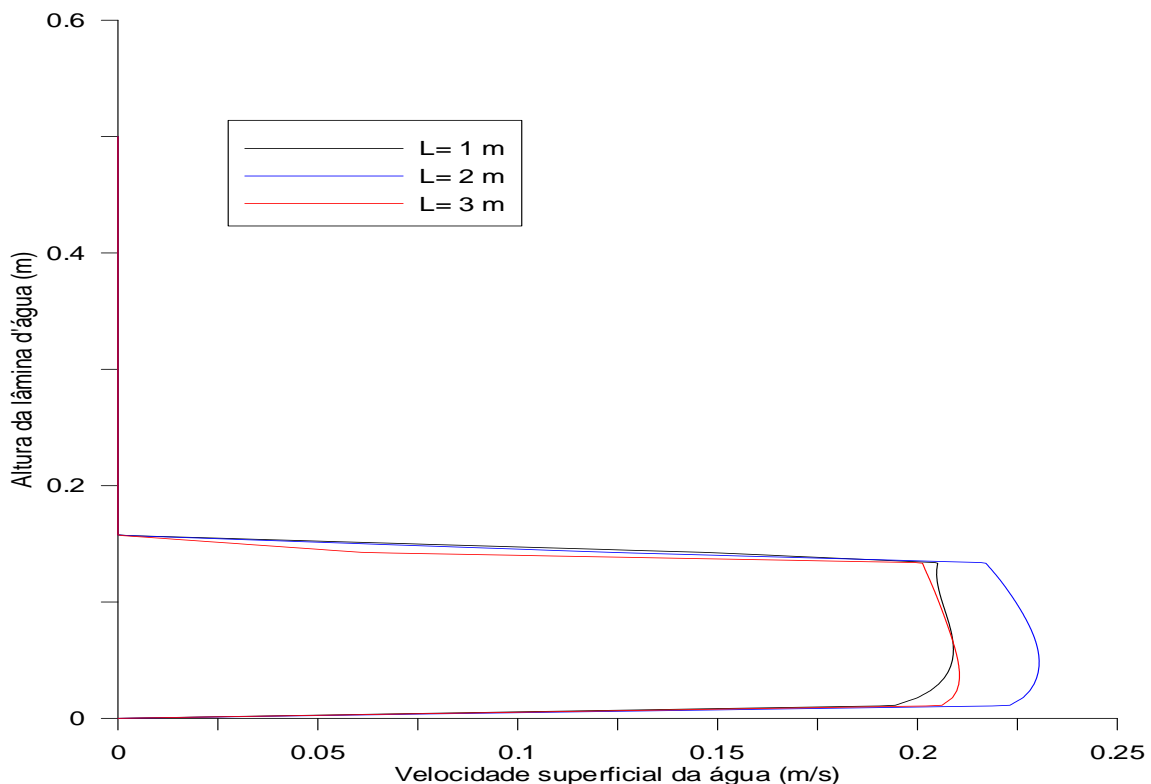


Figura 6. Variação da velocidade superficial da água nas posições ( $L = 1$  m,  $L = 2$  m e  $L = 3$  m) para o caso 1.

Nas Figuras 8 e 9 observa-se uma modificação no perfil velocidade, esse comportamento aconteceu devido ao aumento da velocidade do ar, a consequência deste aumento ocasionou um maior arraste das camadas do líquido, influenciando nas tensões de cisalhamento. Na região inicial ( $L = 1$  m) o impulso de arraste devido a velocidade foi maior e reduzindo ao longo do comprimento, devido as perdas de carga a velocidade superficial da água foi reduzindo.

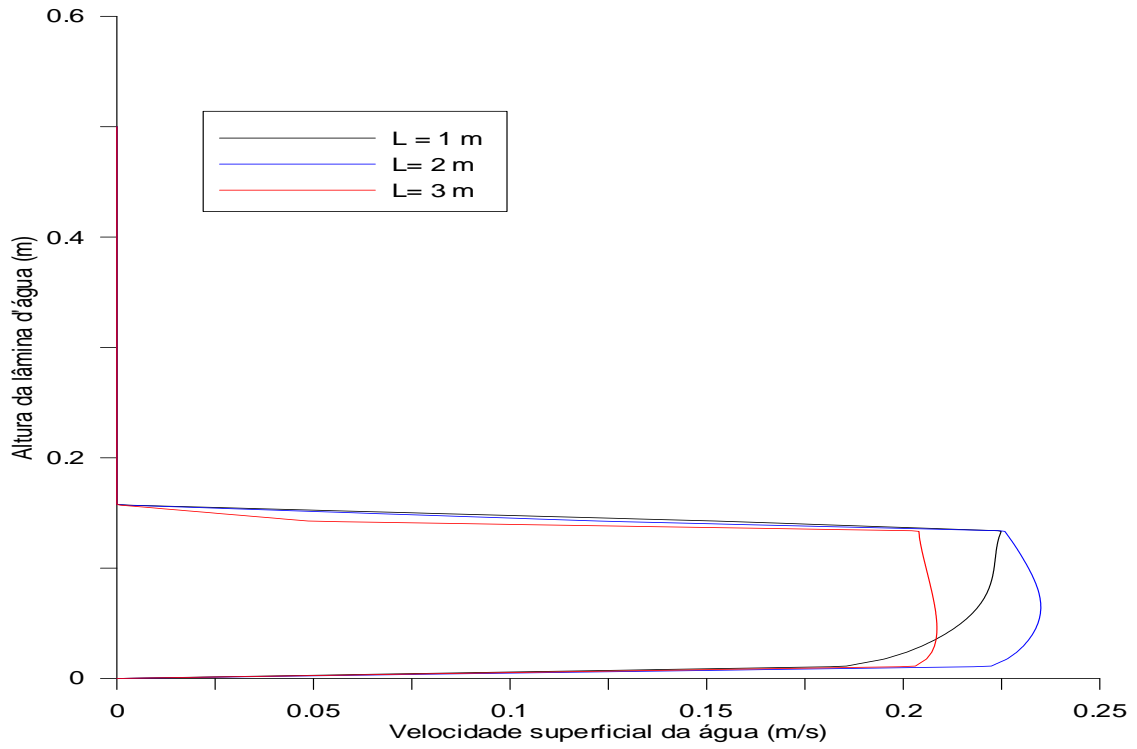


Figura 7. Variação da velocidade superficial da água nas posições (  $L= 1\text{ m}$ ,  $L= 2\text{ m}$  e  $L= 3\text{ m}$  ) para o caso 2.

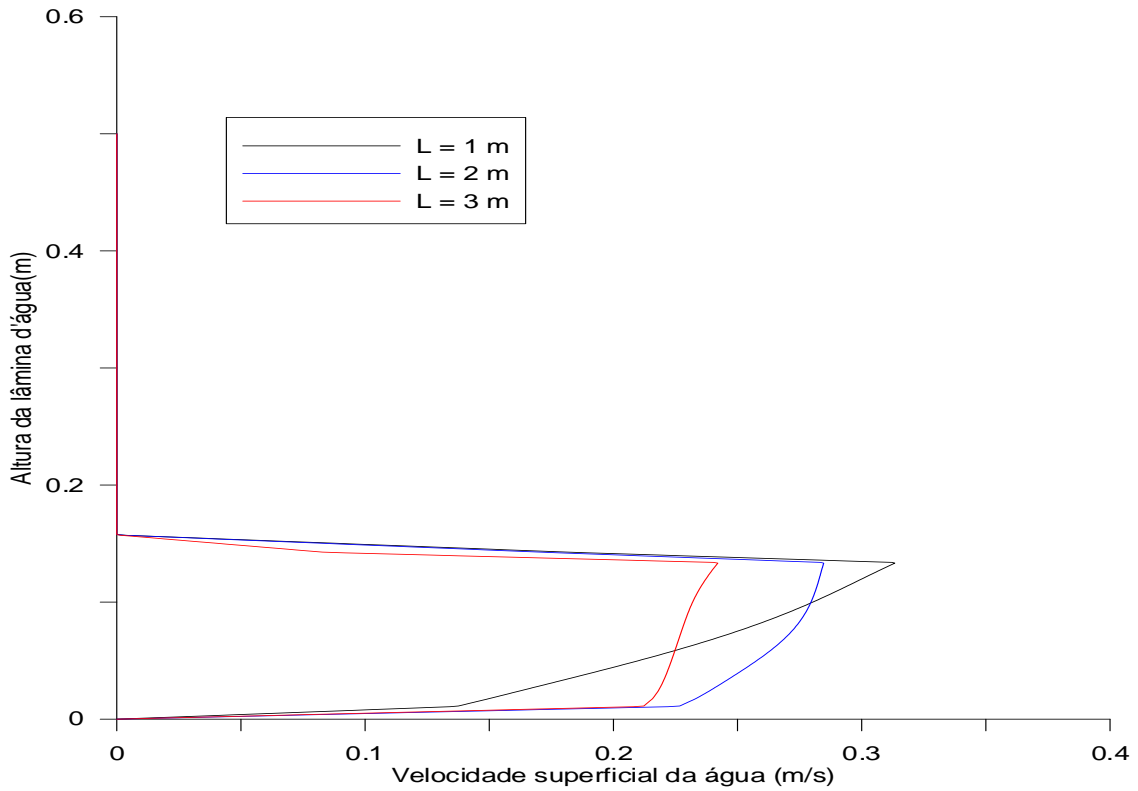


Figura 8. Variação da velocidade superficial da água nas posições (  $L= 1\text{ m}$ ,  $L= 2\text{ m}$  e  $L= 3\text{ m}$  ) para o caso 3.

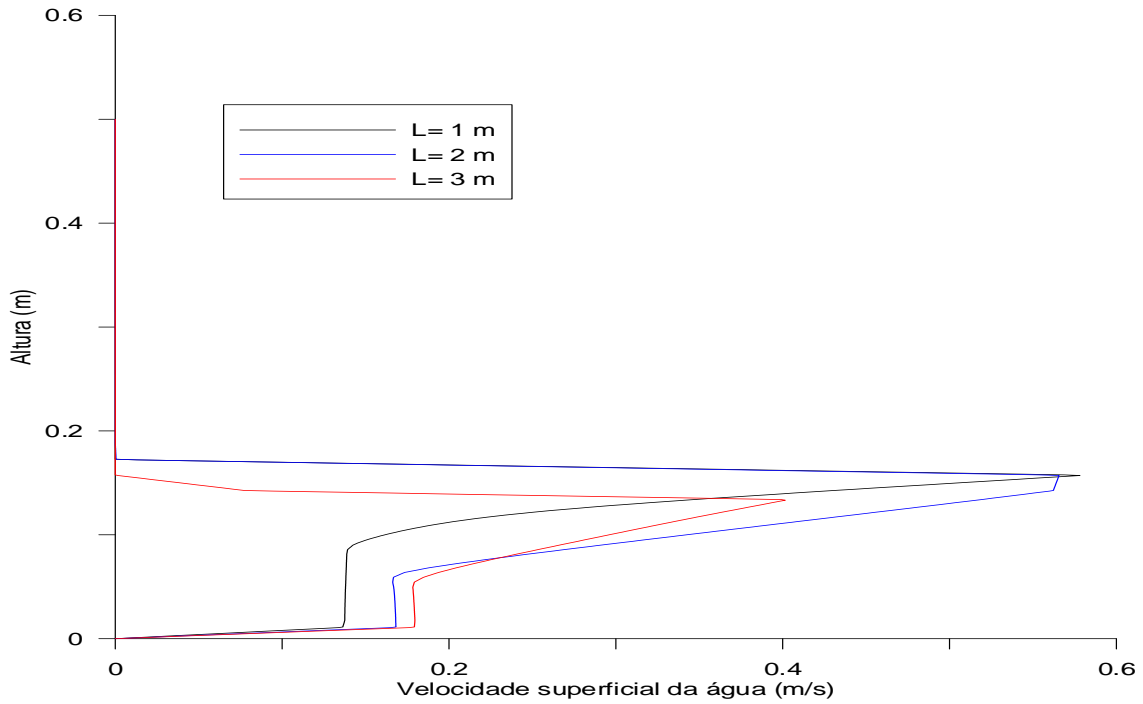


Figura 9. Variação da velocidade superficial da água nas posições ( L= 1 m, L= 2 m e L= 3 m ) para o caso 4.

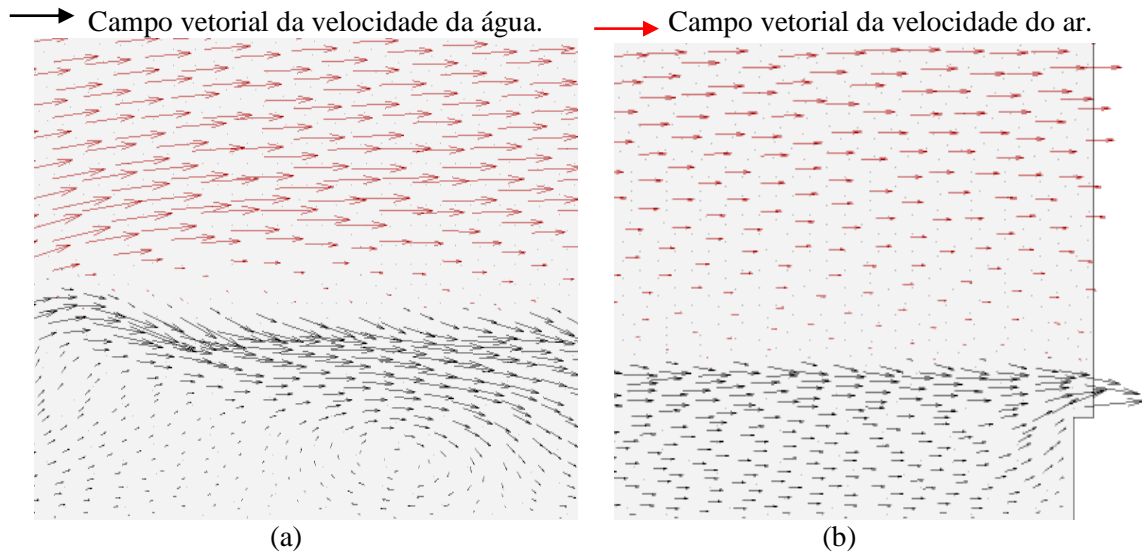


Figura 10. Vetores da velocidade superficial dos fluidos na região próximo entrada (a) e na saída (b) para o caso 4.

A Figura 10 apresenta os vetores da velocidade superficial dos fluidos. Observam-se áreas de recirculação geradas pelos seguintes fatores: diferença de velocidade dos fluidos, densidades e as tensões de cisalhamento. Na saída a presença do peitoral provocou também a formação de uma área de recirculação acompanhada por um aumento na turbulência dos fluidos. Os vetores mostrados foram plotados no plano Z ( 0,125 m) região com desenvolvimento significativo e altas velocidades de fluidos.

## 4 Conclusões

Com os resultados das simulações numéricas para os casos estudados do comportamento fluidodinâmico da água-ar em um tanque pode-se concluir:

- O comportamento da água na interface variou significativamente com o aumento da velocidade do ar;
- Observou-se que o aumento da velocidade do ar provocou a formação de ondas na superfície da água;
- A variação na interface água - ar foi diretamente proporcional ao aumento da velocidade do ar;
- Comprovou-se que o modelo matemático proposto foi capaz de avaliar o escoamento bifásico estudado.

## 5 Agradecimentos

Ao programa de Pós- Graduação em Engenharia de Processos (UFCG), como também ao laboratório de Pesquisa em Fluidodinâmica e Imagem e à Capes pelo apoio financeiro.

## 6 Referências

- [1] BENEDETTI, E. Água - Fonte da vida, Uberlândia, Revista veterinária notícias, v. 18, n. 1, p. 1-5, 2013.
- [2] CARMO, R. L.; DAGNINO, R. S.; FEITOSA, F. F.; JOHANSEN, I. C.; CRAICE, C. População e consumo urbano de água no Brasil: Interfaces e desafios. XX Simpósios Brasileiro de Recursos Hídricos, 2013.
- [3] DUARTE, W. G.; MATTOS, A. N.; EING, C.; SILVA, D. L.; FRASSON, K. C.; ECKERT, C. L. Aproveitamento de Água Pluvial para Fins não Potáveis: estudo de caso na jardinagem. Revista Ciência & Cidadania, v. 1, n. 1, p. 8-18. 2015.
- [4] MARCHESAN, E.; SARTORI, G. M. S.; REIMCHE, G. B.; AVILA, L. A.; ZANELA, R.; MACHADO, S. L. O.; MACEDO, V. R. M.; COGO, J. P. Qualidade de água dos rios Vacacaí e Vacacaí-Mirim no Estado do Rio Grande do Sul, Brasil. Ciência Rural, v.39, n.7, p.2050-2056, 2009.
- [5] RATTNER, H. Meio ambiente, saúde e desenvolvimento sustentável. Ciência & Saúde Coletiva, v.14, n.6, p.1965-1971, 2009.
- [6] MAYERHOFF, Z. D. V. L. Inovações estão em aperfeiçoar o tratamento de águas e efluentes. Propriedade Intelectual. Instituto Nacional da Propriedade Industrial, 2007.
- [7] PAZ, A. R. Análise dos principais fatores intervenientes no comportamento hidrodinâmico do banhado do Taim . Dissertação de Mestrado, Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 176 p, 2003.
- [8] BARROS, M. L. Modelagem hidrodinâmica e de qualidade de água em corpos de água com alagamento e secamento. Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2012.

- [9] BUIL, N. Modelagem tridimensional de transporte de poluentes em fluxos de superfície livre. Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia mecânica, Universidade Claude Bernard - Lyon1, 1999.
- [10] ANSYS Inc., CFX-Theory Manual Guide, 2015.
- [11] EVANGELISTA, A, W, P. Propriedades fundamentais dos fluidos. Escola de Agronomia e engenharia de alimentos, setor de engenharia rural. Disponível em: [https://www.agro.ufg.br/up/68/o/1.1.2\\_Propriedades\\_dos\\_fluidos.pdf](https://www.agro.ufg.br/up/68/o/1.1.2_Propriedades_dos_fluidos.pdf) . Acesso em: 01 de Julho de 2019.
- [12] GOMES, M. H. R. Apostila de mecânica dos fluidos. Universidade Federal de Juiz de Fora. Disponível em: <http://www.ufjf.br/engsanitariaeambiental/files/2012/09/Apostila-de-Mec%C3%A2nica-dos-Fluidos.pdf> . Acesso em: 01 de Julho de 2019.
- [13] WHITE, F.M. Viscous Flow. McGraw Hill, 3rd ed., 2006.
- [14] PORTO, R. M. Hidráulica básica. 2 ed. São Carlos: EESC – USP, 1999, 519 p.