



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA HIDRÁULICA E AMBIENTAL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

PRISCILA ARAUJO BARBOSA PARENTE

**MODELAGEM MATEMÁTICA DE SISTEMAS DE AERAÇÃO E
OXIGENAÇÃO ARTIFICIAL EM LAGOS E RESERVATÓRIOS**

Fortaleza

2014

PRISCILA ARAUJO BARBOSA PARENTE

**MODELAGEM MATEMÁTICA DE SISTEMAS DE AERAÇÃO E
OXIGENAÇÃO ARTIFICIAL EM LAGOS E RESERVATÓRIOS**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil do Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Civil. Área de Concentração: Saneamento Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Iran Eduardo Lima Neto

Fortaleza

2014

PRISCILA ARAUJO BARBOSA PARENTE

**MODELAGEM MATEMÁTICA DE SISTEMAS DE AERAÇÃO E
OXIGENAÇÃO ARTIFICIAL EM LAGOS E RESERVATÓRIOS**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil do Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Civil. Área de Concentração: Saneamento Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Iran Eduardo Lima Neto

Aprovada em: 28/02/2014.

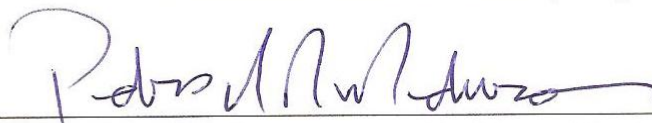
BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. Iran Eduardo Lima Neto (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)



Prof. Dr. Raimundo Oliveira de Souza (Membro interno)
Universidade Federal do Ceará (UFC)



Prof. Dr. Pedro Henrique Augusto Medeiros (Membro externo)
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE)

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca de Pós-Graduação em Engenharia - BPG

P252m Parente, Priscila Araújo Barbosa.
Modelagem matemática de sistemas de aeração e oxigenação artificial em lagos e reservatórios /
Priscila Araújo Barbosa Parente. – 2014.
84 f. : il. color., enc. ; 30 cm.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Fortaleza, 2014.

Área de Concentração: Saneamento Ambiental
Orientação: Prof. Dr. Iran Eduardo Lima Neto.

1. Saneamento. 2. Aeração. 3. Dissolução. 4. Massa – Transferência. I. Título.

A Deus.

AGRADECIMENTOS

A Deus, que, com seu amor infinito, me deu o dom da vida e me proporcionou tudo de que disponho hoje.

À Maria Santíssima, que sempre me iluminou e pediu a Deus por mim.

Aos meus pais, Paulo e Sara, sempre tão presentes e compreensivos, que me educaram e me prepararam para tomar as decisões da minha vida com caráter e a consciência de que tudo o que tenho foi Deus quem me deu. Minha gratidão eterna.

Ao meu irmão, Paulo Henrique, que é um grande orgulho e me inspira.

Aos meus avós e tias-avós e à minha família em geral pelo seu carinho e atenção no que dizia respeito à minha vida profissional.

Ao Jimmy, que a cada dia se mostra mais parceiro, mais prestativo e mais companheiro. Sua ajuda foi imprescindível para a realização deste trabalho. Obrigada por me fazer sorrir e acreditar.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Iran Eduardo Lima Neto, por seus conselhos, orientações, respostas via email imediatas e compreensão ao longo desse período. Meu grande respeito.

Ao Prof. Dr. Raimundo Oliveira de Souza, por ter sido uma peça fundamental para a obtenção deste título, me oferecendo atenção, oportunidades, carinho, conselhos e, sobretudo, motivação. Deixo aqui o meu profundo agradecimento.

Aos professores, pela contribuição na minha formação acadêmica.

Às amigas que o mestrado me proporcionou Larissa, Sâmara e Micaella.

Às minhas companheiras de “sala”, que tornaram os momentos de aperreio mais leves com as conversas e risadas: Jéssyca, Karina e Heloísa.

Ao meu amigo Riamburgó, que o mestrado fortaleceu a amizade.

À minha amiga Raquel, uma das melhores amizades que conquistei nesse período, a quem sou muito grata pelo tempo cedido e os conselhos dados.

Aos que contribuíram direta ou indiretamente para que este trabalho fosse realizado com sucesso.

À Funcap.

“Il faut toujours prier comme si l’action
était inutile et agir comme si la prière était
insuffisante.”

Sainte Thérèse de Lisieux

RESUMO

Devido à degradação progressiva dos corpos hídricos em geral, tem-se dado bastante atenção a alternativas para a recuperação da qualidade de suas águas. Técnicas de aeração e oxigenação artificial via injeção de ar ou oxigênio puro na água (plumas de bolhas) podem ser utilizadas para tal finalidade. Nesse contexto, o presente trabalho desenvolveu um modelo integral para avaliação da transferência de massa de plumas de bolhas circulares em ambientes não estratificados, o qual é baseado em uma distribuição radial do tipo Gaussiana das propriedades do escoamento e em relações matemáticas para o coeficiente de entrada turbulenta e o fator de amplificação da quantidade de movimento devido à turbulência. O impacto da transferência de massa na hidrodinâmica de plumas de bolhas foi investigado considerando diferentes diâmetros de bolha, vazões de gás e profundidades em sistemas de aeração e oxigenação. Os resultados revelaram impacto significativo quando bolhas finas são consideradas mesmo em profundidades moderadas. Bolhas médias apresentaram, em geral, comportamento semelhante ao de bolhas grossas. As simulações também indicaram que, em condições de vazões relativamente baixas e elevadas profundidades, dissolução e turbulência podem afetar a hidrodinâmica da pluma de bolhas, o que demonstra a importância de se levar o fator de amplificação da quantidade de movimento em consideração. Simulações utilizando o modelo proposto e modelos clássicos disponíveis na literatura resultaram em boa concordância tanto para processos de aeração quanto de oxigenação. Finalmente, foram apresentados estudos de caso para os dois processos.

Palavras-chave: Aeração; Dissolução; Modelagem; Oxigenação; Plumam de bolhas; Transferência de massa.

ABSTRACT

Due to the progressive degradation of water bodies in general, alternatives have been studied so as to restore their water quality. Artificial aeration/oxygenation by injecting air/pure oxygen in the water (bubble plumes) can be used for this purpose. Hence, this study presents an integral model to evaluate gas transfer from circular bubble plumes in unstratified environments which is based on a radial Gaussian type distribution of plume properties and functional relationships for the entrainment coefficient and factor of momentum amplification due to turbulence. The impact of gas-liquid mass transfer on bubble plume hydrodynamics is investigated considering different bubble sizes, gas flow rates and water depths. Also simulations were run for aeration and oxygenation systems in order to provide the analysis of these effects. The results revealed a significant impact when fine bubbles are considered, even for moderate water depths. Medium bubbles present overall similar behavior as coarse bubbles. Additionally, model simulations also indicate that for bubble plumes with relatively low gas flow rates and high water depths, both dissolution and turbulence can affect bubble plume hydrodynamics, which demonstrates the importance of taking the momentum amplification factor relationship into account. For deeper water conditions, simulations of bubble dissolution using the present model and classical models available in the literature resulted in a very good agreement for both aeration and oxygenation processes. Finally, case studies involving those processes are presented.

Keywords: Aeration; Bubble Plumes; Dissolution; Mass-transfer; Modeling; Oxygenation.

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 - Equações de correlação.....	37
Tabela 3.2 - Profundidade do reservatório	42
Tabela 3.3 - Diâmetro inicial do difusor	42
Tabela 3.4 - Vazão de saída de ar do difusor	42
Tabela 3.5 - Valores utilizados nas simulações	43
Tabela 4.1 - Dados utilizados por Wüest et al. (1992) para o processo de aeração	45
Tabela 4.2 - Dados utilizados por Wüest et al. (1992) para o processo de oxigenação	46
Tabela 4.3 - Dados utilizados por Buscaglia et al. (2002) para o processo de aeração à vazão de 0,3 L/s.....	47
Tabela 4.4 - Dados utilizados por Buscaglia et al. (2002) para o processo de aeração à vazão de 3,0 L/s.....	48
Tabela 4.5 - Desvios em relação à curva “Sem dissolução” calculados para a velocidade no centro da pluma em corpos hídricos de 25 m.....	51
Tabela 4.6 - Desvios em relação à curva “Sem dissolução” calculados para a velocidade no centro da pluma em corpos hídricos de 50 m.....	52
Tabela 4.7 - Desvios em relação à curva “Sem dissolução” calculados para a velocidade no centro da pluma em corpos hídricos de 100 m. Valores em destaque indicam comportamento anômalo em bolhas finas.	56
Tabela 4.8 - Desvios em relação à curva “Sem dissolução” calculados para o raio da pluma em corpos hídricos de 25 m.....	59
Tabela 4.9 - Desvios em relação à curva “Sem dissolução” calculados para o raio da pluma em corpos hídricos de 50 m.....	61
Tabela 4.10 - Desvios em relação à curva “Sem dissolução” calculados para o raio da pluma em corpos hídricos de 100 m. Valores em destaque indicam comportamento anômalo em bolhas finas.....	63

Tabela 4.11 - Desvios em relação à curva “Sem dissolução” calculados para bolhas com 10 mm de diâmetro inicial.....	65
Tabela 4.12 - Desvios em relação à curva “Sem dissolução” calculados para bolhas com 2 mm de diâmetro inicial	66
Tabela 4.13 - Dados utilizados no estudo de caso de aeração.....	72
Tabela 4.14 - Estudo de caso para aeração.....	73
Tabela 4.15 - Dados utilizados no estudo de caso de oxigenação	75
Tabela 4.16 - Dissolução das bolhas.....	76

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Estado trófico de reservatórios monitorados pela Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos do Estado do Ceará	2
Figura 1.2 - Concentração de oxigênio dissolvido no açude Frios no estado do Ceará em diferentes meses	3
Figura 1.3 - Formação de jato líquido com espalhamento aproximadamente linear em tanque contendo água: (a) Injeção de ar no tanque (pluma de bolhas); (b) Injeção de água no tanque (jato monofásico)	4
Figura 2.1 - Exemplos de (a) plumas simples e (b) plumas forçadas	8
Figura 2.2 - Exemplos de jatos particulados	8
Figura 2.3 - Exemplos de empuxo negativo (esquerda) e empuxo positivo / negativo (direita)	9
Figura 2.4 - Exemplo de plumas	10
Figura 2.5 - Esquema de plumas de bolhas para destratificação e aeração	11
Figura 2.6 - Esquema de uma pluma de bolhas	12
Figura 2.7 - Representação de plumas monofásicas e bifásicas em ambiente estratificado	13
Figura 2.8 - Representação esquemática de liberação de bolhas de ar em água homogênea e estagnada: (a) Circulação num reservatório homogêneo; (b) Campo de velocidade próximo à pluma	14
Figura 2.9 - Difusor para aeração de rio	15
Figura 2.10 - Esquema do projeto	18
Figura 2.11 - Representação da geometria da pluma de bolhas de distribuição top hat circular	22
Figura 3.1 - Esquema de uma pluma de bolha	33
Figura 4.1 - Comparação do diâmetro das bolhas do presente modelo e do modelo apresentado por Wüest et al. (1992) para o processo de aeração nas condições fornecidas na Tabela 4.1	45

Figura 4.2 - Comparação do diâmetro das bolhas do presente modelo e do modelo apresentado por Wüest et al. (1992) para o processo de oxigenação nas condições fornecidas na Tabela 4.2	46
Figura 4.3 - Comparação do diâmetro das bolhas do presente modelo e do modelo apresentado por Buscaglia et al. (2002) para o processo de aeração nas condições fornecidas na Tabela 4.3	47
Figura 4.4 - Comparação do diâmetro das bolhas do presente modelo e do modelo apresentado por Buscaglia et al. (2002) para o processo de aeração nas condições fornecidas na Tabela 4.4	48
Figura 4.5 - Comparação da velocidade no centro da pluma com e sem dissolução para corpo d'água de 25 m de profundidade e (a) $Q_a = 50$ L/min, (b) $Q_a = 150$ L/min e (c) $Q_a = 450$ L/min	50
Figura 4.6 - Comparação da velocidade no centro da pluma com e sem dissolução para corpo d'água de 50 m de profundidade e (a) $Q_a = 50$ L/min, (b) $Q_a = 150$ L/min e (c) $Q_a = 450$ L/min	53
Figura 4.7 - Comparação da velocidade no centro da pluma com e sem dissolução para corpo d'água de 100 m de profundidade e (a) $Q_a = 50$ L/min, (b) $Q_a = 150$ L/min e (c) $Q_a = 450$ L/min	55
Figura 4.8 - Comparação do raio da pluma com e sem dissolução para corpo d'água de 25 m de profundidade e (a) $Q_a = 50$ L/min, (b) $Q_a = 150$ L/min e (c) $Q_a = 450$ L/min	58
Figura 4.9 - Comparação do raio da pluma com e sem dissolução para corpo d'água de 50 m de profundidade e (a) $Q_a = 50$ L/min, (b) $Q_a = 150$ L/min e (c) $Q_a = 450$ L/min	60
Figura 4.10 - Comparação do raio da pluma com e sem dissolução para corpo d'água de 100 m de profundidade e (a) $Q_a = 50$ L/min, (b) $Q_a = 150$ L/min e (c) $Q_a = 450$ L/min	62
Figura 4.11 - Comparação do diâmetro das bolhas com e sem dissolução para corpo d'água de 25 m de profundidade e diâmetro de bolha inicial de 10 mm	64
Figura 4.12 - Comparação do diâmetro das bolhas com e sem dissolução para corpo d'água de 100 m de profundidade e diâmetro de bolha inicial de 10 mm	65
Figura 4.13 - Comparação do diâmetro das bolhas com e sem dissolução para corpo d'água de 25 m de profundidade e diâmetro de bolha inicial de 2 mm	66

Figura 4.14 - Comparação do diâmetro das bolhas com e sem dissolução para corpo d'água de 100 m de profundidade e diâmetro de bolha inicial de 2 mm	66
Figura 4.15 - Comparação (a) da velocidade no centro da pluma, (b) do raio da pluma e (c) do diâmetro de bolha com e sem dissolução para corpo d'água de 50 m de profundidade, diâmetro inicial de 5 mm e $Q_a = 150$ L/min	68
Figura 4.16 - Comparação da velocidade no centro da pluma com e sem dissolução para corpo d'água de 50 m de profundidade, diâmetro inicial de 5 mm e $Q_a = 150$ L/min.....	69
Figura 4.17 - Comparação do raio da pluma com e sem dissolução para corpo d'água de 50 m de profundidade, diâmetro inicial de 5 mm e $Q_a = 150$ L/min	70
Figura 4.18 - Comparação do diâmetro de bolha com e sem dissolução para corpo d'água de 50 m de profundidade, diâmetro inicial de 5 mm e $Q_a = 150$ L/min.....	70
Figura 4.19 - Comparação do diâmetro de bolha com e sem dissolução para corpo d'água de 100 m de profundidade e diâmetro inicial de 5 mm	71
Figura 4.20 - Açude Acarape do Meio.....	72
Figura 4.21 - Relação entre vazão de circulação e profundidade utilizando vazão de saída do difusor de $0,010$ Nm ³ /s.....	74
Figura 4.22 - Açude Orós.....	75
Figura 4.23 - Esquema do estudo de caso para oxigenação	75

LISTA DE SÍMBOLOS

- z - Coordenada vertical originando-se no ponto de liberação do gás [m]
- $Q(z)$ - Vazão volumétrica de gás no nível z [Nm^3/s]
- H_a - Carga de pressão atmosférica [m]
- H_d - Carga de pressão na altura da descarga de gás [m]
- Q_a - Vazão volumétrica de gás sob pressão atmosférica [Nm^3/s]
- Q_f - Vazão volumétrica na saída do difusor ($z = 0$) [Nm^3/s]
- u_c - Velocidade no centro da pluma [m/s]
- ϕ_c - Fração gasosa no centro da pluma [-]
- b - Raio da pluma [m]
- λ - Razão entre os raios de espalhamento das regiões ocupadas pelas bolhas e pelo jato líquido vertical [-]
- r - Distância radial do centro da pluma [m]
- Q_l - Vazão do jato vertical [Nm^3/s]
- α - Coeficiente de entrada turbulenta [-]
- Q_g - Vazão de gás [Nm^3/s]
- u_s - Velocidade relativa entre as bolhas e o jato de água [m/s]
- γ - Fator de amplificação da quantidade de movimento devido à turbulência [-]
- ρ_a - Densidade da água [kg/m^3]
- ρ_g - Densidade das bolhas de gás [kg/m^3]
- $\Delta\rho$ - Diferença entre ρ_a e ρ_g [kg/m^3]
- g - Aceleração da gravidade [m/s^2]
- $u_{c,0}$ - Velocidade do jato no centro nas condições iniciais [m/s]
- b_0 - Raio da pluma nas condições iniciais (na fonte) [m]

z_0 - Origem virtual da pluma (também chamada de origem matemática) [m]

δ - Constante ajustada por testes [-]

β - Parâmetro adimensional [-]

g' - Aceleração da gravidade aparente [m/s²]

J - Fluxo de gás [mol/m²s]

K_L - Coeficiente de transferência de massa em um sistema gás-líquido [m/s]

C_{s_i} - Concentração de saturação da espécie i na água [mol/m³]

C_i - Concentração da espécie i no jato vertical [mol/m³]

n - Massa da espécie i (oxigênio ou nitrogênio) [mol]

d_b - Diâmetro médio das bolhas no difusor [m]

H - Constante de Henry [mol/(m³bar)]

P_i - Pressão parcial da espécie i [bar]

r_b - Raio da bolha [m]

T - Temperatura [°C]

P_{tot} - Pressão total [bar]

P_{atm} - Pressão atmosférica [bar]

C_i - Concentração do componente (oxigênio ou nitrogênio) no jato vertical [mol/m³]

C_{O_2} - Concentração de oxigênio no jato vertical [mol/m³]

C_{N_2} - Concentração de nitrogênio no jato vertical [mol/m³]

$u_{c,n-1}$ - Velocidade equivalente a $u_{c,0}$ (no início) e o valor calculado na etapa anterior à etapa n [m/s]

$u_{c,n}$ - Velocidade no ponto de estudo [m/s]

z_{n-1} - Profundidade no ponto anterior [m]

z_n - Profundidade no ponto de estudo [m]

b_{n-1} - Raio da pluma equivalente a b_0 (no início) e o valor calculado na etapa anterior à etapa n [m]

b_n - Raio da pluma no ponto de estudo [m]

m_1 - Massa de gás no difusor [kg]

$V_{b,0}$ - Volume da bolha na saída do difusor [m³]

$d_{b,0}$ - Diâmetro inicial da bolha [m]

Q_n - Vazão levando em conta a transferência de massa [Nm³/s]

N - Número de fluxo de bolhas [s⁻¹]

n_n - Massa no ponto de estudo [mol]

m_{n-1} - Massa no ponto anterior do estudo [kg]

m_n - Massa no próximo ponto do estudo [kg]

MM_i - Massa molar da espécie (oxigênio ou nitrogênio) [kg/mol]

c - Porcentagem do componente i [-]

m - Massa [kg]

$d_{b,n}$ - Diâmetro no ponto de estudo [m]

SUMÁRIO

RESUMO	i
ABSTRACT	ii
LISTA DE TABELAS	iii
LISTA DE FIGURAS	v
LISTA DE SÍMBOLOS	viii
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Objetivos	5
1.1.1. Objetivos gerais	5
1.1.2. Objetivos específicos	6
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	7
2.1. Tipos de escoamentos no estudo de plumas.....	7
2.2. Plum as e Jat os.....	8
2.2.1. Aplicações	10
2.3. Introdução ao estudo de Plum as de Bolhas.....	11
2.3.1. Características das Bolhas.....	16
2.3.2. Formulação das Plum as de Bolhas	17
2.3.3. Estudos desenvolvidos na área	23
3. METODOLOGIA.....	28
3.1. Princípios conservativos.....	28
3.1.1. Princípio da Continuidade.....	28
3.1.2. Transferência de massa	35
3.2. Processo de cálculo	38
3.2.1. Parte I - Hidrodinâmica.....	38

3.2.2.	Parte II - Hidrodinâmica + Transferência de massa	39
3.3.	Simulação do Processo.....	42
3.4.	Estudo de caso	43
3.4.1.	Aeração	43
3.4.2.	Oxigenação.....	43
4.	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	44
4.1.	Validação do modelo	44
4.1.1.	Wüest et al. 1992 - Aeração	44
4.1.2.	Wüest et al. 1992 - Oxigenação.....	46
4.1.3.	Buscaglia et al. 2002 - Aeração.....	47
4.2.	Efeito da transferência de massa na hidrodinâmica do modelo para processos de aeração	49
4.2.1.	Análise para a velocidade no centro da pluma	49
4.2.2.	Análise para o raio da pluma.....	57
4.2.3.	Análise para o diâmetro das bolhas	63
4.3.	Efeito da transferência de massa na hidrodinâmica do modelo para processos de oxigenação	67
4.3.1.	Análise para a velocidade da pluma no centro	69
4.3.2.	Análise para o raio da pluma.....	69
4.3.3.	Análise para o diâmetro das bolhas	70
4.4.	Estudo de caso	71
4.4.1.	Aeração	71
4.4.2.	Oxigenação.....	74
5.	CONCLUSÕES	77
	REFERÊNCIAS	79

1. INTRODUÇÃO

A eutrofização dos corpos hídricos é um dos impactos ambientais que merece destaque e que vem exigindo bastante atenção. Cenários que apresentam excesso de nutrientes na água podem vir a acelerar esse processo, que não é apenas um problema ambiental, mas também sanitário e econômico.

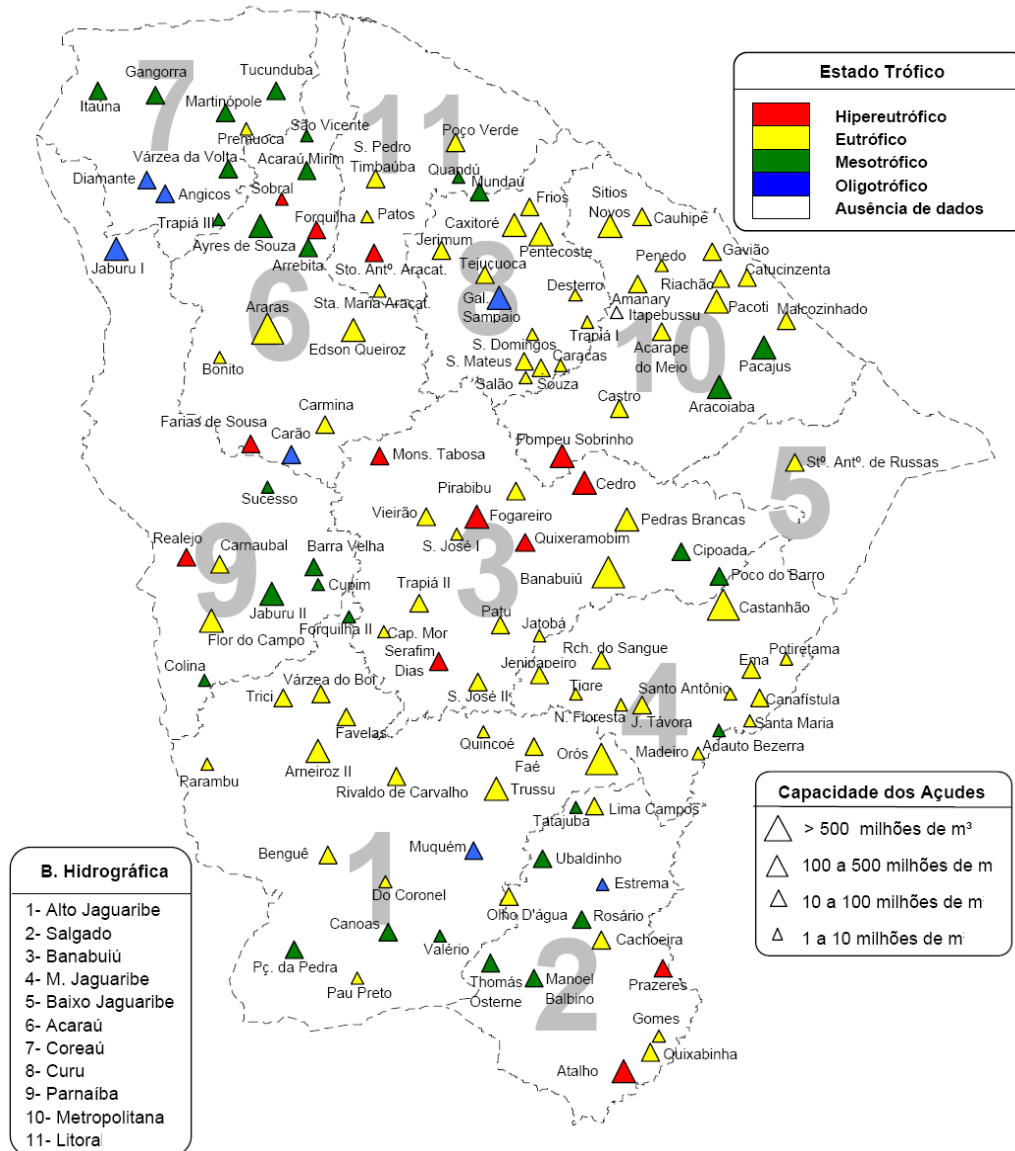
Em algumas situações, o problema da eutrofização pode ser agravado por questões climáticas. Nas regiões semiáridas, por exemplo, durante a estação de seca, a quantidade de nutrientes advindos de atividades urbanas, industriais e agropecuárias permanece praticamente inalterada, enquanto os reservatórios passam a receber menor quantidade de água devido à escassez de chuvas. Por conta disso, tem se observado uma degradação progressiva dos reservatórios localizados em tais regiões.

Segundo Figueirêdo et al. (2007), a erosão intensa, altas cargas poluidoras e baixas profundidades dos reservatórios são fatores que têm sido considerados responsáveis pelo processo de eutrofização no estado do Ceará.

Um levantamento realizado pela Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos do Estado do Ceará (COGERH, 2008) mostrou que, cerca de 70% dos 132 reservatórios monitorados por esta companhia, os quais possuem volumes variando entre aproximadamente 1,0 e 6.700 hm³, já apresentam estado eutrófico ou hipereutrófico (Figura 1.1). Estima-se que a eutrofização também atinja uma parcela significativa de reservatórios com volumes inferiores a 1,0 hm³, os quais apresentam em geral baixas profundidades e condições precárias de proteção ambiental, sendo, portanto, mais susceptíveis ao problema. Esses pequenos lagos artificiais correspondem a cerca de 90% dos mais de 4.000 reservatórios identificados, por exemplo, na Bacia do Alto Jaguaribe (Lima Neto et al. 2011).

Esses índices de estado trófico são dados através da quantificação de clorofila-A, concentração de fósforo e transparência. Como no estado do Ceará há abundância de nitrogênio, a concentração de fósforo age como limitante (N-P), sendo o principal fator de determinação de estado trófico no estado.

Figura 1.1 - Estado trófico de reservatórios monitorados pela Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos do Estado do Ceará



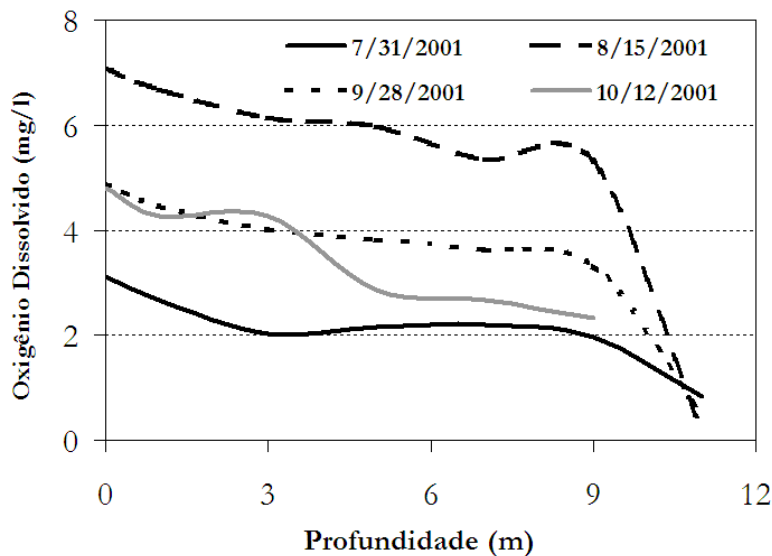
Fonte: COGERH (2008).

Muitos problemas nos corpos hídricos podem ser evitados proporcionando-se os devidos fins para os resíduos, sejam eles líquidos ou sólidos. No entanto, quando as águas já se apresentam danificadas, é necessário adotar algumas medidas reparadoras (VON SPERLING 1996). A injeção de ar ou gás oxigênio (O₂) na água é uma ação corretiva abordada neste estudo.

A liberação de um gás em uma determinada profundidade num corpo d'água dá origem a uma circulação em larga escala e também à mistura e aeração da água. Para a recuperação de reservatórios por meio de injeção de gás na água, a utilização de plumas de bolhas nesse processo tem apresentado boa representatividade, mostrando-se eficiente na

manutenção da qualidade das águas e, por esse motivo, sendo bastante utilizada. As plumas agem não apenas suplementando os níveis de oxigênio dissolvido e impedindo a ressolubilização de nutrientes depositados no fundo, mas também deslocando as algas para zonas afóticas e prevenindo a estratificação em razão dos padrões de circulação gerados pela formação de jatos turbulentos de água ao redor das bolhas (WÜEST et al. 1992). A oxigenação no hipolímnio (Figura 1.2) também tem sido muito utilizada para minimizar a ressolubilização do fósforo e o impacto da eutrofização (Beutel & Horne 1999, Burris et al. 2002, McGinnis et al. 2004, Singleton & Little 2006, Socolofsky et al. 2008).

Figura 1.2 - Concentração de oxigênio dissolvido no açude Frios no estado do Ceará em diferentes meses



Fonte: SOUZA FILHO & MARTINS (2006).

A Figura 1.2 mostra um decaimento significativo do nível de oxigênio em função da profundidade do açude Frios no estado do Ceará. Mesmo em pequenas profundidades, os níveis de oxigênio dissolvido se apresentam abaixo do especificado pela Resolução CONAMA 357 (5 mg/L). Isso mostra a real necessidade de se realizar a oxigenação nas camadas mais profundas das águas.

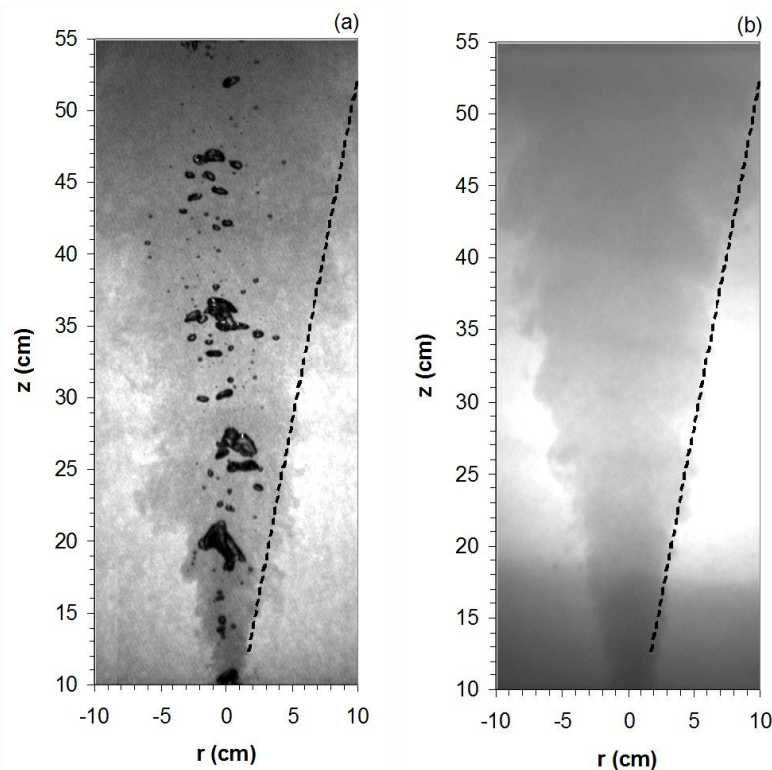
Além da capacidade de recuperar reservatórios e de manter a qualidade da água, a injeção de ar na água também pode ser aplicada para reduzir as taxas de evaporação em reservatórios de abastecimento por conta da geração de padrões de circulação (VAN DIJK & VAN VUUREN 2009).

Cederwall & Ditmars 1970 desenvolveram um modelo matemático para prever o comportamento de plumas de bolhas que foi, posteriormente, aperfeiçoado por Milgram 1983, Fannelop & Sjoen 1980, Wüest et al. 1992, Socolofsky et al. 2002 e Lima Neto 2012a.

Neste trabalho, utilizou-se o modelo aperfeiçoado por Lima Neto 2012a para descrever a hidrodinâmica de plumas de bolhas, cujo efeito da transferência de massa, sugerido primeiramente por Wüest et al. 1992, foi incorporado ao modelo. É importante ressaltar que o modelo desenvolvido nesse estudo se diferencia do de Wüest et al. 1992 em alguns aspectos, os quais serão apresentados no decorrer deste trabalho.

Com o auxílio de um traçador, pode-se visualizar a formação de um jato de água com espalhamento aproximadamente linear na Figura 1.2(a), uma fotografia de uma pluma de bolhas. Esse espalhamento linear é semelhante aos jatos formados pela injeção de água em tanques, como se pode verificar na Figura 1.2(b).

Figura 1.3 - Formação de jato líquido com espalhamento aproximadamente linear em tanque contendo água: (a) Injeção de ar no tanque (pluma de bolhas); (b) Injeção de água no tanque (jato monofásico)



Fonte: LIMA NETO (2007).

Além de minimizar os impactos da eutrofização, sistemas de plumas de bolhas de ar/O₂ têm sido utilizados para muitos outros propósitos, tais como: aeração e tratamento de

esgoto, formação de barreiras contra intrusão de águas salinas em rios e lagoas, contenção do espalhamento de óleo na superfície da água, diques pneumáticos, contenção de contaminantes, sequestro de CO₂ no fundo do oceano, agitação e mistura em processos industriais, prevenção de formação de gelo em lagos, entre outros. (Wüest et al. 1992, Socolofsky 2001, Yapa & Chen 2004, Johansen 2003, Singleton & Little 2006, Lima Neto et al. 2007, Socolofsky et al. 2008, Lima Neto et al. 2008a, 2008b, 2008c, Einarsrud & Brevik 2009, Lima Neto 2012a, 2012b). Plumas de bolhas também ocorrem em vazamentos de gás no fundo do oceano, descarga de metano de reservatórios profundos, etc.

Apesar da grande variedade de aplicações práticas das plumas de bolhas, ainda se carece de modelo preciso para avaliar a hidrodinâmica desses sistemas incluindo os processos de transferência de massa. A razão disso é que detalhes da estrutura desse escoamento bifásico são muito complexos. Portanto, o comportamento da pluma de bolhas deve ser analisado suficientemente bem.

Tanto a literatura nacional quanto a internacional carecem de estudos de validação de modelos matemáticos para simulação da hidrodinâmica de plumas de bolhas considerando em seus cálculos a transferência de massa sob diversas condições operacionais, o que torna esta pesquisa de relevância do ponto de vista científico e tecnológico.

Por fim, este estudo permite uma melhor compreensão do comportamento hidrodinâmico de plumas de bolhas, incluindo os processos de transferência entre as bolhas e a água e o desenvolvimento e validação de modelo integral para aprimorar a simulação da hidrodinâmica das plumas e seus processos de transferência de massa, contribuindo para avaliar o potencial do uso de plumas de bolhas na recuperação da qualidade da água.

1.1. Objetivos

1.1.1. Objetivos gerais

O presente estudo tem como objetivo principal desenvolver um modelo matemático para análise da hidrodinâmica e da transferência de massa em plumas de bolhas, que possa ser usado como ferramenta para avaliar o impacto desses sistemas na qualidade da água de lagos e reservatórios.

1.1.2. Objetivos específicos

- ℵ Implementar um modelo matemático para simulação da hidrodinâmica de plumas de bolhas;
- ℵ Implementar uma rotina de transferência de massa da fase gasosa para a fase líquida no modelo supracitado;
- ℵ Realizar simulações para avaliar o impacto da transferência de massa na hidrodinâmica de plumas de bolhas;
- ℵ Comparar o modelo desenvolvido com trabalhos já publicados e validá-lo;
- ℵ Aplicar o modelo a diferentes cenários (tamanho do reservatório, vazão de gás, localização do difusor, etc.);

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

No estudo dos sistemas de plumas de bolhas em tanques e corpos hídricos não-estratificados, se faz necessária uma análise detalhada dos principais elementos que compõem esse sistema como o seu tipo de escoamento, a caracterização das bolhas e os modelos que descrevem a dinâmica e a transferência de massa em tais plumas. Nesta seção, são apresentados os fundamentos e principais teorias que determinam o comportamento desses sistemas.

2.1. Tipos de escoamentos no estudo de plumas

Os escoamentos relacionados a este estudo podem ser de duas maneiras, escoamentos monofásicos e escoamentos multifásicos, cujos monofásicos são aqueles caracterizados pelo fluxo de apenas líquido ou gás, enquanto que os multifásicos são aqueles caracterizados pelo fluxo de líquido com gás e/ou sólido. Esses escoamentos podem ser subdivididos, dependendo da sua natureza, em:

Escoamentos monofásicos:

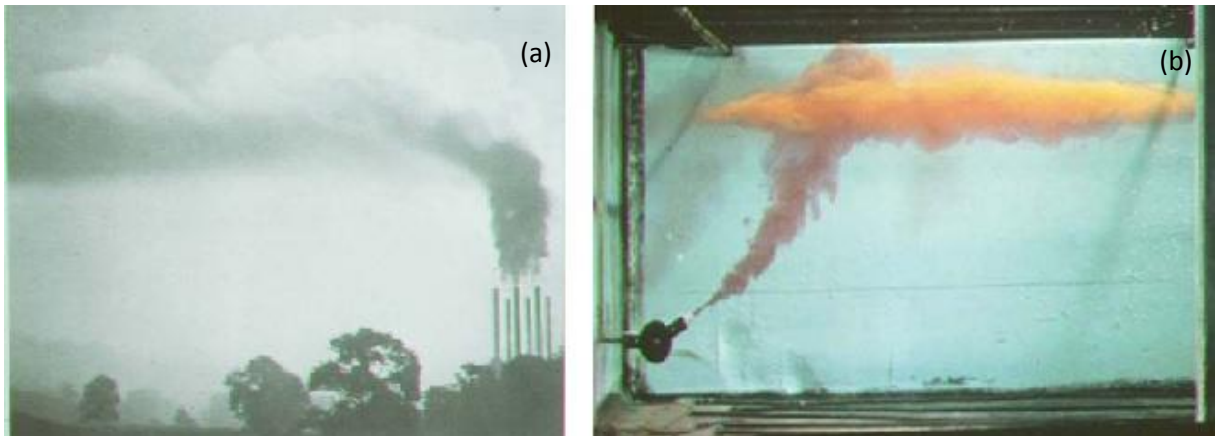
- 1) Jatos simples – escoamentos gerados por uma fonte de momentum (quantidade de movimento);
- 2) Plumais simples – escoamentos gerados por uma diferença de densidade (empuxo);
- 3) Plumais forçadas – escoamentos inicialmente controlados por uma fonte de quantidade de movimento e depois por diferenças de densidade.

Escoamentos multifásicos:

- 1) Jatos de bolhas – injeção de misturas gás-líquido em um líquido;
- 2) Plumais de bolhas – injeção de um gás em um líquido;
- 3) Jatos particulados – injeção de misturas líquido-sólido (partículas de areia ou de argila) em um líquido;
- 4) Escoamentos do tipo gás-líquido-sólido – descarga de misturas de óleo, gás e água no oceano ou gás, sedimento e água, por exemplo.

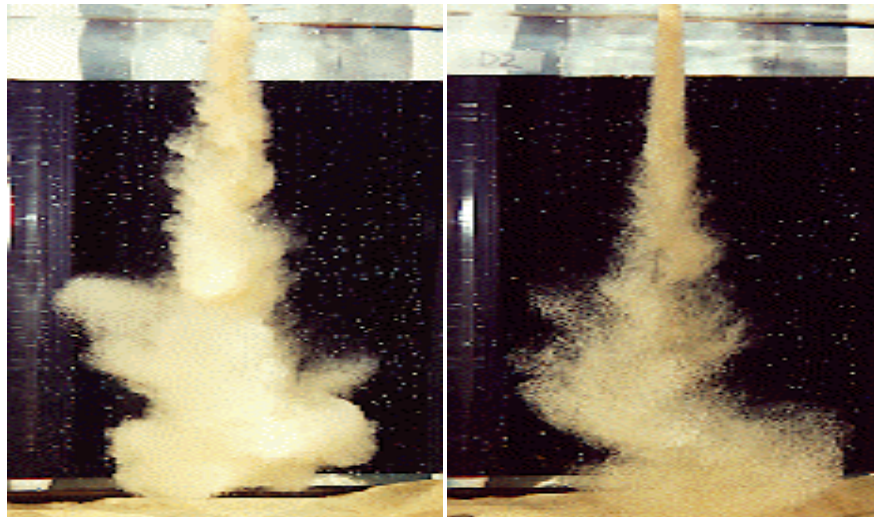
Existem ainda outras subdivisões tanto para o escoamento monofásico, como para o multifásico, sendo as mencionadas as principais. As Figuras 2.1(a-b) e 2.2 ilustram alguns desses exemplos.

Figura 2.1 - Exemplos de (a) plumas simples e (b) plumas forçadas



Fonte: <<http://www.cormix.info/>>.

Figura 2.2 - Exemplos de jatos particulados



Fonte: <<http://maligne.civil.ualberta.ca/>>.

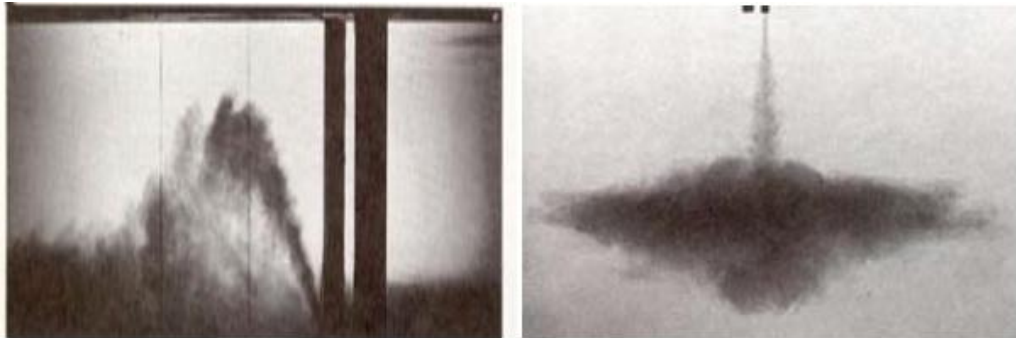
2.2. Jatos e Plumas

Como definido na seção 2.1, chamam-se plumas multifásicas os escoamentos devido ao empuxo orientado, o qual é garantido pela liberação contínua de uma fase dispersa imiscível, como bolhas de gás, gotículas líquidas ou partículas sólidas (SOCOLOFSKY et al. 2002). Neste estudo, foi adotado o termo plumas de bolhas.

As plumas multifásicas se distinguem das plumas monofásicas pela característica de poder-se separar a fase dispersa (as bolhas, partículas) da fase contínua (o fluido ambiente). Essa separação ocorre quando o movimento horizontal de fluido retira o fluido de arraste da fase dispersa (SOCOLOFSKY 2001).

Uma das importantes características das plumas, e também dos jatos, é a sua capacidade de se deslocar pelo fluido ambiente e realizar auto-diluição (ZHANG 2012). Sabendo-se disso, pode-se dizer que a pluma é um fluxo causado por uma fonte de energia potencial, em que o fluido pode ter empuxo positivo ou negativo em relação aos arredores. Como exemplo de empuxo positivo, tem-se a Figura 2.1(a), e a Figura 2.3(a-b) contém outros exemplos.

Figura 2.3 - Exemplos de empuxo negativo (esquerda) e empuxo positivo / negativo (direita)



Fonte: Fischer et al. (1979).

A diferença básica entre os jatos de bolhas e as plumas de bolhas é que os jatos são produzidos por injeção de misturas gás-líquido em líquido, enquanto as plumas são produzidas injetando-se gases em líquidos. Ambos são bastante utilizados para realizar aeração, circulação e mistura artificiais em reatores, tanques de aeração e corpos de água poluídos (WHIPPLE & YU 1970).

A Figura 2.4 ilustra um exemplo de pluma causada na erupção do vulcão Saint Helene, Estados Unidos, em 1980. E, no subtópico que segue, são discutidas algumas aplicações de plumas e jatos.

Figura 2.4 - Exemplo de plumas



Fonte: <<http://www.usgs.gov/>>

2.2.1. Aplicações

Em lagos e reservatórios estratificados, um gradiente de temperatura (termoclina) age como uma barreira impedindo a troca de oxigênio dissolvido entre a área altamente aerada (epilímnio) e a área mais profunda pouco aerada (hipolímnio) (Lima Neto, 2007).

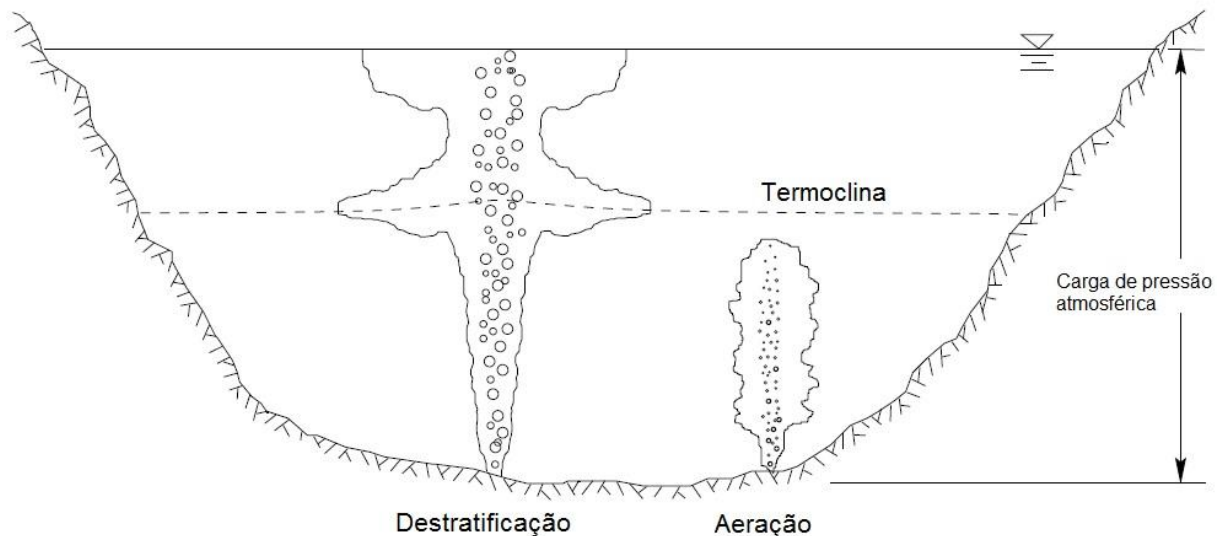
Em algumas aplicações, oxigênio puro é utilizado para realizar a oxigenação hipolímnica a fim de minimizar a eutrofização (FAST et al. 1975, 1977; PREPAS et al. 1997), enquanto que ar é usado para introduzir padrões de forte circulação para remover a estratificação e melhorar os níveis de oxigênio dissolvido (WÜEST et al. 1992; SAHOO & LUKETINA 2005).

Uma aplicação prática do sistema de plumas de bolhas é a sua utilização no auxílio de corpos hídricos em estado de eutrofização. Como o fósforo é um dos principais causadores desse processo, deve-se evitar que ocorra a ressolubilização do fósforo depositado no fundo, para que a sua concentração na coluna d'água seja mínima. Condições anóxicas fazem com que a ressolubilização do fósforo ocorra, por isso, é necessário evitar que os níveis de oxigênio dissolvidos fiquem muito baixos.

Existem diversas técnicas químicas, biológicas, mecânicas, etc, para restaurar lagos ou minimizar os impactos da eutrofização. Devido aos altos custos e resultados relativamente insignificantes dos diferentes métodos para minimizar a eutrofização, o processo de aeração artificial é um dos mais promissores (GAFSI et al. 2009).

Desse modo, em sistemas de aeração/destratificação, Figura 2.5, elevadas vazões são utilizadas para produzir bolhas grandes que podem penetrar na termoclina, ao contrário do que ocorre nos sistemas de oxigênio puro, em que bolhas menores são produzidas para dissolver no hipolímnio (SOCOLOFSKY 2001; MCGINNIS et al. 2004). No entanto, deve-se ter cuidado ao se utilizar vazões elevadas para evitar perturbar os sedimentos no fundo que pode comprometer a qualidade da água.

Figura 2.5 - Esquema de plumas de bolhas para destratificação e aeração



Fonte: Adaptada de Socolofsky (2001).

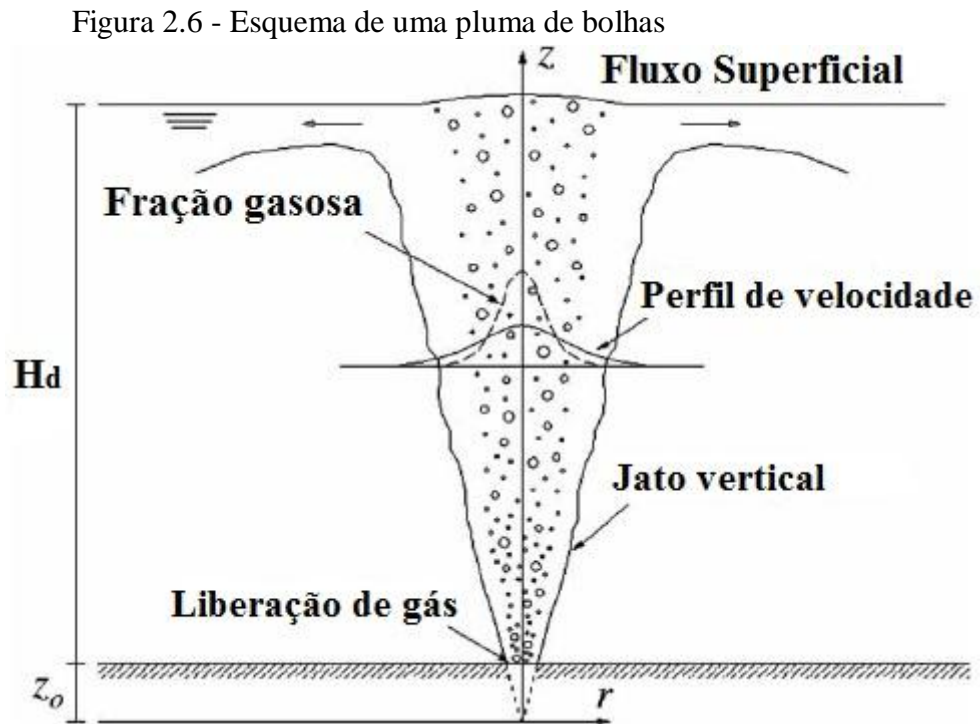
Em outras aplicações, a injeção de gás pode ser utilizada para melhorar os níveis de oxigênio dissolvido e gerar circulação e mistura suficientes para dispersar o oxigênio dissolvido e fornecer concentrações uniformes na água (WPCF, 1988; WAGNER & PÖPEL 1998; DUCHENE et al. 2001; MUELLER et al. 2002; SCHIERHOLZ et al. 2006), ou ainda pode ser utilizada para manter os sedimentos suspensos e evitar a formação de uma camada anaeróbia no fundo do tanque (MUELLER et al., 2002; SOGA & REHMANN 2004).

Vistas as diferenças básicas entre jatos e plumas, parte-se para o estudo mais detalhado das plumas de bolhas, assunto principal desta pesquisa.

2.3. Introdução ao estudo de Plumam de Bolhas

As plumas podem ser o resultado de diversas fases dispersas, entretanto, neste estudo, foi considerado apenas um tipo de fase dispersa, bolhas na água. Para descrever fisicamente uma pluma de bolhas, devem-se levar em consideração as condições de liberação da fase dispersa assim como as condições ambientes da água. A composição e as características

físicas da fase dispersa são importantes parâmetros que descrevem essa liberação. Estratificação e possíveis correntes existentes no ambiente são condições ambientais que podem também ser relevantes (SOCOLOFSKY et al. 2002). A Figura 2.6 ilustra o esquema de uma pluma de bolhas com seus principais elementos.



Fonte: Adaptada de Lima Neto (2012a).

Há algumas situações em que as plumas de bolhas são similares às plumas monofásicas. A principal diferença entre plumas monofásicas e multifásicas vem da natureza discreta da fase dispersa flutuante. Numa pluma multifásica, a fase dispersa fornece o empuxo para a pluma e sua distribuição é controlada tanto por sua própria dinâmica como pelo movimento do fluido.

Perto da fonte, uma pluma é normalmente controlada pelas condições iniciais, que incluem a geometria da pluma, a velocidade de saída da pluma, a diferença de densidade inicial entre os fluidos (descarga e ambiente), intensidade da turbulência e a distribuição da velocidade (FISCHER et al. 1979).

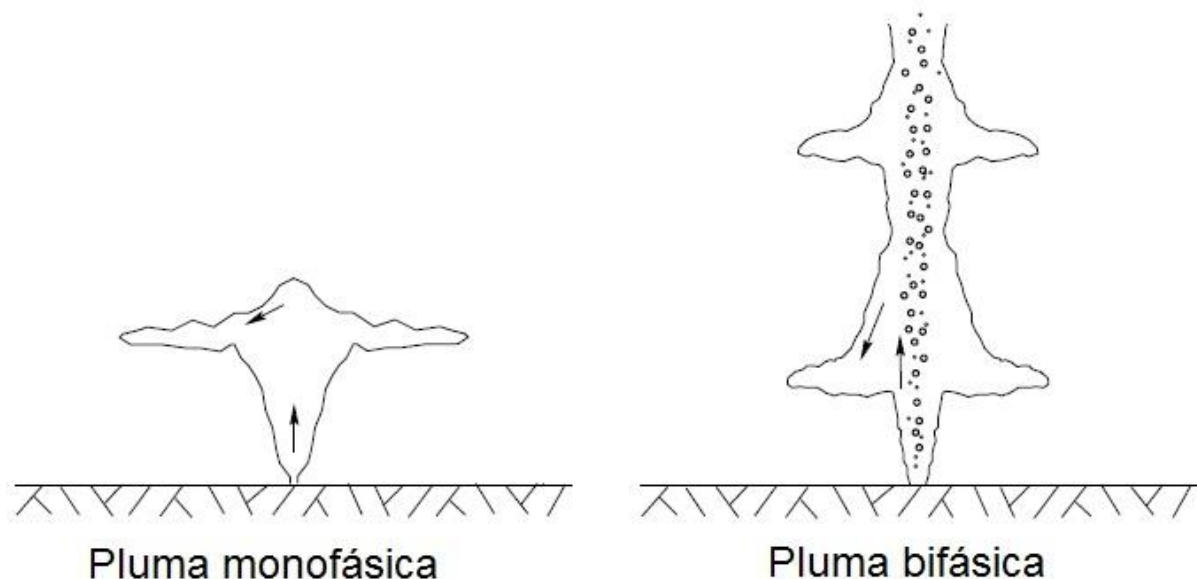
Levando em consideração os efeitos causados por fatores ambientais nos processos de formação de plumas de bolhas, devem ser apontados como efeitos relevantes aqueles relacionados à presença de estratificação, as correntes perpendiculares e a turbulência do ambiente (os dois últimos praticamente inexistentes em lagos e reservatórios).

Corpos de águas naturais, como lagos e represamentos, costumam ser estratificados, sendo a estratificação térmica um fator que controla efetivamente a convecção e a difusão no lago, provocando um efeito de desacoplamento entre o fluxo de água e as bolhas. Em regiões tropicais, sobretudo no semi-árido, a estratificação se mostra menos intensa, em razão da temperatura média ser significativamente maior do que a variação de temperatura ao longo da profundidade. Nessa região, a estratificação se dá, principalmente, devido aos níveis de oxigênio dissolvido e não à variação de temperatura.

As condições de estratificação são mais estáveis no verão quando o lago exhibe grandes gradientes térmicos. Por esse motivo, a qualidade da água nas camadas mais baixas pode ser reduzida significativamente, uma vez que o teor de oxigênio dissolvido não é mais influenciado pela reaeração superficial. Nesses casos, mistura artificial pode ser uma alternativa efetiva de melhorar a qualidade do corpo d'água (CEDERWALL & DITMARS 1970).

A estratificação é o fenômeno que consiste na formação de camadas horizontais de água com diferentes densidades. Conseqüentemente, na presença da estratificação, o comportamento das plumas, sejam elas monofásicas ou bifásicas, é significativamente alterado, como pode ser observado na Figura 2.7. Esta pesquisa, entretanto, aborda a análise de um ambiente não-estratificado.

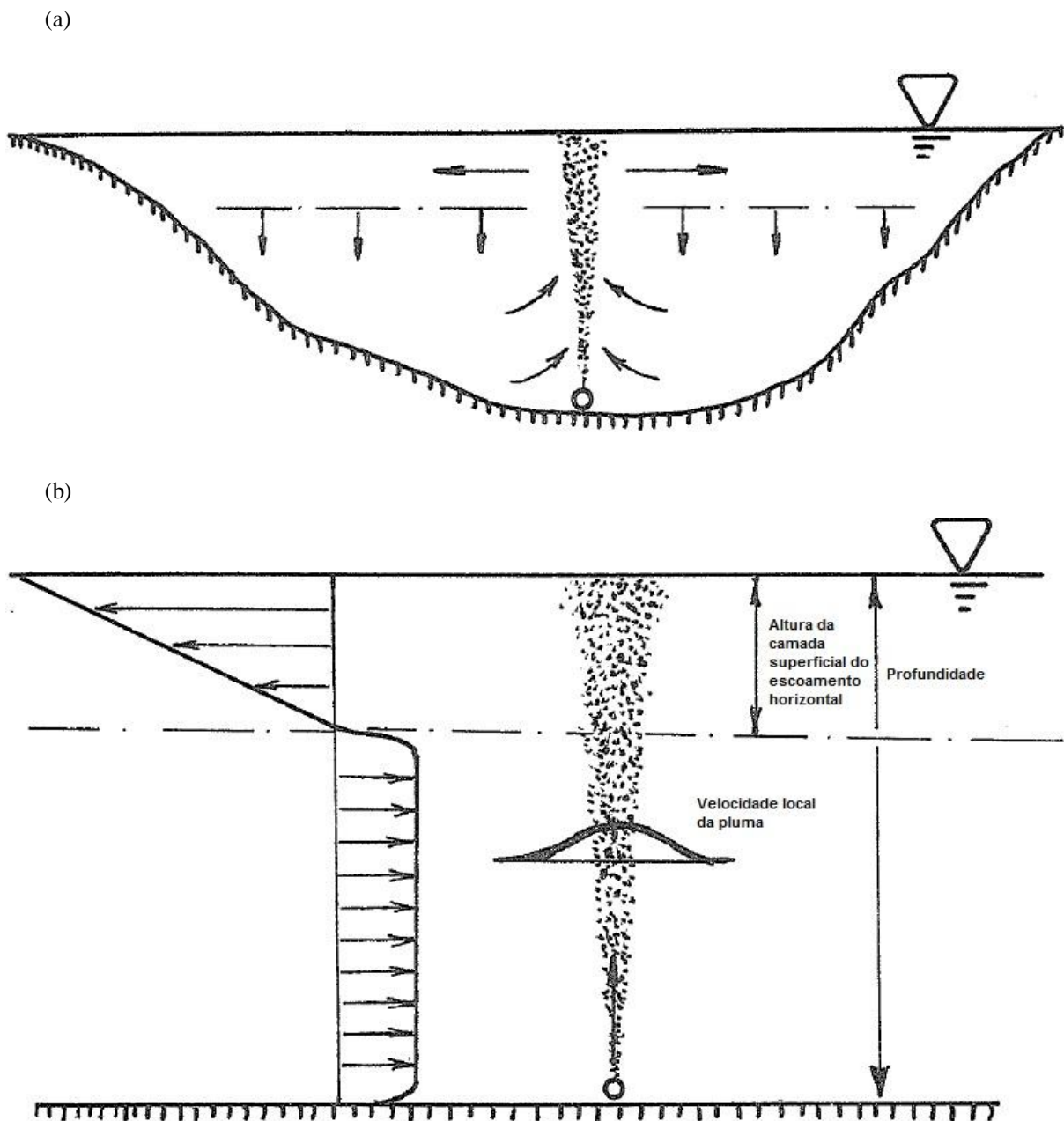
Figura 2.7 - Representação de plumas monofásicas e bifásicas em ambiente estratificado



Fonte: Adaptada de Socolofsky (2001).

A liberação de ar a uma certa profundidade em um corpo d'água, Figura 2.8(a-b), dá origem à circulação de ar em larga escala e, conseqüentemente, à mistura e à aeração da água. A mistura ocorre, principalmente, no interior da pluma gerada pelas bolhas ascendentes e o processo, em sua totalidade, pode ser causado pela agitação de todo o sistema, como no caso de um sistema de mistura completa, que ocorre quando o corpo é pequeno em relação à pluma de bolhas de ar (CEDERWALL & DITMARS 1970).

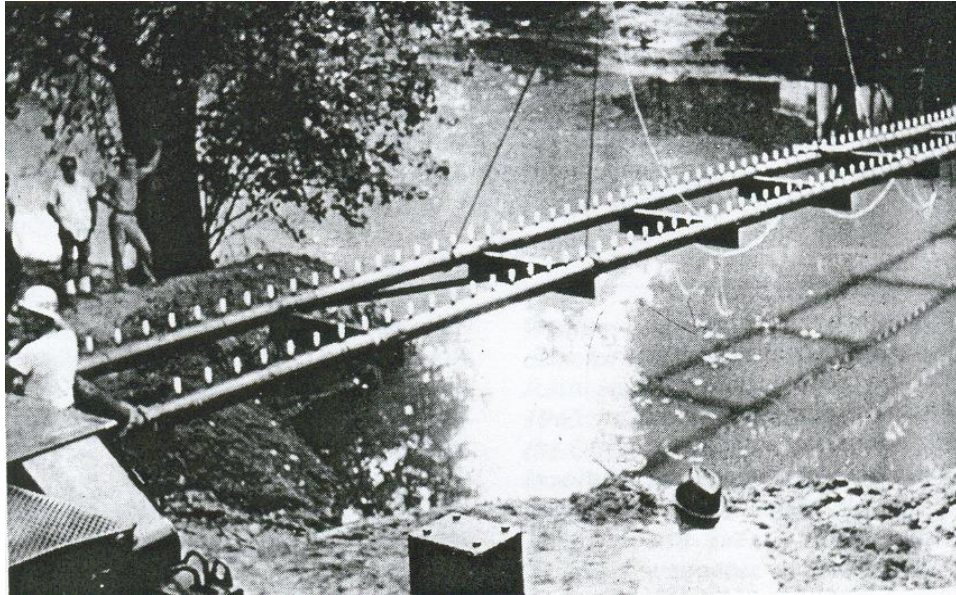
Figura 2.8 - Representação esquemática de liberação de bolhas de ar em água homogênea e estagnada: (a) Circulação num reservatório homogêneo; (b) Campo de velocidade próximo à pluma



Fonte: Adaptada de Cederwall & Ditmars (1970).

As plumas de bolhas requerem o emprego de um ou mais difusores. O objetivo principal de um sistema de difusor é realizar a mistura rápida do fluido de saída com o meio. A Figura 2.9 exemplifica um difusor para aeração de rio.

Figura 2.9 - Difusor para aeração de rio



Fonte: WHIPPLE & YU (1970).

A diluição inicial obtida em um grande sistema de difusão depende, principalmente, das características da descarga e das correntes e estratificação ambientais quando presentes. No entanto, apenas as características do difusor, a vazão de gás e a profundidade da descarga estão sob controle do engenheiro. Fatores secundários, como ângulo de descarga não costumam modificar o resultado significativamente (FISCHER et al. 1979).

Na saída do difusor, a velocidade máxima de ascensão de uma bolha de ar na água é atingida nas proximidades da fonte. Cederwall & Ditmars (1970) assumiram que a velocidade das bolhas permanece constante por toda a profundidade, fazendo com que todas as bolhas tenham a mesma velocidade, considerando que as bolhas não variam de tamanho na pluma.

O tamanho da bolha depende de alguns fatores como: tamanho e tipo do bocal; quantidade inicial de gás; solubilidade e capacidade de transferência de massa do gás; intensidade da turbulência e estrutura do escoamento do líquido ambiente; impurezas e surfactantes no líquido ambiente; entre outros (LIMA NETO et al. 2008a,b,c,d).

Em casos cuja injeção de gás num líquido estagnado é vertical, as bolhas produzidas irão se unir e ascender, induzindo o arraste do líquido ambiente para dentro do núcleo da

bolha e a dissolução do gás no ambiente (ZHANG 2012). Ainda em injeção vertical em águas paradas, Milgram (1983), Brevik and Kristiansen (2002) e Lima Neto et al. (2008b) relataram que normalmente a área das bolhas ocupa 50-90% do jato líquido na direção radial.

2.3.1. Características das Bolhas

Os parâmetros físicos que permitem um melhor entendimento do comportamento das bolhas incluem a velocidade relativa entre as bolhas e o jato de água, u_s , e a razão entre os raios de espalhamento das regiões ocupadas pelas bolhas e pelo jato líquido vertical, λ .

Em um ambiente estagnado, caso dos lagos, u_s depende de fatores como tamanho e forma da bolha, empuxo, viscosidade e concentração de surfactante (Clift et al. 1978). Do ponto de vista da forma, com o aumento do diâmetro, as bolhas assumem forma esférica para elíptica e, posteriormente, para a forma de calota esférica. Outros efeitos, tais como temperatura, também afetam o aumento das bolhas (Leifer et al. 2002).

O tamanho estável da bolha para um dado lançamento é afetado pela taxa de escoamento da fase dispersa e taxa de salinidade das águas receptoras. Para bolhas de ar em água doce, o tamanho da bolha aumenta com a taxa de escoamento do ar e é independente da geometria do difusor (KOBUS 1968, MILGRAM 1983, TACKE et al. 1985). Na água do mar, no entanto, as pequenas bolhas são mais estáveis, e a geometria do difusor pode desempenhar um papel significativo mesmo para baixas velocidades de saída no difusor (BEYERSDORF 1997).

Socolofsky (2001) mostra em seus experimentos que foram produzidas, para um mesmo difusor, bolhas com diâmetros de 2 mm em água doce e com diâmetros de 0,5 mm para águas marítimas, considerando o mesmo gás. O autor também verificou que esta mudança produz uma redução na velocidade relativa, de aproximadamente 20m/s para 7m/s.

Dadas certas propriedades da bolha, outros fatores ambientais podem afetar a velocidade relativa. Em uma pluma de bolhas, o escoamento que se desenvolve em torno dela é complexo, tendo em vista a turbulência que é gerada pelas tensões de cisalhamento produzidas pelas plumas das bolhas. Muitos pesquisadores, tais como Cederwall & Ditmars (1970), Milgram (1983), Tacke et al. (1985) e Brevik & Killie (1996) assumiram que estas condições de turbulência alteram as condições da água e sua velocidade terminal. Desta forma, optaram por tratar a velocidade relativa como um parâmetro livre. Entretanto, esse não

é um entendimento universal. Outros pesquisadores têm diferentes posicionamentos sobre este tema.

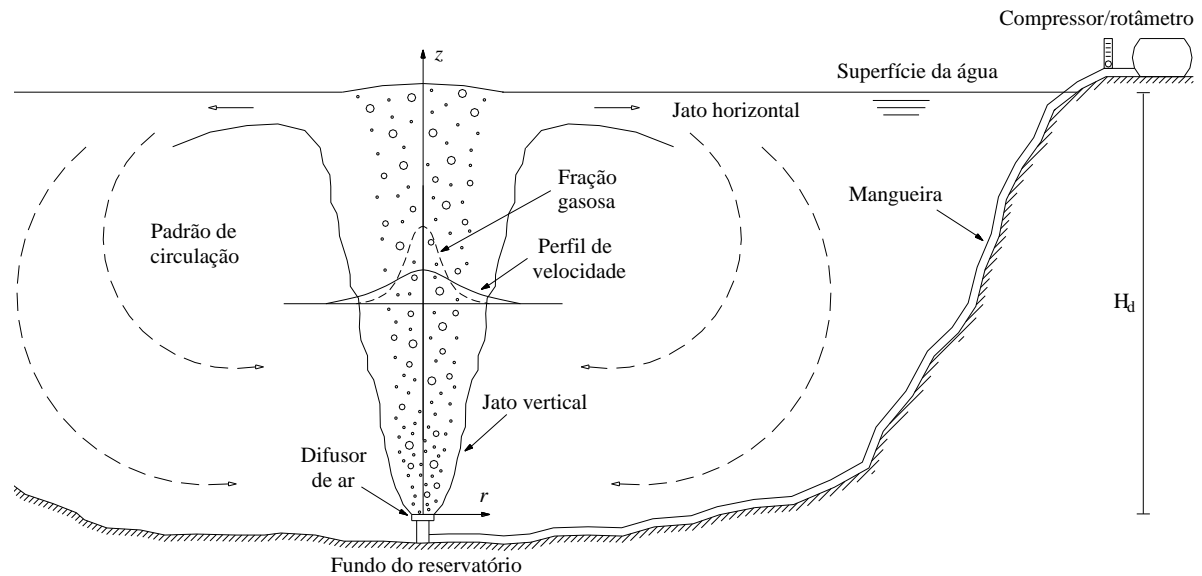
Outra observação é o fato de que a taxa de propagação do núcleo da bolha não é bem compreendida. As observações experimentais indicam que a razão entre os raios de espalhamento das regiões ocupadas pelas bolhas e pelo jato líquido vertical, λ , é aproximadamente constante em relação à altura, no entanto, existem divergências quanto a este fato. Milgram (1983) afirmou que os valores pequenos de λ relatado por Cederwall & Ditmars (1970) são fragmentos de pluma que se deslocam de forma aleatória. Esses fragmentos de plumas ocorrem quando uma pluma de bolhas se desloca em torno de sua linha central devido a correntes de recirculação criadas em bases confinadas. Quando este fragmento experimental é considerado, os resultados superestimam a largura da pluma e subestimam, na mesma proporção, o λ .

2.3.2. Formulação das Plumadas de Bolhas

Através de princípios fundamentais e considerando um difusor circular de plumas de bolhas, Wüest et al. (1992) desenvolveram um modelo para prever a dinâmica da pluma e a transferência de gás. O conjunto de modelos baseados nessa simples dinâmica representa o atual estado da arte para sistemas que têm por objetivo adicionar oxigênio a lagos e reservatórios estratificados (SINGLETON, 2008).

Por definição, nesse modelo, a quantidade de movimento inicial é negligenciada. O comportamento da pluma é regido, principalmente, pelas forças do fluido, sendo pouco influenciado pelas colisões das partículas (CROWE et al. 1998). A Figura 2.11 demonstra esquematicamente um sistema de aeração/destratificação através de plumas de bolhas.

Figura 2.10 - Esquema do projeto



Fonte: Elaborada pelo autor.

Uma importante característica das plumas monofásicas é que elas seguem os princípios de similaridade, nos quais o fluxo estabelece um tipo de equilíbrio em movimento, em que a evolução do fluxo é autônoma (TOWNSEND 1976; FISCHER et al. 1979; TURNER 1986). Assim, as propriedades das plumas são descritas por um valor característico no centro, e um raio característico, ambos em função da profundidade (MORTON et al. 1956; FISCHER et al. 1979; TURNER 1986).

A vantagem de se seguir esses princípios de similaridade é que, matematicamente, o modelo fica menos complexo, uma vez que as variáveis dependem apenas da profundidade, permitindo que a pluma possa ser modelada unidimensionalmente (SOCOLOFSKY 2001).

Ao contrário das plumas monofásicas, as plumas de bolhas não seguem estritamente os princípios de similaridade. Isto ocorre devido à razão entre a diminuição da velocidade do fluido da fase contínua e da velocidade relativa da bolha ser variável.

Para que as plumas sigam os princípios de similaridade, é necessário que λ e α sejam constantes, em que α é o coeficiente de entrada turbulenta. Experimentos de Wilkinson (1979) e Milgram (1983) mostraram que ambos variam com a profundidade. No entanto, os resultados dos modelos não são tão sensíveis à variação de λ (LIRO et al. 1991), sendo mais sensíveis ao α , apresentando, porém, resultados satisfatórios quando calculados considerando apenas a dependência em relação à altura ou quando usado um valor médio de α (MILGRAM 1983; TURNER 1986).

As teorias atuais de escoamento para plumas de bolhas são, em geral, integrais. Os modelos baseados na hipótese de entrada turbulenta vêm sendo utilizados há muito tempo para simular o comportamento de plumas de bolhas (CEDERWALL & DITMARS 1970; FANNELOP & SJOEN 1980; MILGRAM 1983; WÜEST et al. 1992; SOCOLOFSKY et al. 2008). A forma geral para os perfis radiais de velocidade do jato vertical e de fração gasosa é representada pelas Eqs. (2.1) e (2.2) respectivamente.

$$u(z, r) = u_c(z)e^{-r^2/b^2} \quad (2.1)$$

$$\phi(z, r) = \phi_c(z)e^{-r^2/(\lambda b)^2} \quad (2.2)$$

Em que u_c e ϕ_c são, respectivamente, os valores máximos da velocidade no centro da pluma e a fração gasosa no centro da pluma, b é o raio da pluma, λ é a razão entre os raios de espalhamento das regiões ocupadas pelas bolhas e pelo jato líquido vertical, z é a coordenada vertical originando-se no ponto de liberação do gás e r é a distância radial do centro da pluma.

Socolofsky et al. (2002) descreveram o modelo integral abordado nesse trabalho, cujas distribuições de velocidade do líquido e da fração gasosa seguiram distribuições Gaussianas similares. Seguem as equações de conservação de volume do líquido, Eq. (2.3), e de quantidade de movimento, Eq. (2.4).

$$\frac{d(u_c b^2)}{dz} = 2\alpha u_c b \quad (2.3)$$

$$\frac{d(u_c^2 b^2)}{dz} = \frac{2gQ_a H_a}{\gamma\pi(H_a + H_d - z)\left(\frac{u_c}{1 + \lambda^2} + u_s\right)} \quad (2.4)$$

Em que g é a aceleração da gravidade, Q_a é a vazão volumétrica de ar sob pressão atmosférica, H_a é a carga de pressão atmosférica, H_d é a carga de pressão na altura da descarga de ar e u_s é a velocidade relativa entre as bolhas.

O coeficiente de entrada turbulenta de um modelo integral não pode ser determinado a partir dos princípios fundamentais. Em contrapartida, um esquema especial deve ser assumido. Grande parte dos pesquisadores adotou o pressuposto de entrada turbulenta, que afirma que a velocidade efetiva ao longo de uma interface do escoamento é proporcional à velocidade característica deste escoamento (TURNER 1986).

Turner (1986) e Fischer et al. (1979) discutiram a entrada turbulenta no contexto de jatos e plumas monofásicos. O mais notável resultado para jatos monofásicos e plumas simples é que o coeficiente de entrada turbulenta α é constante. Os valores constantes de α são a prova do princípio de similaridade dos escoamentos.

Em contraste, a taxa de entrada turbulenta para plumas de bolhas não é universalmente constante. Este fato foi relatado por Cederwall & Ditmars (1970), que descobriram que a média dos valores de α variam entre os números 0,04 e 0,08, através dos experimentos de Kobus (1968), aumentando conforme maiores forem as taxas de escoamento de gás. Em outras experiências, Tacke et al. (1985) relataram que os coeficientes de entrada turbulenta têm valores entre 0,075 e 0,13.

Outras formas que caracterizam um esquema completo da entrada turbulenta têm sido investigadas. Por exemplo, Brevik & Killie (1996) e Brevik & Kluge (1999) propuseram que as tensões de Reynolds dominantes podem ser assumidas mediante o princípio de similaridade, de modo que a taxa de difusão pode ser definida por uma constante de integração. Infelizmente, essa constante, que deve ser determinada experimentalmente, varia de acordo com os parâmetros físicos, tais como a taxa de escoamento do gás, assim como o parâmetro α . Neste caso, esquemas alternativos não oferecem vantagens significativas sobre a suposição de entrada turbulenta.

Tendo em vista que o movimento das plumas ocorre em um escoamento turbulento, há a necessidade de se intruzir um fator de amplificação da quantidade de movimento, γ que relacione esta grandeza com o estado turbulento. A velocidade instantânea da pluma vertical pode ser decomposta em quantidades médias e de flutuações turbulentas do tipo $u = \bar{u} + u'$. Assim, valores de γ estão relacionados com a média dos produtos das flutuações turbulentas $\overline{u'u'}$.

Difusores de plumas de bolhas geralmente têm geometria linear ou circular e injetam ar ou oxigênio (MCGINNIS & LITTLE 2002). Bolhas de gás são injetadas em uma coluna d'água através de um difusor poroso criando uma mistura gás/água que ascende e ganha quantidade de movimento devido ao fluxo positivo do empuxo (SINGLETON 2008).

Muitos estudos têm sido realizados no que diz respeito à dinâmica das plumas. Porém, poucos foram conduzidos para ambientes estratificados (MCDUGALL 1978; SCHLADOW 1992; ASAEDA & IMBERGER 1993; LEMCKERT & IMBERGER 1993; SOCOLOFSKY

& ADAMS 2003), e, menos ainda, incluíram transferência de gás (SPEECE & RAYYAN 1973; SPEECE & MURFEE 1973; TSANG 1990; SAHOO & LUKETINA 2003).

Tsang (1990) foi um dos pesquisadores que tratou da transferência de gás na dinâmica das plumas. O autor elaborou um modelo para oxigenação hipolímica utilizando plumas de bolhas, que descrevia a dinâmica da pluma de forma macroscópica (hidrodinâmica) e microscopicamente (dinâmica gás/bolha), aplicando princípios fundamentais para relacionar os diversos parâmetros que governam a pluma de bolhas e a transferência de gás.

Este autor utilizou as equações de conservação da massa e conservação da energia para obter as equações de velocidade do jato e vazão de gás. Essa última considera as variações do raio da bolha ao longo da profundidade, que ocorrem devido à mudança da pressão hidrostática e à transferência de gás. Também considerou a equação em que a absorção de gás, através das paredes da bolha, é combinada à expansão isotérmica das bolhas de gás. Essas equações podem ser resolvidas simultaneamente para determinar o coeficiente de entrada turbulenta, a velocidade do jato vertical e o raio da bolha.

Ainda nos estudos de Tsang (1990), foi considerado que o ângulo de expansão da pluma, o número de fluxo de bolhas e a velocidade de ascensão da bolha são constantes, e ainda que a energia cinética e potencial dos fluxos da fase gasosa é negligenciada comparada à da fase líquida, e a concentração ambiente de gás dissolvido permanece constante à medida que a bolha ascende.

O modelo abordado neste estudo utiliza os princípios fundamentais para prever a dinâmica de plumas e transferência de gás para um difusor circular de pluma de bolhas. Nesse modelo, a distribuição de tamanho de bolha inicial e a taxa de formação de bolha são consideradas constantes, a coalescência de bolhas e a transferência de gases que não sejam oxigênio ou nitrogênio são desprezíveis, e se assume que a temperatura da água e do ar são iguais e constantes. Não se considera a transferência de massa na superfície da água.

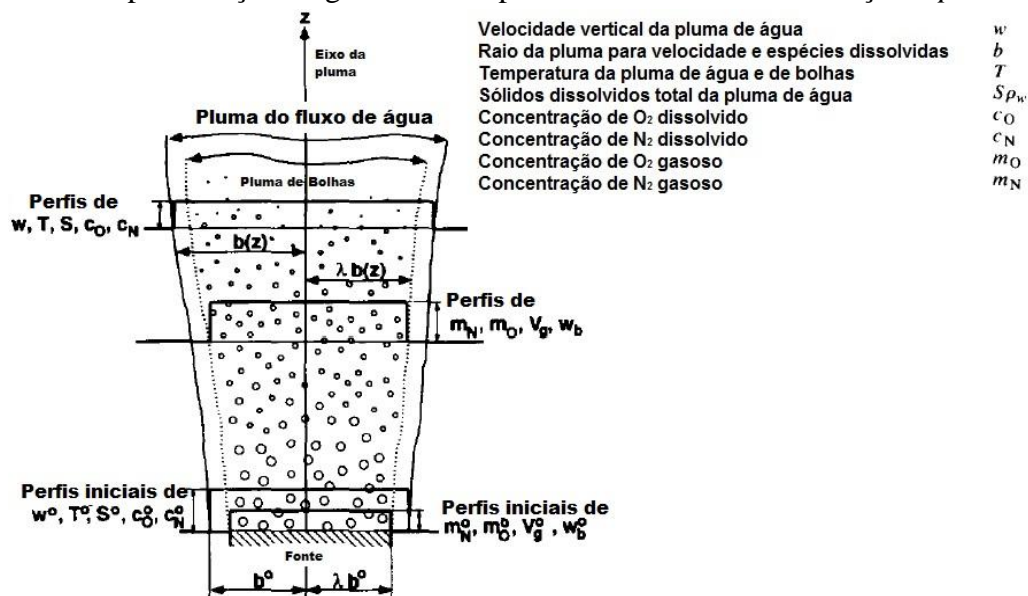
O tamanho da bolha é um parâmetro muito importante, uma vez que está diretamente relacionado à área superficial, à velocidade de ascensão da bolha (HABERMAN & MORTON 1954; CLIFT et al. 1978) e ao coeficiente de transferência de massa (CLIFT et al., 1978; MOTARJEMI & JAMESON 1978). Além disso, o tamanho da bolha pode variar significativamente à medida que as bolhas atravessam o sistema ou ascendem na coluna de água. Esse modelo tem se mostrado muito eficiente para prever a transferência de oxigênio.

A hidrodinâmica da pluma é fortemente influenciada pelo tamanho inicial da bolha e a vazão do gás. A teoria do modelo da pluma é baseada em equações de conservação da massa, quantidade de movimento, calor, salinidade e espécies gasosas integradas horizontalmente (MCDUGALL 1978).

Wüest et al. (1992) desenvolveram esse modelo para uma pluma de bolhas circular que considera as variações volumétricas devido à transferência de gás, bem como a mudança da pressão hidrostática e a temperatura da água. Esse modelo foi aplicado à aeração por ar difuso em um grande tanque vertical (MCGINNIS & LITTLE 1998), em um aerador *airlift* (BURRIS & LITTLE 1998; BURRIS et al. 2002), em um *Speece Cone* ((MCGINNIS & LITTLE 1998), e em difusor linear de pluma de bolhas (LITTLE & MCGINNIS 2001; SINGLETON et al. 2007).

No estudo de Wüest et al. (1992), foi considerada a distribuição *top hat* no modelo, representada pela Figura 2.11. O modelo Gaussiano aplicado nesse trabalho apresenta avanços significativos em relação ao modelo de Wüest et al. (1992), sendo, sobretudo, importante na análise de águas rasas, onde a diferença de velocidade entre o centro e a borda da pluma é bastante acentuada, como observado experimentalmente por Lima Neto et al. (2008b).

Figura 2.11 - Representação da geometria da pluma de bolhas de distribuição *top hat* circular



Fonte: Adaptado de Wüest et al. 1992.

Quando projetados adequadamente, sistemas de oxigenação e aeração hipolímica são capazes de prover oxigênio dissolvido em corpos hídricos, enquanto mantêm a estratificação, caso seja desejado (SINGLETON & LITTLE, 2006). Geralmente, oxigênio puro é utilizado

em *Speece Cone*, ar é usado em aeradores *airlift* e tanto oxigênio como ar são utilizados em difusores de plumas de bolhas. Nesses três equipamentos, bolhas de gás em contato com a água facilitam a transferência interfacial de oxigênio, nitrogênio e outros gases solúveis (MOTARJEMI & JAMESON 1978; SINGLETON & LITTLE 2006).

Os estudos sobre plumas de bolhas foram desenvolvidos e aperfeiçoados ao longo dos anos. A seguir estão apresentados alguns destes estudos em ordem cronológica.

2.3.3. Estudos desenvolvidos na área

Plumas de bolhas de ar induzidas por liberação uniforme de ar na água têm sido bastante estudadas tanto experimentalmente como teoricamente. Pesquisas publicadas revelaram diversas características de escoamento: a distribuição gaussiana de velocidade da pluma e de bolhas, a similaridade dos perfis radiais a diferentes distâncias a partir da fonte, e a entrada turbulenta da água nos arredores.

A similaridade entre uma pluma de bolhas de ar e uma pluma flutuante simples foi, primeiramente, referida por Taylor (1955) numa discussão sobre o uso de ‘diques’ pneumáticos. Bulson (1962) derivou relações semi-empíricas para a velocidade máxima e para a espessura da camada do fluxo superficial horizontal. Sjöberg (1967) e Kobus (1968) estudaram o fluxo induzido por sistemas de bolhas de ar tanto teórico quanto experimentalmente utilizando a similaridade da mistura do jato e da pluma. Esses experimentos foram realizados para plumas de bolhas circulares e distribuição gaussiana.

Pesquisas teóricas seguiram o trabalho inicial de Cederwall & Ditmars (1970). Eles aplicaram a teoria integral da pluma monofásica de Morton et al. (1956) para a pluma de bolha bifásica. A teoria é baseada nas equações de conservação de massa, quantidade de movimento e empuxo integrados horizontalmente e, numa hipótese de entrada turbulenta, em que o volume de água arrastado por unidade de altura é proporcional tanto à velocidade local da pluma quanto à circunferência da pluma, $2\pi b$, em que b é o raio da pluma, com a constante de proporcionalidade sendo o coeficiente de entrada turbulenta, α .

Ambas as teorias, a integral e a de Morton et al. (1956), aproximam a densidade da pluma à do fluido ambiente quando se calcula o fluxo de quantidade de movimento e o fluxo mássico da água. Isso implica que elas contêm erros que aumentam com o aumento da fração

gasosa. Mas, na maioria das aplicações com aeração/oxigenação de lagos e reservatórios, a fração gasosa é pequena (SOCOLOFSKY et al. 2002)

Essas duas teorias se diferenciam pelo fato de que, na teoria de Cederwall & Ditmars (1970), o gás se move mais rapidamente do que o líquido por meio de uma velocidade relativa previamente especificada, e o parâmetro λ foi incluído.

Milgram (1983), que utilizou modelo seguindo distribuição gaussiana, levou em consideração em seu trabalho o efeito do transporte turbulento no interior da pluma e introduziu o fator de amplificação da quantidade de movimento. Segundo seu trabalho, são necessários os valores de quatro parâmetros quando se quer utilizar uma teoria integral de pluma para prever os perfis de velocidade do meio numa pluma de bolhas de qualquer profundidade e vazão de gás: a velocidade relativa entre as bolhas e o jato d'água u_s , a razão entre os raios de espalhamento das regiões ocupadas pelas bolhas e pelo jato líquido vertical λ , o coeficiente de entrada turbulenta α e o fator de amplificação da quantidade de movimento devido à turbulência γ .

Alguns anos depois, Wüest et al. (1992) propuseram novas características para aplicação do modelo, que seguiu distribuição *top hat*, em lagos: diâmetro da fonte finito; velocidade vertical induzida da água no nível do difusor como uma condição inicial; troca de gases entre as bolhas e o líquido na pluma; equações de conservação para gases específicos nas fases dissolvida e gás; composição de gás nas bolhas variável durante a ascensão e perfis ambientais arbitrários para temperatura, salinidade e oxigênio e nitrogênio dissolvidos. Neste trabalho, o efeito da turbulência foi desprezado, portanto, $\gamma = 1$.

Asaeda & Imberger (1993) e Lemckert & Imberger (1993) apresentaram uma série de observações experimentais de laboratório e de campo. Estes trabalhos estavam focados, sobretudo, no estudo da eficiência da destratificação de reservatórios e mostraram que plumas que têm uma camada intermediária e uma camada superficial são mais eficientes na “agitação” do reservatório. Baseados nas observações experimentais, Asaeda & Imberger (1993) definiram modelos distintos para comportamento de plumas bifásicas com estratificação linear.

Lindenschmidt & Hamblin (1997) realizaram um estudo de aeração hipolímica no lago Tegel, Alemanha. Os autores utilizaram nesse trabalho aeradores hipolímicos que se

comportaram como plumas de bolhas, de forma que a recuperação desse lago se apresentou satisfatória.

Também realizando estudos com aeradores hipolímnicos, Burris & Little (1998) caracterizaram o desempenho desse tipo de aerador, levando-se em consideração a transferência de oxigênio e a vazão de água. Esse trabalho não utilizou correlações empíricas para prever esse desempenho. Os modelos foram baseados nos princípios de empuxo, de quantidade de movimento e transferência de massa, que foram calibrados com os dados coletados a partir de um aerador hipolímnico em escala real instalado no lago Prince, Estados Unidos. O trabalho mostrou que a metodologia proposta produziu resultados de acordo com pesquisas experimentais.

Imteaz & Asaeda (2000) desenvolveram um estudo abrangendo mistura artificial num lago por meio de plumas de bolhas e os efeitos das operações de injeção de bolhas no fitoplâncton. Foram realizadas simulações numéricas utilizando o modelo desenvolvido através de dados obtidos no lago Calhoun, Estados Unidos. Foi constatado pelo estudo que é possível otimizar a melhoria da qualidade da água, que foi verificada através da redução de algas por meio da quantificação de clorofila-A, escolhendo-se a vazão e o número adequado de portas do difusor.

Jungo et al. (2001), durante sete anos, realizaram um estudo de mistura artificial utilizando o sistema de plumas de bolhas a fim de reduzir o crescimento da alga *Microcystis* no Lago Nieuwe Meer, que produziu, de modo geral, resultados satisfatórios.

McGinnis & Little (2002) realizaram uma pesquisa cujo objetivo era prever a taxa de transferência de oxigênio em sistemas de bolhas difusas, através do modelo desenvolvido por Wüest et al. (1992), ajustando-se a velocidade de ascensão da bolha e o coeficiente de transferência de massa. Os modelos desenvolvidos mostraram-se eficientes para o design e otimização de sistemas de oxigenação e também para outras aplicações de bolhas difusas.

Buscaglia et al. (2002) apresentaram um estudo em que dois modelos - um baseado na fluidodinâmica computacional (CFD) e outro baseado no modelo proposto por Wüest et al. (1992) (1D) - foram executados em processo de aeração isolado em águas profundas, apresentando resultados satisfatórios.

McGinnis et al. (2004) estudaram a interação entre plumas de bolhas e suas vizinhanças em um lago estratificado na Suíça. Para tal, os autores aplicaram um modelo de plumas de bolhas em regime permanente, usando dados de temperatura, salinidade e oxigênio dissolvido coletados. À medida que o modelo de pluma incorpora algumas hipóteses, ele se torna mais sensível às condições ambientais próximas ao campo. Os modelos se apresentaram em concordância com observações de campo, nos quais foram obtidas condições de contorno apropriadas.

Singleton & Little (2006) trabalharam na validação do modelo de Wüest et al. (1992), realizando testes de transferência de oxigênio em tanques verticais e aplicando, satisfatoriamente, em escala real, a aeradores *airlift* e difusores de plumas de bolhas circulares e lineares. O desempenho de cada sistema foi predito baseado no comportamento de uma bolha individual, e os resultados sugerem que os modelos podem ser usados com confiança para prever o desempenho do sistema.

Um estudo no qual se modelou o comportamento de pluma de efluente e também se injetou oxigênio na tubulação do efluente para aumentar o nível de oxigênio dissolvido do rio, obtendo resultados promissores, foi realizado por Lima Neto et al. (2007), no qual ressalta-se a vantagem de se aproveitar com eficiência o sistema de descarga de esgoto para restauração de rios.

Lima Neto et al. (2008a-d) desenvolveram estudos de injeção vertical e horizontal de ar e mistura gás-líquido em água. Os experimentos permitiram o desenvolvimento de diversas relações para determinar propriedades das bolhas, da água ambiente, padrões de circulação, etc.

Socolofsky et al. (2008) apresentaram um modelo integral generalizado para plumas multifásicas em ambiente estratificado, baseado em uma abordagem de pluma dupla, em que a pluma é composta de uma parte central envolvida por um contra-fluxo de fluido mais denso. Esse modelo é comparado e validado com dados de laboratório e de campo. Em condições não estratificadas, as formulações do modelo apresentam bom desempenho. A metodologia foi aplicada para reservatórios de plumas de bolhas de ar, fornecendo resultados satisfatórios.

Singleton (2008) realizou um estudo de oxigenação no hipolímnio, aperfeiçoando o modelo linear de plumas de bolhas, e coletou dados a partir de um difusor em escala real instalado no reservatório Spring Hollow, Estados Unidos. Os resultados desta pesquisa

sugeriram que a dinâmica da pluma e a transferência de oxigênio podem ser, satisfatoriamente, previstas por plumas de bolhas utilizando o modelo de Wüest et al. (1992).

Gafsi et al. (2009) fizeram estudos comparativos de diferentes sistemas mecânicos de oxigenação utilizados em restauração de lagos e reservatórios. Os resultados demonstraram que o difusor de plumas de bolhas se apresentou como o mais eficiente sistema de aeração hipolímica, mas podendo, entretanto, causar acidentalmente destratificação.

Lima Neto (2012a) desenvolveu um modelo de plumas de bolhas utilizando a teoria integral com uma nova parametrização. O autor propôs novas relações funcionais através de ajustes do modelo para uma variedade de dados experimentais de valores de origem virtual da pluma, coeficiente de entrada turbulenta e fator de amplificação da quantidade de movimento. Nesse mesmo ano, Lima Neto (2012b) apresentou um modelo simples para prever o escoamento do volume do líquido induzido por jatos de bolhas, baseado nas equações de integração clássica para plumas de bolhas, levando em consideração as condições e parâmetros condizentes.

Finalmente, Zhang (2012), dando sequência ao trabalho de Lima Neto et al. (2007), desenvolveu um estudo que visava à injeção de ar/oxigênio para melhorar a qualidade de rios, aumentando os níveis de oxigênio dissolvido por meio de circulação de efluentes, através de difusores multiportas e jatos de bolhas. Foi constatado em seu trabalho que os modelos propostos simulam bem as trajetórias da fase gasosa das plumas e da fase líquida dos jatos no tipo de escoamento testado. Entretanto, não foi avaliada a transferência de oxigênio para a água.

3. METODOLOGIA

Um dos objetivos deste trabalho é avaliar a influência da transferência de massa na hidrodinâmica dos processos de aeração e oxigenação e, para isso, um conjunto de equações foi estruturado de forma sequencial para atingir esse objetivo. Essas equações têm por finalidade determinar o efeito da transferência de massa de plumas de bolhas na hidrodinâmica do processo. Esse conjunto de formulações foi desenvolvido com base nos processos de hidrodinâmica, de transporte de massa, bem como do movimento dos gases no interior de um fluido incompressível.

Nesse estudo, as seguintes considerações foram feitas:

- ℵ não há correntes ambientais;
- ℵ a pluma é totalmente turbulenta;
- ℵ o difusor produz bolhas a taxa constante uniformemente distribuídas;
- ℵ o número de fluxo de bolhas é mantido constante com a altura e é igual ao número de fluxo na fonte (ausência de coalescência ou quebra das bolhas);
- ℵ as bolhas são todas do mesmo tamanho.

A seguir, a composição desta metodologia é apresentada.

3.1. Princípios conservativos

3.1.1. Princípio da Continuidade

As equações de conservação apresentadas neste estudo descrevem a dinâmica da pluma baseada nas leis de conservação de quantidade de movimento, empuxo e massa. Os demais parâmetros foram calculados por suas respectivas equações de estado ou por aproximações empíricas retiradas da literatura e introduzidos no modelo.

O modelo integral baseado na teoria clássica de pluma de bolhas descrita por Socolofsky et al. (2002) foi utilizado, assumindo-se que, perto do difusor, o fluxo se comporta semelhante a plumas simples.

Neste estudo, os cálculos foram realizados assumindo-se condições isotérmicas, assim como em Cederwall & Ditmars (1970). Seguindo o princípio da continuidade, tem-se a Eq. (3.1):

$$Q(z)(H_a + H_d - z) = Q_a H_a \quad (3.1)$$

Em que:

z é a coordenada vertical originando-se no ponto de liberação do gás [m];

$Q(z)$ é a vazão volumétrica de gás no nível z [Nm^3/s];

H_a é a carga de pressão atmosférica [m];

H_d é a carga de pressão na altura da descarga de gás [m];

Q_a é a vazão volumétrica de gás sob pressão atmosférica [Nm^3/s].

No nível da fonte, tem-se a Eq. (3.2), que é o ponto inicial dos cálculos.

$$Q_f = Q_a \frac{H_a}{H_a + H_d} \quad (3.2)$$

Em que:

Q_f é a vazão volumétrica na saída do difusor ($z = 0$) [Nm^3/s].

Neste trabalho, em que se considerou uma fonte pontual em um fluido ambiente homogêneo, foi assumido que a vazão do jato vertical, que é controlado pela entrada turbulenta na borda da pluma, é proporcional à velocidade axial no centro da pluma, e o perfil radial de velocidade e a variação de densidade, descrita através da distribuição da fração gasosa, são semelhantes em todas as alturas e que podem ser aproximados segundo distribuições Gaussianas. As Eqs. (2.1) e (2.2) fornecem os perfis radiais de velocidade do jato vertical e de fração gasosa, respectivamente.

O comportamento da pluma de bolhas pode ser descrito por três equações derivadas dos princípios de conservação de massa e quantidade de movimento, as quais relacionam os parâmetros que estão sendo demonstrados.

A vazão do jato vertical Q_l é dada pela Eq. 3.3.

$$Q_l = \int_0^\infty 2\pi u(1 - \phi) r dr = \pi u_c b^2 \left(1 - \phi_c \frac{\lambda^2}{\lambda^2 + 1}\right) \quad (3.3)$$

Em que:

u_c é a velocidade no centro da pluma [m/s];

ϕ_c é a fração gasosa no centro da pluma [-];

b é o raio da pluma [m];

λ é a razão entre os raios de espalhamento das regiões ocupadas pelas bolhas e pelo jato líquido vertical [-];

r é a distância radial do centro da pluma [m].

A primeira equação que descreve o comportamento representa a conservação de massa líquida (Eq. (3.4)). Portanto, considera-se que a vazão do jato vertical é controlada pelo fluxo de entrada turbulenta nas suas extremidades laterais como mencionado anteriormente. A Eq. (3.5) tem essa forma, pois as diferenças de densidade podem ser negligenciadas na determinação das vazões do jato vertical. Como ϕ_c é muito pequeno, o termo que o acompanha é desprezado no modelo.

$$\frac{dQ_l}{dz} = 2\pi \alpha u_c b \quad (3.4)$$

Em que:

α é o coeficiente de entrada turbulenta [-].

A vazão de gás Q_g é expressa pela Eq. (3.5).

$$Q_g = \int_0^\infty 2\pi (u + u_s) \phi r dr = \frac{\pi \lambda^2 b^2 \phi_c}{\lambda^2 + 1} [u_c + (1 + \lambda^2) u_s] \quad (3.5)$$

Em que:

u_s é a velocidade relativa entre as bolhas e o jato de água [m/s].

A segunda equação diz respeito à conservação de massa gasosa. Assim, considerando expansão das bolhas devido à diminuição da pressão à medida que estas ascendem até a superfície, a vazão de ar, em que também podem ser negligenciadas as diferenças de densidade, pode ser descrita através da Eq. (3.6).

$$Q_g = \frac{Q_a H_a}{H_d - z} \quad (3.6)$$

O fluxo da quantidade de movimento M e o empuxo por unidade de altura da pluma E são dados pelas Eqs. (3.7) e (3.8) respectivamente.

$$M = \int_0^{\infty} 2\pi \gamma [\rho_a u^2 (1 - \phi) + \rho_g \phi (u + u_s)] r dr = \frac{\gamma \pi u_c^2 b^2}{2} \quad (3.7)$$

$$E = \int_0^{\infty} 2\pi \phi (g\Delta\rho) r dr = \frac{\lambda^2 + 1}{u_c + (\lambda^2 + 1)u_s} Q_a g \Delta\rho \quad (3.8)$$

Em que:

γ é o fator de amplificação da quantidade de movimento devido à turbulência [-];

ρ_a é a densidade da água [kg/m³];

ρ_g é a densidade das bolhas de gás [kg/m³];

$\Delta\rho$ é a diferença entre ρ_a e ρ_g [kg/m³];

g é a aceleração da gravidade [m/s²].

O fator de amplificação da quantidade de movimento devido à turbulência, γ , foi adicionado a essa equação, pois, sem ele, desconsidera-se a presença de turbulência. Esse fator foi multiplicado pelo fluxo de quantidade de movimento, permitindo obter o efeito da turbulência. Essa modificação representa um avanço nesse campo de estudo.

Apenas na determinação do empuxo por unidade da pluma, as diferenças de densidade não podem ser desconsideradas. A terceira equação refere-se à conservação de quantidade de movimento (Eq. (3.9)). Logo, considera-se que a variação vertical do fluxo de quantidade de movimento é contrabalanceada pelo empuxo por unidade de altura da pluma.

$$\frac{dM}{dz} = E \quad (3.9)$$

Combinando as Eqs. (3.7) a (3.9), obtêm-se as equações de conservação de volume do líquido, Eq. (2.3), e de quantidade de movimento, Eq. (2.4). As Eqs. (2.3) e (2.4) devem ser resolvidas para se obter os valores da velocidade do jato vertical no centro da pluma e o raio da pluma em função de sua altura. Integração numérica foi o método utilizado para solucioná-las, a partir das Eqs. (3.10) e (3.11), pois elas governam o movimento da pluma e são modificações das equações propostas por Cederwall & Ditmars (1970).

$$\frac{du_c}{dz} = \frac{2gQ_aH_a}{\gamma\pi u_c b^2(H_a + H_d - z) \left(\frac{u_c}{1 + \lambda^2} + u_s \right)} - \frac{2\alpha u_c}{b} \quad (3.10)$$

$$\frac{db}{dz} = 2\alpha - \frac{gQ_aH_a}{\gamma\pi u_c^2 b(H_a + H_d - z) \left(\frac{u_c}{1 + \lambda^2} + u_s \right)} \quad (3.11)$$

Segundo Socolofsky et al. (2002), considera-se que próximo ao difusor, o fluxo se comporta semelhante a plumas simples guiado apenas pelo empuxo. Desse modo, as Eqs. (3.10) e (3.11) tornam-se:

$$\frac{du_c}{dz} = \frac{2gQ_aH_a}{\gamma\pi u_c^2 b^2(H_a + H_d - z)} - \frac{2\alpha u_c}{b} \quad (3.12)$$

$$\frac{db}{dz} = 2\alpha - \frac{gQ_aH_a}{\gamma\pi u_c^3 b(H_a + H_d - z)} \quad (3.13)$$

A solução das Eqs. (3.12) e (3.13) fornece as seguintes condições iniciais que são dadas pelas Eqs. (3.14) e (3.15):

$$u_{c,0} = \left[\frac{25Q_aH_a(1 + \lambda^2)}{24\alpha^2\pi(H_a + H_d)z_0} \right]^{1/3} \quad (3.14)$$

$$b_0 = \frac{6}{5}\alpha z_0 \quad (3.15)$$

Em que:

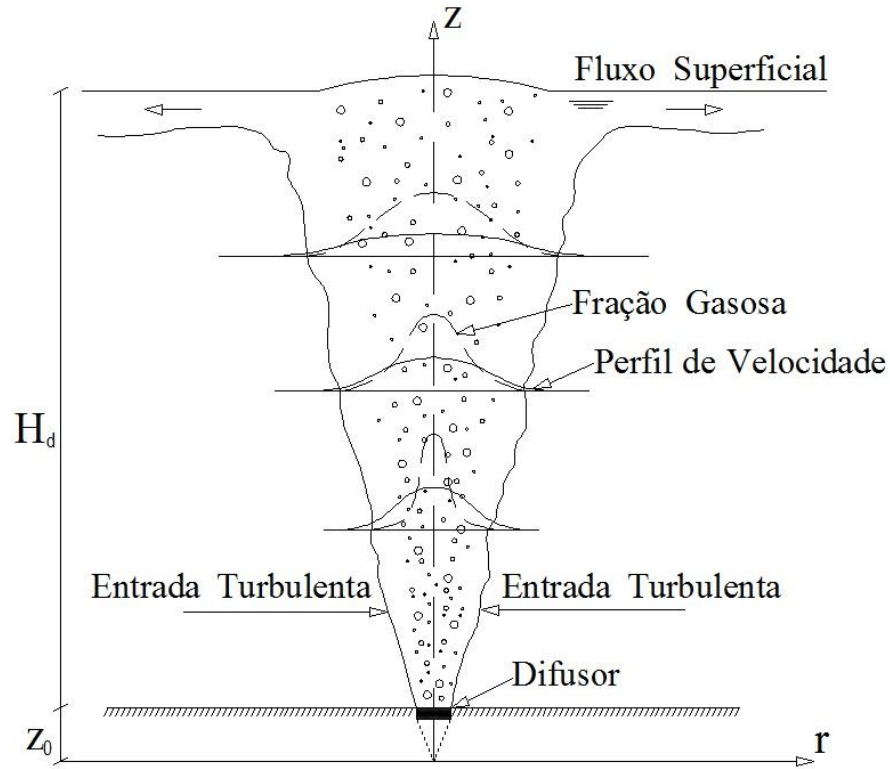
$u_{c,0}$ é a velocidade do jato no centro nas condições iniciais [m/s];

b_0 é o raio da pluma nas condições iniciais (na fonte) [m];

z_0 é a origem virtual da pluma (também chamada de origem matemática) [m].

A origem virtual da pluma, z_0 , pode ser observada na Figura 3.1 e pode ser calculada como demonstrado posteriormente pela Eq. (3.16).

Figura 3.1 - Esquema de uma pluma de bolha



Fonte: Elaborada pelo autor, 2014.

$$z_0 = \delta \left(\frac{Q_f^2}{g} \right)^{1/5} \quad (3.16)$$

Em que:

δ é uma constante ajustada por testes [-].

A origem virtual da pluma, z_0 , foi obtida ajustando retas aos dados de raio da pluma, b , como função da distância.

Segundo Lima Neto (2012a), em razão das forças causadas pela quantidade de movimento e empuxo, o coeficiente de entrada turbulenta (α) e o fator de amplificação da quantidade de movimento devido à turbulência (γ) são descritos pela análise dimensional dada pela Eq. (3.17).

$$[\alpha, \gamma] = f(\beta) \quad (3.18)$$

Em que:

β é um parâmetro adimensional [-].

Este parâmetro é definido pela Eq. (3.18).

$$\beta = \frac{g' \times Q_a}{H_d \times u_s^3} \quad (3.18)$$

Em que:

g' é a aceleração da gravidade aparente [m/s²].

Sabendo-se que:

$$g' = g \left(\frac{\rho_a - \rho_g}{\rho_a} \right) \quad (3.19)$$

As equações dos coeficientes α e γ , Eqs. (3.20) e (3.21), respectivamente, foram obtidas por meio de ajustes do modelo matemático, realizado por Lima Neto (2012a) utilizando as mesmas condições de operação dos testes experimentais. Enquanto os valores de α aumentam com o aumento dos valores de β , os valores de γ diminuem.

$$\alpha = 0,0148 \ln \beta + 0,101 \quad (3.20)$$

$$\gamma = 1,118 \beta^{-0,181} \quad (3.21)$$

Quando os valores de β superam 2,0, obtém-se $\gamma < 1,0$. No entanto, adota-se $\gamma = 1,0$, inferindo que o fluxo de quantidade de movimento causado pela turbulência é desprezível, como esperado em plumas de bolhas de grande escala (MILGRAM 1983; WÜEST ET AL. 1992). Em contrapartida, para valores de β menores que 1,0 (a maioria das situações testadas no presente estudo), a turbulência não pode ser negligenciada, o que é mostrado mediante os valores de γ variarem de 1,2 a 1,8 nas simulações deste trabalho, apresentando, assim, um diferencial do presente estudo em relação a outros disponíveis na literatura. Desse modo, tem-se que a Eq. (3.21) só é válida para $0 < \beta < 2$, uma vez que $\gamma = 1,0$ para $\beta > 2$.

A Eq. 3.20 indica que, para um dado valor de g' , quanto maior for o valor de β , maior é o valor da velocidade no centro da pluma. Por outro lado, a Eq. 3.21 mostra que valores mais elevados de β resultam em menores efeitos da turbulência, uma vez que é esperado que o fluxo da quantidade de movimento causado pela turbulência diminua à medida que a velocidade relativa e o tamanho das bolhas diminuem e a vazão de gás aumenta (LEITCH & BAINES 1989).

As equações de condições iniciais, Eqs. (3.14) e (3.15), foram obtidas através das simplificações das equações de $\frac{du_c}{dz}$ e $\frac{db}{dz}$, Eqs. (3.10) e (3.11), respectivamente, para $z = 0$, em que $u_c \gg u_b$. Uma vez simplificadas, as equações são resolvidas, chegando-se às condições iniciais demonstradas anteriormente para a integração numérica.

3.1.2. Transferência de massa

McGinnis & Little (2002) verificaram que este modelo, aplicado em bolhas individuais ascendendo num volume de água bem misturado, é válido para processos em reator ou plumas “top hat”. O fluxo mássico das espécies gasosas através da superfície da bolha é dado pela Eq. (3.22).

$$J = K_L(C_{s_i} - C_i) \quad (3.22)$$

Em que:

J é o fluxo de gás [mol/m²s];

K_L é o coeficiente de transferência de massa em um sistema gás-líquido [m/s];

C_{s_i} é a concentração de saturação da espécie i na água [mol/m³];

C_i é a concentração da espécie i no jato vertical [mol/m³].

A localização vertical da bolha está relacionada à velocidade relativa, u_s , e à velocidade do jato vertical, u_c , demonstrada na Eq. (3.23) fornecida por McGinnis & Little (2002).

$$\frac{dz}{dt} = u_c + u_s \quad (3.23)$$

Entretanto, o modelo proposto neste trabalho apresenta uma alteração em relação ao modelo proposto por McGinnis & Little (2002). Os modelos diferem de acordo com as Eq. (3.23) e (3.24), em que a primeira corresponde ao modelo de McGinnis & Little (2002), e a segunda, ao modelo proposto neste estudo.

$$\frac{dz}{dt} = \frac{u_c}{1 + \lambda^2} + u_s \quad (3.24)$$

A Eq. (3.24) corresponde à velocidade média de ascensão das bolhas, e a Eq. (3.23), à velocidade de uma bolha no centro da pluma. Isso foi considerado, pois McGinnis & Little

(2002) utilizaram um reator de mistura completa em que u_c foi considerado uniforme e desprezado por apresentar valores muito baixos. No presente trabalho, u_c não foi considerado uniforme, uma vez que varia de u_c (no centro) a $0,37 \times u_c$ (na borda da pluma, λb), de modo que diminui assintoticamente à medida que λb aumenta. Além disso, valores bastante elevados para u_c podem ser obtidos em plumas jatos de bolhas, conforme observado por Lima Neto et al. (2008a, b, c).

A partir da Eq. (3.22), substituindo a área superficial de uma bolha, obtém-se a Eq. (3.2), que fornece a taxa de transferência de massa de uma bolha.

$$\frac{dn}{dt} = -K_L(C_{s_i} - C_i)4\pi\left(\frac{d_b}{2}\right)^2 \quad (3.25)$$

Em que:

n é a massa da espécie i (oxigênio ou nitrogênio) [mol];

d_b é o diâmetro médio das bolhas no difusor [m].

Acrescentando o termo de área superficial e combinando as Eq. (3.24) e (3.25), tem-se a Eq. (3.26), que fornece a quantidade de massa da espécie gasosa transferida por bolha por unidade de altura da pluma.

$$\frac{dn}{dz} = -K_L(C_{s_i} - C) \times \frac{4\pi\left(\frac{d_b}{2}\right)^2}{\left(\frac{u_c}{1+\lambda^2} + u_s\right)} \quad (3.26)$$

Na equação diferencial da transferência de massa desse modelo (Eq. (3.25)), $u_c + u_s$ foi substituído por $\frac{u_c}{1+\lambda^2} + u_s$, em que o primeiro termo representa a velocidade líquida devido à velocidade do jato vertical, e o segundo, a velocidade relativa (CLIFT et al. 1978; WÜEST et al. 1992; LEIFER & PATRO 2002). Para as plumas de bolhas, u_c varia à medida que varia a altura devido à entrada turbulenta, sendo modelada separadamente por equações de movimento. Desse modo, o modelo é, geralmente, resolvido por um sistema de equações para hidrodinâmica e transferência de gás.

Em razão da concentração da fase aquosa variar muito devagar, assume-se o estado pseudo-estacionário. Vasconcelos et al. 2003 e Alves et al. 2005 relataram que contaminação da bolha pode afetar a transferência de massa e a velocidade de ascensão da bolha.

Portanto, a Eq. (3.26) referente à transferência de massa para cada espécie é reescrita da seguinte forma:

$$\left(\frac{dn}{dz}\right)_i = -K_L(C_{s_i} - C_i) \times \frac{4\pi \left(\frac{d_b}{2}\right)^2}{\left(\frac{u_c}{1 + \lambda^2} + u_s\right)} \quad (3.27)$$

Para calcular a concentração de saturação, a Lei de Henry foi usada, como mostra a Eq. (3.28).

$$C_{s_i} = HP_i \quad (3.28)$$

H é a constante de Henry [mol/(m³bar)];

P_i é a pressão parcial da espécie i [bar].

Para se determinar K_L , H e u_s foram utilizadas as equações de correlação apresentadas por Wüest et al. (1992).

Tabela 3.1 - Equações de correlação

Equações de correlação	Domínio de Validade
$K_L = 0,6r$	$r < 6,67 \times 10^{-4}m$
$K_L = 4 \times 10^{-4}$	$r \geq 6,67 \times 10^{-4}m$
$H_O = 2,125 - 5,021 \times 10^{-2}T + 5,77 \times 10^{-4}T^2$	
$H_N = 1,042 - 2,450 \times 10^{-2}T + 3,171 \times 10^{-4}T^2$	
$u_s = 4474r_b^{1,357}$	$r_b < 7,0 \times 10^{-4}$
$u_s = 0,23$	$7,0 \times 10^{-4} \leq r_b < 5,1 \times 10^{-3}$
$u_s = 4,202r_b^{0,547}$	$r_b \geq 5,1 \times 10^{-3}$

Fonte: Wüest et al. (1992)

Em que:

r_b é o raio da bolha [m];

T é a temperatura [°C].

Para calcular P_i , primeiramente, foi utilizada a Eq. (3.29) referente à pressão total.

$$P_{tot} = P_{atm} + 10^{-5}\rho_a g z \quad (3.29)$$

Em que:

P_{tot} é a pressão total [bar];

P_{atm} é a pressão atmosférica [bar].

Como o processo envolve liberação de oxigênio e nitrogênio ou apenas de oxigênio, a pressão parcial será dada pela Eq. (3.30).

$$P_i = \left(\frac{C_i}{C_{O_2} + C_{N_2}} \right) P_{tot} \quad (3.30)$$

Em que:

C_i é a concentração do componente (oxigênio ou nitrogênio) no jato vertical [mol/m³];

C_{O_2} é a concentração de oxigênio no jato vertical [mol/m³];

C_{N_2} é a concentração de nitrogênio no jato vertical [mol/m³].

3.2. Processo de cálculo

As simulações foram realizadas em duas partes. A primeira parte contém cálculos referentes apenas à hidrodinâmica. Na segunda, os cálculos apresentam o efeito da transferência de massa.

3.2.1. Parte I - Hidrodinâmica

Os valores iniciais de velocidade e de raio da pluma, $u_{c,0}$ e b_0 , fornecidos pelas Eqs. (3.14) e (3.15), são utilizados para dar início aos cálculos, fornecendo os primeiros resultados de $\frac{du_c}{dz}$ e $\frac{db}{dz}$ (Eqs. (3.10) e (3.11)). A partir desses valores iniciais, o próximo valor de velocidade, u_c , pode ser calculado usando o método de integração de Euler através da Eq. (3.31):

$$u_{c,n} = u_{c,n-1} + \left(\frac{du_c}{dz} \right)_{n-1} (z_n - z_{n-1}) \quad (3.31)$$

Em que:

$u_{c,n-1}$ é a velocidade equivalente a $u_{c,0}$ (no início) e o valor calculado na etapa anterior à etapa n [m/s];

$u_{c,n}$ é a velocidade no ponto de estudo [m/s];

z_{n-1} é a profundidade no ponto anterior [m];

z_n é a profundidade no ponto de estudo [m].

O mesmo é realizado para determinar o próximo valor do raio da pluma,.

$$b_n = b_{n-1} + \left(\frac{db}{dz}\right)_n (z_n - z_{n-1}) \quad (3.32)$$

Em que:

b_{n-1} é o raio da pluma equivalente a b_0 (no início) e o valor calculado na etapa anterior à etapa n [m];

b_n é o raio da pluma no ponto de estudo [m].

Para obter os demais valores de u_c e de b , é bastante seguir sucessivamente o procedimento descrito até o último ponto de interesse, que é equivalente à altura entre a saída do difusor e a superfície. Ressalta-se, porém, a necessidade de se utilizar passos pequenos para evitar instabilidade dos resultados simulados.

3.2.2. Parte II - Hidrodinâmica + Transferência de massa

Nessa etapa da simulação, calcula-se, primeiramente, a massa presente no início do processo pela Eq. (3.33):

$$m_1 = V_{b,0} \times \rho_g \quad (3.33)$$

Em que:

m_1 é a massa de gás no difusor [kg];

$V_{b,0}$ é o volume da bolha na saída do difusor [m³].

Para obter o valor de $V_{b,0}$, a Eq. (3.34) é utilizada:

$$V_{b,0} = \frac{4}{3}\pi \left(\frac{d_{b,0}}{2}\right)^3 \quad (3.34)$$

Em que:

$d_{b,0}$ é o diâmetro inicial da bolha [m];

O passo seguinte é calcular uma nova vazão chamada Q_n .

$$Q_n = V_{b,0} \times N \quad (3.35)$$

Em que:

Q_n é a vazão levando em conta a transferência de massa [Nm^3/s];

N é o número de fluxo de bolhas formadas no difusor por unidade de tempo [s^{-1}].

N é calculado pela razão entre a vazão volumétrica de gás no difusor e o volume inicial da bolha, dado pela Eq. (3.36).

$$N = \frac{Q_a H_a}{(H_a + H_d) V_{b,0}} \quad (3.36)$$

Posteriormente, repete-se a etapa de hidrodinâmica para obter os valores de u_c e b , porém com as equações modificadas, Eqs. (3.37) e (3.38), que podem ser observadas a seguir. Essas modificações permitem inserir o efeito da transferência de massa na hidrodinâmica do modelo.

$$\frac{du_c}{dz} = \frac{2gQ_n}{\gamma\pi u_c b^2 \left(\frac{u_c}{1 + \lambda^2} + u_s \right)} - \frac{2\alpha u_c}{b} \quad (3.37)$$

$$\frac{db}{dz} = 2\alpha - \frac{gQ_n}{\gamma\pi u_c^2 b \left(\frac{u_c}{1 + \lambda^2} + u_s \right)} \quad (3.38)$$

Em seguida, o coeficiente de transferência de massa, K_L , é calculado e, posteriormente, a pressão parcial, P_i .

$$P_i = \left(\frac{C_i}{C_{O_2} + C_{N_2}} \right) (P_{atm} + 10^{-5} \rho_a g z) \quad (3.39)$$

Uma vez que se tem o valor de db inicial e o valor de u_c calculados na etapa anterior, pode-se calcular $\frac{dn}{dz}$.

$$\left(\frac{dn}{dz} \right)_i = -K_L (HP_i - C_i) \times \frac{4\pi \left(\frac{db}{2} \right)^2}{\left(\frac{u_c}{1 + \lambda^2} + u_s \right)} \quad (3.40)$$

A partir, portanto, da Eq. (3.40), é possível calcular a quantidade em mol que foi transferida pela Eq. (3.41).

$$n_n = \left(\frac{dn}{dz} \right)_n (z_n - z_{n-1}) \quad (3.41)$$

Em que:

n_n é a massa no ponto de estudo [mol].

Após isso, converte-se o valor da massa em mol para kg da seguinte forma a fim de se encontrar o próximo valor referente à massa.

$$m_n = m_{n-1} + n \times \left(\sum MM_i \times c \right) \quad (3.42)$$

Em que:

m_{n-1} é a massa no ponto anterior do estudo [kg];

m_n é a massa no próximo ponto do estudo [kg];

MM_i é a massa molar da espécie (oxigênio ou nitrogênio) [kg/mol];

c é a porcentagem do componente i [-].

Para dar sequência ao cálculo, o volume da bolha é novamente calculado, passando-se a utilizar, a partir desse ponto, a Eq. (3.43).

$$V_b = \frac{m}{\rho_g} \left(\frac{H_a + H_d}{H_a + H_d - z} \right) \quad (3.43)$$

m é a massa de gás [kg].

Novamente, a vazão Q_n é calculada com o novo valor de V_b .

$$Q_n = V_b \times N \quad (3.44)$$

Posteriormente, o diâmetro da bolha é recalculado, já que ele não permanece constante ao longo do processo de ascensão da bolha.

$$d_{b,n} = 2 \left(\frac{3V_b}{4\pi} \right)^{1/3} \quad (3.45)$$

Em que:

$d_{b,n}$ é o diâmetro no ponto de estudo [m].

De posse desses valores, podem-se calcular os novos valores de u_c e b e, desse modo, reiniciam-se os cálculos até o valor equivalente à carga H_d .

3.3. Simulação do Processo

Os cálculos foram executados para diversas situações, variando-se a profundidade do reservatório, o diâmetro do difusor, a vazão de ar sob pressão atmosférica e a concentração do jato vertical. Foram realizadas simulações nas seguintes condições:

$$10 \text{ m} \leq H_d \leq 100 \text{ m}$$

$$0,1 \text{ mm} \leq d_{b,0} \leq 40 \text{ mm}$$

$$10 \text{ L/min} \leq Q_a \leq 35400 \text{ L/min}$$

$$0 \leq C \leq 5 \text{ mol/m}^3$$

No entanto, apenas alguns resultados são apresentados neste trabalho, descrevendo bem o comportamento nas diferentes situações. As tabelas 3.2, 3.3 e 3.4 apresentam as condições cujos resultados são apresentados.

Tabela 3.2 - Profundidade do reservatório

H_d (m)	25	50	100
-----------	----	----	-----

Fonte: Elaborada pelo autor.

Tabela 3.3 - Diâmetro inicial do difusor

$d_{b,0}$ (mm)	2	5	10
----------------	---	---	----

Fonte: Elaborada pelo Autor.

Tabela 3.4 - Vazão de saída de ar do difusor

Q_a (L/min)	50	150	450
---------------	----	-----	-----

Fonte: Elaborada pelo autor.

As simulações foram realizadas com passo de 0,0001 m para z até 3 m para evitar instabilidade numérica. Posteriormente, o passo foi alterado para 0,1 m. O valor de passo de 0,0001 m foi o mais conveniente para o objetivo proposto, visto que um passo menor tornaria o cálculo inviável em razão da enorme quantidade de dados a serem calculados.

A Tabela 3.5 apresenta os valores utilizados para a realização dessas simulações.

Tabela 3.5 - Valores utilizados nas simulações

g (m/s ²)	H_o (m)	P_{atm} (bar)	T (°C)
9,813	10,33	1,01325	20
ρ_a (kg/m ³)	ρ_{O_2} (kg/m ³)	ρ_{N_2} (kg/m ³)	λ
1000	1,33	1,165	0,8
MM_{O_2} (g/mol)	MM_{NO_2} (g/mol)	δ	
32	28	9,7	

Fonte: Elaborada pelo autor.

O valor de λ foi o mesmo assumido em Milgram (1983). Lima Neto (2012a) obteve o valor para δ , ajustando o modelo aos dados experimentais.

3.4. Estudo de caso

Devido à larga aplicabilidade de oxigenação e aeração, foram realizados dois estudos de caso envolvendo cada um respectivamente.

3.4.1. Aeração

Neste estudo, considerou-se o açude Acarape do Meio localizado no estado do Ceará. Com o objetivo de se escolher uma configuração adequada para um sistema de aeração a fim de melhorar a qualidade desse corpo d'água e realizar a circulação da água, calculou-se a eficiência de transferência de oxigênio padrão (do inglês, SOTE), que é dada pela razão entre a quantidade de oxigênio transferida para a água e a quantidade total injetada, e a vazão de circulação (Q_{circ}), utilizando diversos diâmetros e vazões de saída do difusor como parâmetros de decisão dessa configuração. A vazão de circulação foi calculada através da Eq. (3.3) desconsiderando-se a fração gasosa no centro da pluma.

3.4.2. Oxigenação

Para este estudo de caso, tomou-se o açude Orós também localizado no estado do Ceará considerando uma situação de não conformidade com as condições e padrões estabelecidos pela Resolução CONAMA nº 357/2005 para águas doces de classe II, nas quais se deve observar que o oxigênio dissolvido, em qualquer amostra, não se apresente inferior a 5mg/L. Este estudo de caso visa à determinação das configurações adequadas para que não ocorra a ressobilização do fósforo devido aos baixos teores de oxigênio dissolvido nesse açude.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Com a finalidade de se realizar um estudo da influência da transferência de massa (TM) na hidrodinâmica, foi implementado um modelo matemático descrito pelas Eqs. (3.11), (3.12) e (3.27), que tornou essa análise apta a verificar o efeito da TM sob diferentes vazões de saída do difusor, profundidades e diâmetro inicial de bolhas.

Em seguida, foram realizados dois estudos de caso de recuperação de dois açudes localizados no estado do Ceará por meio de aeração e oxigenação no hipolímnio para se verificar a aplicabilidade desse estudo, fornecendo uma configuração adequada para a sua realização em cada caso.

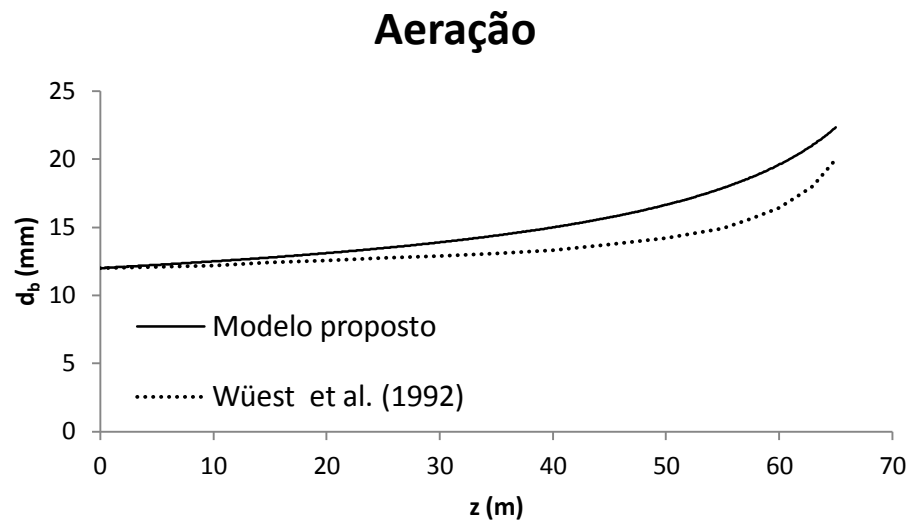
4.1. Validação do modelo

O modelo desenvolvido neste estudo foi utilizado para realizar diversas simulações, cujos resultados são apresentados neste trabalho. Para a validação do modelo, foram utilizados os trabalhos realizados por Wüest et al. (1992), que desenvolveram estudos de aeração e oxigenação de um lago na Suíça altamente eutrofizado, e por Buscaglia et al. (2002), que, partindo do modelo de Wüest et al. (1992), implementaram novos conceitos e formularam um modelo para a fluidodinâmica computacional (CFD) para processos de aeração. Ressalta-se que os modelos supracitados foram validados com dados de campo.

4.1.1. Wüest et al. 1992 - Aeração

As Figuras 4.1 e 4.2 apresentam uma comparação com o modelo desenvolvido neste estudo e o modelo proposto por Wüest et al. (1992) para aeração e oxigenação respectivamente.

Figura 4.1 - Comparação do diâmetro das bolhas do presente modelo e do modelo apresentado por Wüest et al. (1992) para o processo de aeração nas condições fornecidas na Tabela 4.1



Fonte: Elaborada pelo autor.

As condições em que os resultados para aeração foram gerados são mostradas na Tabela 4.1. A Figura 4.1 sugere que o modelo proposto é apropriado para descrever o processo de aeração, uma vez que ele apresenta um desvio máximo em relação ao comparado (WÜEST et al. 1992) de 19%, o que fornece significativa confiabilidade para o modelo.

Tabela 4.1 - Dados utilizados por Wüest et al. (1992) para o processo de aeração

Parâmetro	Valor utilizado em Wüest et al. (1992)
Profundidade do lago (m)	65
Vazão de entrada de O_2 (Nm^3/s)	0,014
Diâmetro inicial da bolha (m)	0,012
Porcentagem de O_2 (%)	21
Porcentagem de N_2 (%)	79

Fonte: Elaborada pelo autor.

No modelo de Wüest et al. (1992), foram adotados os valores de 0,11 e 1 para o coeficiente de entrada turbulenta (α) e o fator de amplificação da quantidade de movimento (γ) respectivamente. Por outro lado, no modelo a ser validado, esses parâmetros foram calculados pelas Eqs. (3.21) e (3.22).

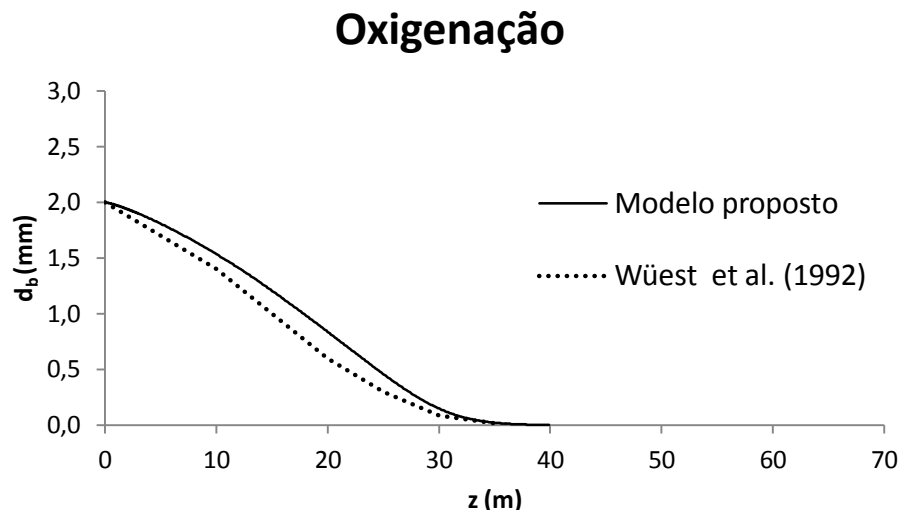
Verifica-se que o modelo proposto apresenta tendência semelhante à do trabalho de Wüest et al. (1992), em que se observa uma pequena discrepância causada pelo diferente tipo de distribuição adotada. Neste trabalho, foi utilizada a distribuição gaussiana, enquanto Wüest et al. (1992) utilizaram a distribuição *top hat*, conferindo diferentes comportamentos aos modelos. Esse desvio também é causado por conta das diferentes condições iniciais e relações

matemáticas empregadas em cada um dos modelos, diferentes parâmetros e métodos de calculá-los. Embora os modelos apresentem considerações distintas, o modelo em estudo apresentou considerável similaridade com o modelo de Wüest et al. (1992).

4.1.2. Wüest et al. 1992 - Oxigenação

Para o caso de oxigenação, o desvio máximo constatado (Figura 4.2) é considerado pequeno para os parâmetros de engenharia, uma vez que esse valor é de 14%. Pode-se também observar através da Figura 4.2 que ocorre dissolução completa próximo a 40 m de profundidade em ambos os modelos. Considerando a semelhança dos resultados, pode-se concluir que, para esse cenário de simulação, o modelo comportou-se satisfatoriamente. Na Tabela 4.2, são apresentadas as condições utilizadas na simulação para oxigenação.

Figura 4.2 - Comparação do diâmetro das bolhas do presente modelo e do modelo apresentado por Wüest et al. (1992) para o processo de oxigenação nas condições fornecidas na Tabela 4.2



Fonte: Elaborada pelo autor.

Tabela 4.2 - Dados utilizados por Wüest et al. (1992) para o processo de oxigenação

Parâmetro	Valor utilizado em Wüest et al. (1992)
Profundidade do lago (m)	65
Vazão de entrada de O_2 (Nm^3/s)	0,0062
Diâmetro inicial da bolha (m)	0,002
Porcentagem de O_2 (%)	100

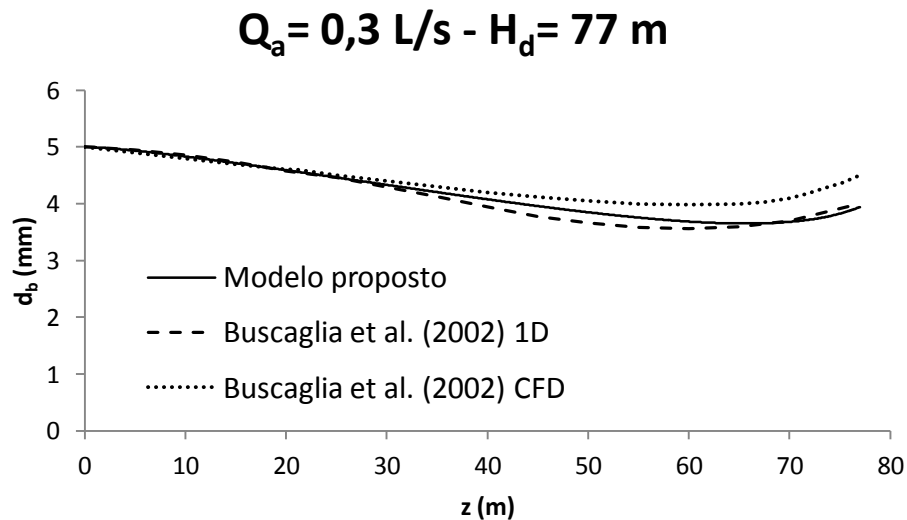
Fonte: Elaborada pelo autor.

O modelo proposto por Wüest et al. (1992) pode vir a ser considerado menos adequado por desconsiderar os efeitos da turbulência em seus cálculos, expressos através da contribuição do parâmetro (γ).

4.1.3. Buscaglia et al. 2002 - Aeração

Buscaglia et al. (2002) realizaram uma comparação entre um modelo integral (1D) baseado em Wüest et al. (1992) e um modelo baseado na dinâmica dos fluidos computacional (CFD). A Figura 4.3 apresenta a comparação do modelo proposto neste trabalho e esses modelos utilizando os dados de simulação presentes na Tabela 4.3.

Figura 4.3 - Comparação do diâmetro das bolhas do presente modelo e do modelo apresentado por Buscaglia et al. (2002) para o processo de aeração nas condições fornecidas na Tabela 4.3



Fonte: Elaborada pelo autor.

Tabela 4.3 - Dados utilizados por Buscaglia et al. (2002) para o processo de aeração à vazão de 0,3 L/s

Parâmetro	Valor utilizado em Buscaglia et al. (2002)
Profundidade do lago (m)	77
Vazão de entrada de O_2 (L/s)	0,3
Diâmetro inicial da bolha (m)	0,005
Porcentagem de O_2 (%)	21
Porcentagem de N_2 (%)	79

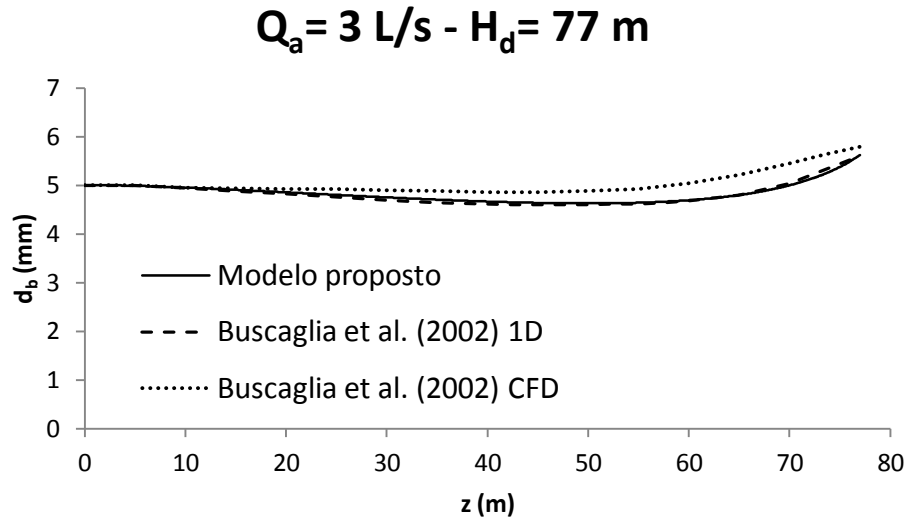
Fonte: Elaborada pelo autor.

A Figura 4.3 permite observar que o modelo proposto apresenta uma tendência semelhante à de ambos os modelos mostrados. Os diâmetros descritos pelo CFD são maiores do que pelo 1D em razão das discrepâncias entre os dois modelos e, segundo Buscaglia et al. (2002), essa diferença não passa de 10% para os casos analisados.

A Figura 4.4 apresenta simulações para as mesmas condições presentes na Tabela 4.3, apenas considerando uma vazão diferente, como observado na Tabela 4.4. Os resultados

mostram que o modelo proposto ainda apresenta uma aproximação aceitável dos modelos utilizados por Buscaglia et al. (2002).

Figura 4.4 - Comparação do diâmetro das bolhas do presente modelo e do modelo apresentado por Buscaglia et al. (2002) para o processo de aeração nas condições fornecidas na Tabela 4.4



Fonte: Elaborada pelo autor.

Tabela 4.4 - Dados utilizados por Buscaglia et al. (2002) para o processo de aeração à vazão de 3,0 L/s

Parâmetro	Valor utilizado em Buscaglia et al. (2002)
Profundidade do lago (m)	77
Vazão de entrada de O_2 (L/s)	3,0
Diâmetro inicial da bolha (m)	0,005
Porcentagem de O_2 (%)	21
Porcentagem de N_2 (%)	79

Fonte: Elaborada pelo autor.

Comparando-se as Figuras 4.3 e 4.4, verifica-se que, em ambas, o modelo proposto representa bem o processo de aeração, com grau de confiabilidade satisfatório. Como o modelo proposto, em geral, se encontra numa posição intermediária em relação aos modelos sugeridos por Buscaglia et al. (2002), conclui-se que ele apresenta desvios inferiores a 10%, constatando-se, portanto, que ele possui considerável confiabilidade por apresentar baixos percentuais de desvios.

4.2. Efeito da transferência de massa na hidrodinâmica do modelo para processos de aeração

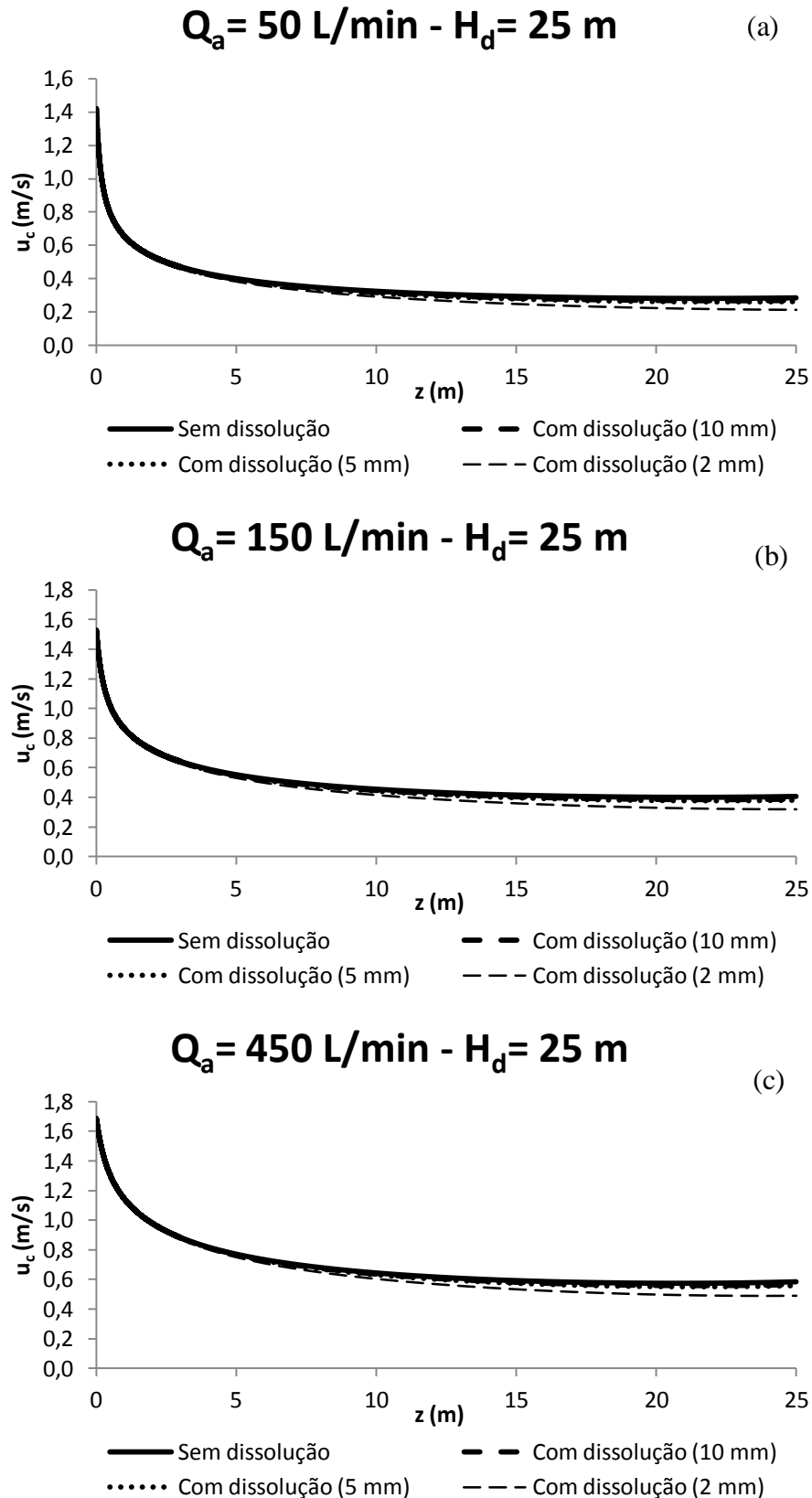
Para se obter melhor compreensão do comportamento de plumas de bolhas, foi realizada uma série de simulações para se avaliar a influência da transferência de massa na hidrodinâmica do processo de aeração.

4.2.1. Análise para a velocidade no centro da pluma

Para desenvolver esta análise, foram executadas simulações para três vazões de saída do difusor (Q_a), três diâmetros iniciais de bolha (db) e três profundidades de corpo hídrico (H_d), calculadas por um modelo sem TM e por um modelo incluindo parâmetros de TM. Os resultados foram registrados em forma de gráficos, que são apresentados posteriormente. Estes gráficos apresentam a velocidade no centro da pluma vertical (u_c) em função da profundidade.

Analisando as Figuras 4.5(a-c), observa-se o efeito de diferentes vazões na velocidade no centro da pluma, para a profundidade de 25 m, tomando como base os diâmetros de bolha de 2 mm, 5 mm e 10 mm. Essas figuras mostram que quanto maior a vazão de saída do difusor, maior será a velocidade no centro da pluma.

Figura 4.5 - Comparação da velocidade no centro da pluma com e sem dissolução para corpo d'água de 25 m de profundidade e (a) $Q_a = 50$ L/min, (b) $Q_a = 150$ L/min e (c) $Q_a = 450$ L/min



Fonte: Elaboradas pelo autor.

Para a vazão de 50 L/min, bolhas grossas apresentaram desvio máximo em relação à curva “Sem dissolução” de 5,0%, bolhas médias, 7,4% e bolhas finas, 25,1%. Ao se manter a profundidade e a vazão, observa-se que o desvio tende a ser maior em menores diâmetros iniciais da bolha (Tabela 4.5). Portanto, verifica-se que, para uma mesma vazão e uma mesma profundidade, o efeito da TM na velocidade no centro da pluma é maior à medida que o diâmetro inicial da bolha diminui.

Tabela 4.5 - Desvios em relação à curva “Sem dissolução” calculados para a velocidade no centro da pluma em corpos hídricos de 25 m

Profundidade 25 m		Diâmetro inicial de bolha		
		10 mm	5 mm	2 mm
Vazão de saída do difusor	50 L/min	5,0%	7,4%	25,1%
	150 L/min	4,2%	6,0%	20,7%
	450 L/min	3,4%	4,7%	16,4%

Fonte: Elaborada pelo autor.

Analisando ainda a Tabela 4.5, tomando como exemplo bolhas de diâmetro inicial 5 mm (bolhas médias), tem-se 7,4% de desvio máximo para vazão de 50 L/min, 6,0% para vazão de 150 L/min e 4,7% para 450 L/min. Esse comportamento se repete tanto para bolhas grossas quanto para finas. Pode-se, portanto, constatar que o efeito da TM aumenta à medida que a vazão de saída do difusor diminui.

Verifica-se, finalmente, que, para a profundidade de 25 m, o impacto da TM sobre a velocidade no centro da pluma é relativamente pequeno sobretudo para bolhas de diâmetros de 5 e 10 mm, visto que ambas as curvas praticamente se sobrepõem à curva em que não ocorre dissolução verificado para todas as vazões.

As Figuras 4.6(a-c) mostram o efeito da vazão de saída do difusor para uma profundidade de 50 m. Comparando-as com as Figuras 4.5(a-c), pode-se observar que o efeito da TM passa a ser mais significativo quanto mais profundo for o lago ou reservatório. A Tabela 4.6 mostra que o comportamento verificado em profundidades de 50 m segue a mesma tendência mencionada para 25 m. Ou seja, o efeito da TM na velocidade no centro da pluma é maior quanto menor for o diâmetro inicial da bolha e quanto menor for a vazão de saída do difusor.

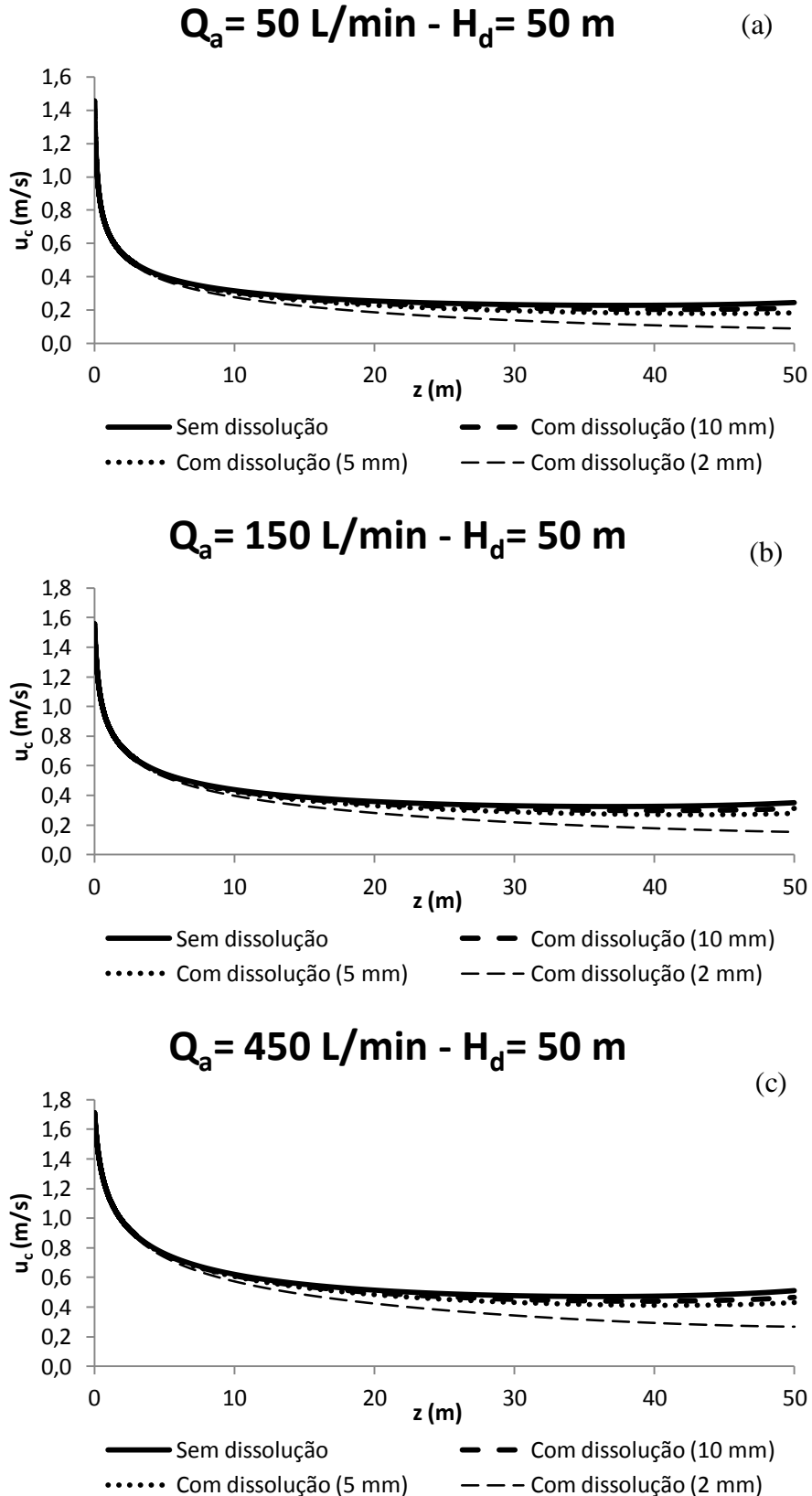
Tabela 4.6 - Desvios em relação à curva “Sem dissolução” calculados para a velocidade no centro da pluma em corpos hídricos de 50 m

Profundidade 50 m		Diâmetro inicial de bolha		
		10 mm	5 mm	2 mm
Vazão de saída do difusor	50 L/min	13,1%	24,8%	62,8%
	150 L/min	11,1%	20,6%	56,9%
	450 L/min	9,1%	16,3%	47,7%

Fonte: Elaborada pelo autor.

Novamente, pode-se observar que os desvios apresentados por bolhas finas são mais relevantes do que os apresentados por bolhas médias e grossas. Além disso, os desvios calculados para profundidade de 50 m são maiores do que os de 25m. Isso sugere que a profundidade afeta o efeito da TM na velocidade no centro da pluma, indicando que o efeito vai ser maior à medida que a profundidade aumenta.

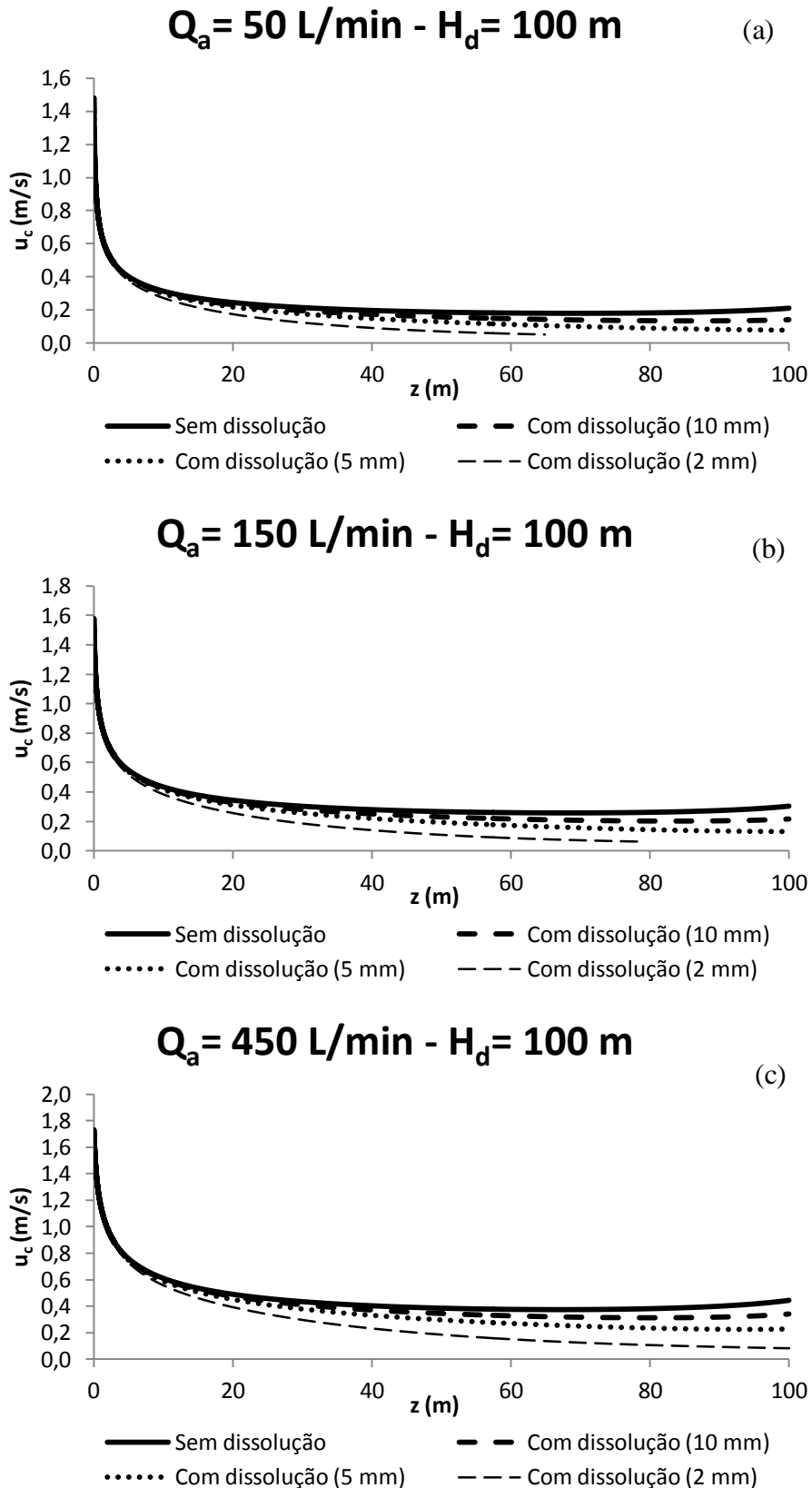
Figura 4.6 - Comparação da velocidade no centro da pluma com e sem dissolução para corpo d'água de 50 m de profundidade e (a) $Q_a = 50$ L/min, (b) $Q_a = 150$ L/min e (c) $Q_a = 450$ L/min



Fonte: Elaboradas pelo autor.

As Figuras 4.7(a-c) permitem observar o impacto da TM para a profundidade de 100 m. Estas figuras, quando comparadas às Figuras 4.5 e 4.6, apresentam maiores desvios em relação à curva “Sem dissolução”, ratificando que, quanto mais profundo for o lago ou reservatório, maior será o afastamento das curvas em relação à curva em que não ocorre a dissolução, sendo, portanto, maior o efeito da TM.

Figura 4.7 - Comparação da velocidade no centro da pluma com e sem dissolução para corpo d'água de 100 m de profundidade e (a) $Q_a = 50$ L/min, (b) $Q_a = 150$ L/min e (c) $Q_a = 450$ L/min



Fonte: Elaboradas pelo autor.

A Tabela 4.7 mostra que o efeito da TM sobre a velocidade no centro da pluma diminui à medida que o diâmetro inicial da bolha aumenta assim como observado nas demais profundidades. Ao se analisar como a vazão afeta, observa-se que em bolhas médias e grossas, o comportamento segue como exposto para as profundidades de 25 m e 50 m, porém, bolhas finas apresentaram tendência inversa, em que, quando a vazão aumenta, o efeito da TM aumenta também, como mostrado em vermelho na Tabela 4.7.

Tabela 4.7 - Desvios em relação à curva “Sem dissolução” calculados para a velocidade no centro da pluma em corpos hídricos de 100 m. Valores em destaque indicam comportamento anômalo em bolhas finas.

Profundidade 100 m		Diâmetro inicial de bolha		
		10 mm	5 mm	2 mm
Vazão de saída do difusor	50 L/min	32,9%	63,5%	71,8%
	150 L/min	28,6%	57,0%	75,5%
	450 L/min	23,8%	48,3%	81,7%

Fonte: Elaborada pelo autor.

Wüest et al. (1992) consideraram que as bolhas se dissolvem quando atingem 0,1% do valor do diâmetro das bolhas inicial. O mesmo foi adotado neste trabalho. Portanto, também se pode observar nestas figuras que as bolhas de 2 mm de diâmetro dissolvem antes de chegar à superfície em apenas duas das situações testadas. Para a vazão de 50 L/min, as bolhas se dissolvem a 65 m acima da fonte e para 150 L/min, a 80 m. Pode-se, então, concluir que, quanto menor for a vazão de saída do difusor, mais próximo da fonte ocorrerá a dissolução das bolhas.

Isso acontece pelo fato de que, à medida que a vazão de saída do difusor aumenta, a velocidade de saída também aumenta, de forma que as bolhas atingem níveis mais elevados mais rapidamente do que em situações com vazões de saída mais baixas, possuindo mais espaço vertical trafegável pelas bolhas antes de serem dissolvidas. Vazões volumétricas mais elevadas provocam menores tempos de residência.

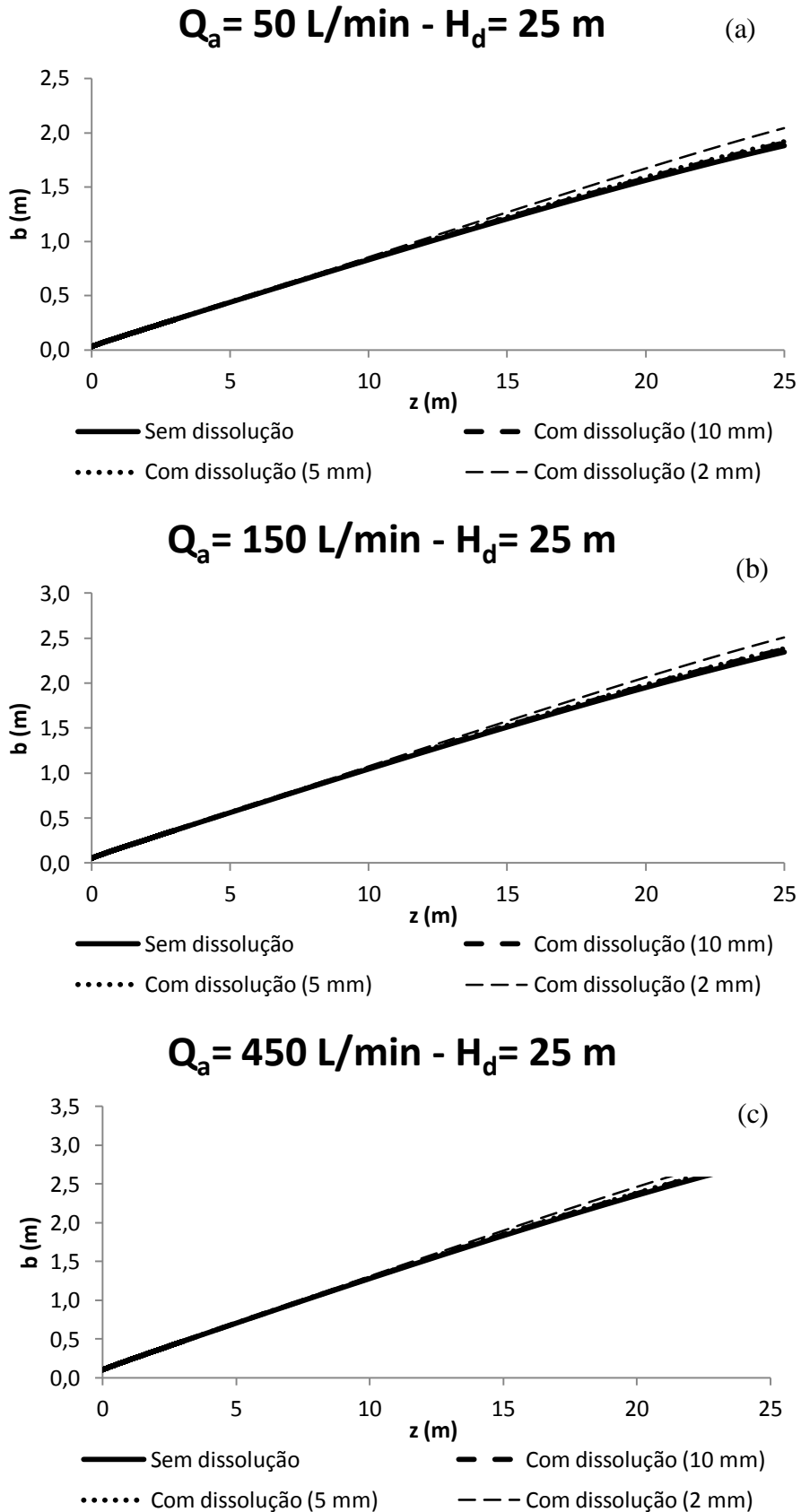
As Figuras 4.5(a-c), 4.6(a-c) e 4.7(a-c) permitem concluir, pois, que quanto mais profundo for o lago ou reservatório e quanto menor for o diâmetro da bolha, maior será a influência da TM na hidrodinâmica do processo. No que diz respeito à vazão, seu efeito apresenta a particularidade de bolhas médias e grossas se comportarem de forma distinta de bolhas finas. Enquanto o aumento da vazão diminui o impacto da TM na velocidade da pluma vertical em bolhas médias e grossas, em bolhas finas, o aumento da vazão aumenta o impacto, o qual foi observado para profundidade de 100 m.

4.2.2. Análise para o raio da pluma

Esta análise foi desenvolvida realizando-se simulações para três vazões de saída do difusor (Q_a), três diâmetros iniciais de bolha (db) e três profundidades de corpo hídrico (H_d), calculadas por um modelo sem TM e por um modelo incluindo parâmetros de TM. Os resultados foram registrados em forma de gráficos, como são apresentados posteriormente. Estes gráficos apresentam o raio da pluma (b) em função da profundidade.

As Figuras 4.8(a-c) apresentam o efeito de diferentes vazões no raio da pluma para um lago ou reservatório de 25 m de profundidade e diâmetros iniciais de bolha de 2 mm, 5 mm e 10 mm. Essas figuras indicam que quanto maior for a vazão de saída do difusor, maiores raios a pluma poderá atingir.

Figura 4.8 - Comparação do raio da pluma com e sem dissolução para corpo d'água de 25 m de profundidade e (a) $Q_a = 50$ L/min, (b) $Q_a = 150$ L/min e (c) $Q_a = 450$ L/min



Fonte: Elaboradas pelo autor.

A Tabela 4.8 apresenta o efeito da TM no raio da pluma em profundidades de 25 m. Tomando como exemplo as bolhas de diâmetro de 5 mm, tem-se para a vazão de 50 L/min desvio máximo em relação à curva “Sem dissolução” de 2,0%, para 150 L/min, 1,6% e para 450 L/min, 1,2%, o que mostra que o impacto da TM no raio da pluma é menor quanto maior for a vazão de saída do difusor. E analisando a vazão de 450 L/min nessa profundidade, tem-se desvio máximo de 1,0% para bolhas grossas, 1,2% para bolhas médias e 5,2% para bolhas finas, indicando que esse efeito é maior quanto menor é o diâmetro inicial da bolha. Observa-se, portanto que a Tabela 4.8 fornece pequenos desvios em relação à curva “Sem dissolução”, indicando que o efeito da TM no raio da pluma em corpos d’água de 25 m não é muito significativo.

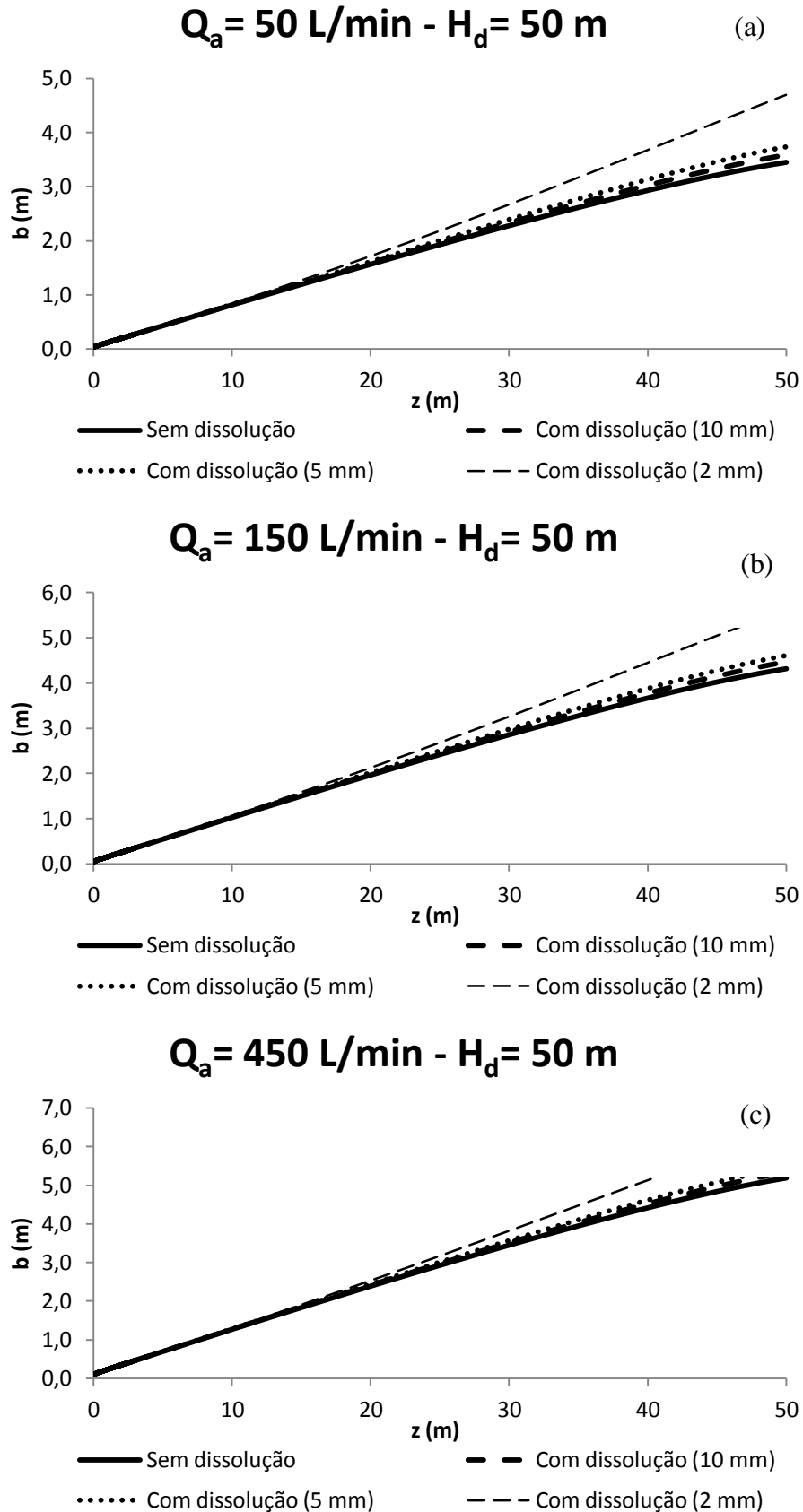
Tabela 4.8 - Desvios em relação à curva “Sem dissolução” calculados para o raio da pluma em corpos hídricos de 25 m

Profundidade 25 m		Diâmetro inicial de bolha		
		10 mm	5 mm	2 mm
Vazão de saída do difusor	50 L/min	1,4%	2,0%	8,7%
	150 L/min	1,2%	1,6%	6,9%
	450 L/min	1,0%	1,2%	5,2%

Fonte: Elaborada pelo autor.

As Figuras 4.9(a-c) fornecem resultados para um lago ou reservatório de 50 m de profundidade. Elas sugerem que, para essa profundidade, o raio da pluma ainda sofre pouca influência da TM para bolhas de diâmetros de 5 e 10 mm. Para bolhas de diâmetro de 2 mm, o efeito é considerável.

Figura 4.9 - Comparação do raio da pluma com e sem dissolução para corpo d'água de 50 m de profundidade e (a) $Q_a = 50$ L/min, (b) $Q_a = 150$ L/min e (c) $Q_a = 450$ L/min



Fonte: Elaboradas pelo autor.

Para essa profundidade, a vazão de saída do difusor exerce pouco efeito no raio da pluma, apresentando pequenos desvios ao variá-la, como se pode observar na Tabela 4.9. Também, nota-se que o comportamento observado na profundidade de 25 m se repete, reafirmando que o efeito da TM é maior quanto menor for o diâmetro inicial da bolha e a vazão de saída do difusor.

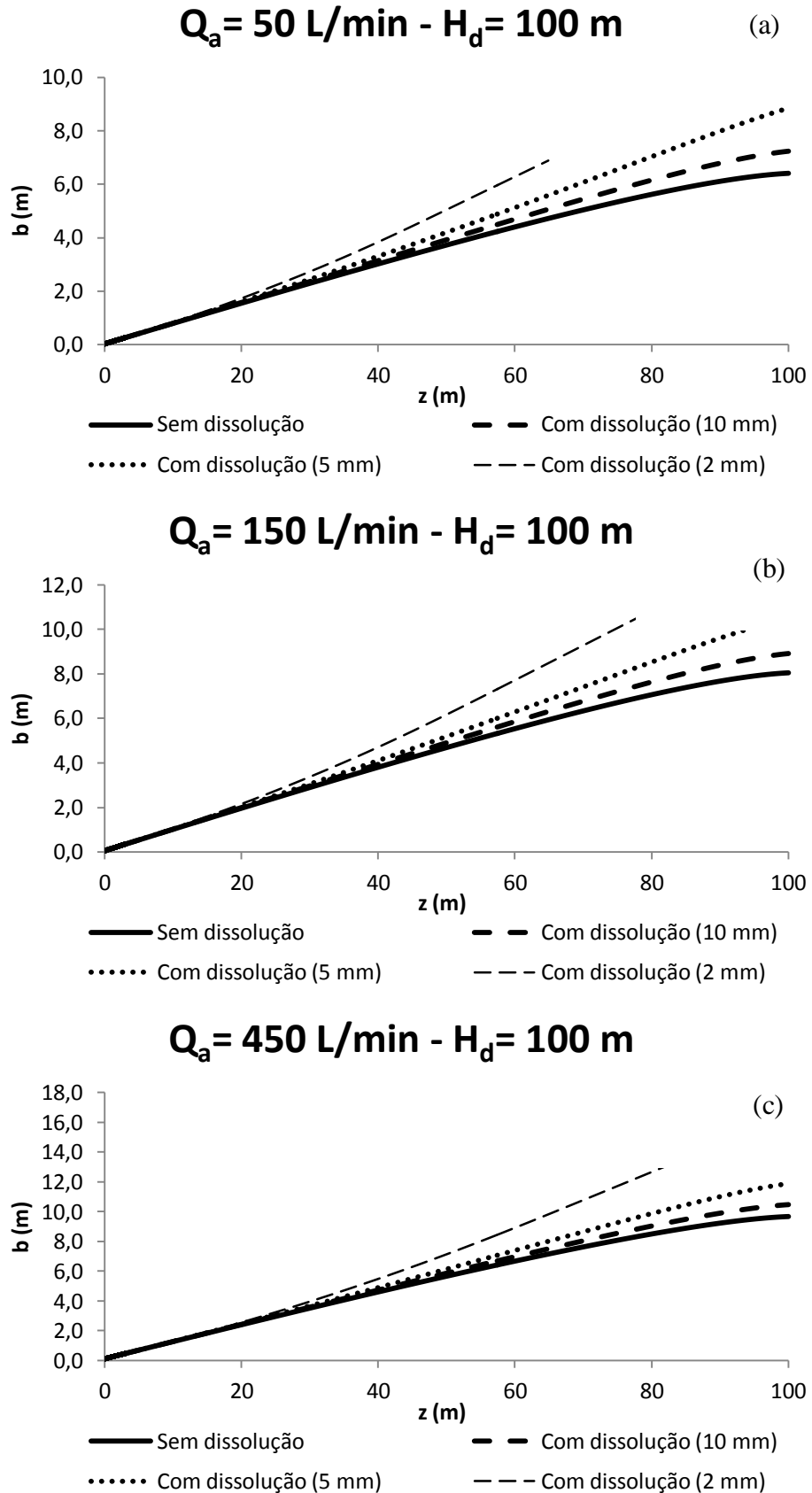
Tabela 4.9 - Desvios em relação à curva “Sem dissolução” calculados para o raio da pluma em corpos hídricos de 50 m

Profundidade 50 m		Diâmetro inicial de bolha		
		10 mm	5 mm	2 mm
Vazão de saída do difusor	50 L/min	4,0%	8,4%	36,0%
	150 L/min	3,4%	6,7%	30,2%
	450 L/min	2,7%	5,1%	22,2%

Fonte: Elaborada pelo autor.

As Figuras 4.10(a-c), referentes a corpos d'água de 100 m de profundidade, permitem observar o efeito da vazão de saída do difusor mais significativo à medida que a vazão aumenta, sobretudo para bolhas de 2 mm de diâmetro.

Figura 4.10 - Comparação do raio da pluma com e sem dissolução para corpo d'água de 100 m de profundidade e (a) $Q_a = 50$ L/min, (b) $Q_a = 150$ L/min e (c) $Q_a = 450$ L/min



Fonte: Elaboradas pelo autor.

Isso pode ser constatado através da Tabela 4.10, em que se verifica que se observa a mesma tendência que foi apresentada para a velocidade no centro da pluma nessas condições. O impacto da TM no raio da pluma para bolhas finas tende a ser maior quanto maior for a vazão de saída do difusor, o que é o contrário observado para bolhas médias e grossas.

Tabela 4.10 - Desvios em relação à curva “Sem dissolução” calculados para o raio da pluma em corpos hídricos de 100 m. Valores em destaque indicam comportamento anômalo em bolhas finas.

Profundidade 100 m		Diâmetro inicial de bolha		
		10 mm	5 mm	2 mm
Vazão de saída do difusor	50 L/min	12,7%	37,8%	45,7%
	150 L/min	10,6%	30,6%	52,4%
	450 L/min	8,3%	22,7%	69,8%

Fonte: Elaborada pelo autor.

Como também mencionado na análise da velocidade no centro da pluma, nessas condições (2 mm de diâmetro inicial e 100 m de profundidade), pode ocorrer dissolução das bolhas. O que justifica a tendência inversa da influência da TM na hidrodinâmica.

As Figuras 4.8(a-c), 4.9(a-c) e 4.10(a-c) e os dados fornecidos nas Tabelas 4.8, 4.9 e 4.10 possibilitaram confirmar, portanto, a importância da profundidade, do diâmetro da bolha e da vazão de saída do difusor na análise do efeito da TM no raio da pluma, concluindo que, quanto mais profundo o corpo hídrico e menor o diâmetro, maior será esse impacto. Quanto à vazão de saída, o mesmo fenômeno que ocorre com a velocidade da pluma, ocorre com o raio da pluma, o aumento da vazão aumenta o efeito da TM na largura da pluma em bolhas finas, observado na análise do reservatório com 100 m de profundidade, e diminui em bolhas médias e grossas. Também foi possível constatar que, a partir desses dados, o raio da pluma é menos afetado pela TM do que a velocidade no centro da pluma.

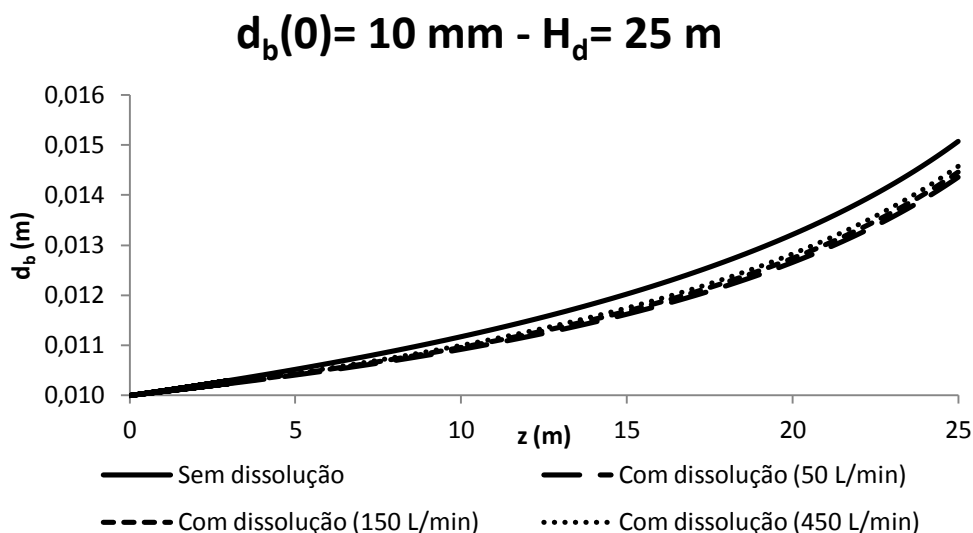
4.2.3. Análise para o diâmetro das bolhas

Desenvolveu-se esta análise a partir de simulações para três vazões de saída do difusor (Q_a), três diâmetros iniciais das bolhas (db) e três profundidades de corpo hídrico (H_a), calculadas por um modelo sem TM e por um modelo incluindo parâmetros de TM. Os resultados foram registrados em forma de gráficos. Os gráficos apresentam o diâmetro das bolhas em função da profundidade.

As Figuras 4.11 e 4.12 ilustram o comportamento do diâmetro das bolhas durante a ascensão para três situações de vazão, 50, 150 e 450 L/min, e duas situações de profundidade do corpo d'água, 25 e 100 m para bolhas de diâmetro inicial de 10 mm.

A Tabela 4.11 permite verificar que, para a profundidade de 25 m, a vazão não exerce significativa influência no diâmetro da bolha, visto que os desvios máximos observados em relação à curva “Sem dissolução” foram de 3,3% (450 L/min) a 4,7% (50 L/min), indicando também que o efeito da TM no diâmetro da bolha diminui com o aumento da vazão de saída do difusor. Vazões mais elevadas provocam menores tempos de residência, que resultam em menor dissolução (quando ocorre) e, conseqüentemente, em bolhas de diâmetros maiores na superfície da água, que pode ser observado na Figura 4.11.

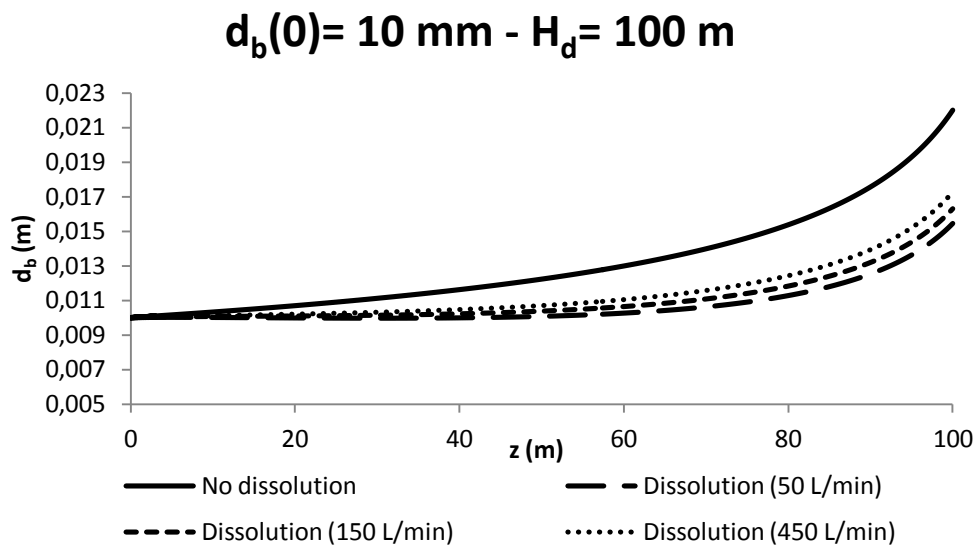
Figura 4.11 - Comparação do diâmetro das bolhas com e sem dissolução para corpo d'água de 25 m de profundidade e diâmetro de bolha inicial de 10 mm



Fonte: Elaborada pelo autor.

Para a profundidade de 100 m, o impacto da TM é maior, de 21,5% (450 L/min) a 29,8% (50 L/min), sugerindo que ele aumenta com a profundidade. Verifica-se através das Figuras 4.11 e 4.12 que o diâmetro da bolha aumenta à medida que ascende até a superfície. Para o caso de 100 m, mostrado na Figura 4.12, nota-se que o diâmetro da bolha das curvas “Sem dissolução” é mantido relativamente constante antes de se observar o aumento em seu tamanho, sobretudo para vazões mais baixas.

Figura 4.12 - Comparação do diâmetro das bolhas com e sem dissolução para corpo d'água de 100 m de profundidade e diâmetro de bolha inicial de 10 mm



Fonte: Elaborada pelo autor.

Tabela 4.11 - Desvios em relação à curva “Sem dissolução” calculados para bolhas com 10 mm de diâmetro inicial

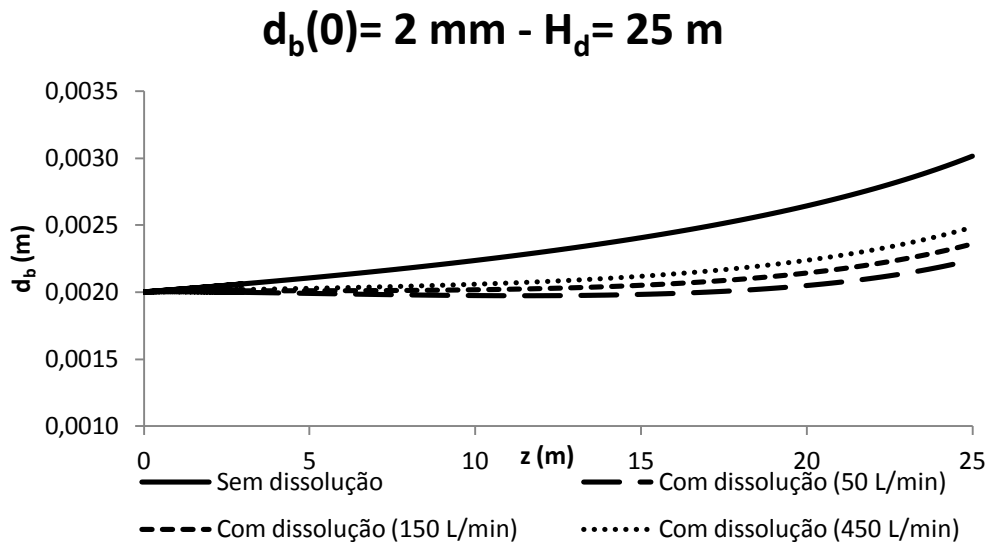
Diâmetro inicial de bolha 10 mm		Vazão de saída do difusor		
		50 L/min	150 L/min	450 L/min
Profundidade	25 m	4,7%	4,0%	3,3%
	50 m	11,9%	10,2%	8,4%
	100 m	29,8%	25,9%	21,5%

Fonte: Elaborada pelo autor.

As Figuras 4.13 e 4.14 apresentam o comportamento do diâmetro das bolhas durante a ascensão para as mesmas situações de vazão de saída do difusor e de profundidade descritas para as Figuras 4.11 e 4.12, sendo, neste caso, para bolhas de 2 mm de diâmetro inicial.

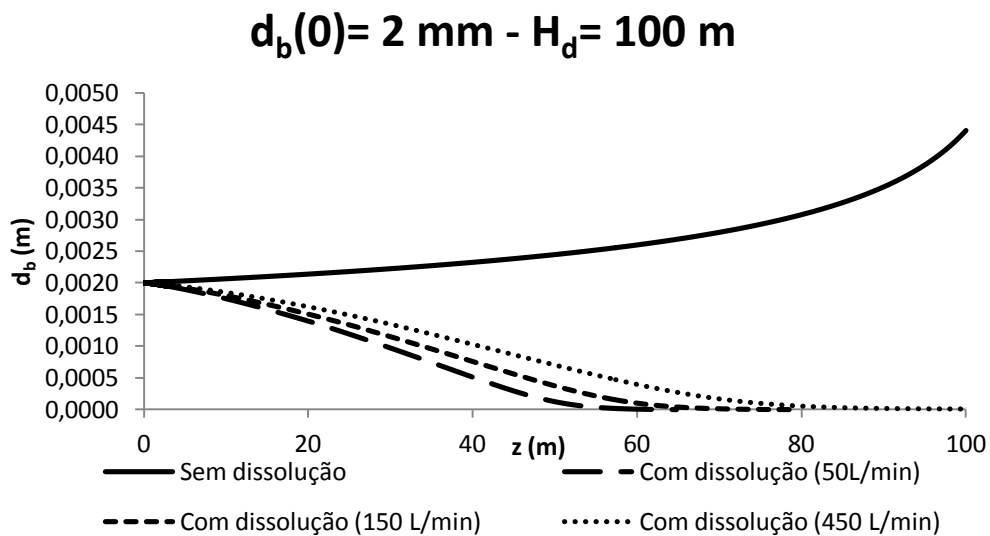
A Tabela 4.12 apresenta os desvios máximos observados em bolhas de 2 mm de diâmetro inicial. Eles variam de 17,5% (450 L/min) a 25,7% (50 L/min) em corpos d'água de 25 m de profundidade. Para a profundidade de 100 m, o comportamento das bolhas nas vazões testadas diverge dos resultados obtidos até aqui. Tem-se praticamente 100% de desvio, inferindo que bolhas finas são bastante afetadas em águas mais profundas. Isso se dá devido à ocorrência da dissolução das bolhas antes que elas atinjam a superfície. Aquelas com as menores vazões dissolvem numa profundidade menor, como já foi discutido nas Seções 4.2.1 e 4.2.2. Quando bolhas médias são utilizadas em profundidades elevadas, ocorre compressão seguida de descompressão, o que não se verifica em águas rasas.

Figura 4.13 - Comparação do diâmetro das bolhas com e sem dissolução para corpo d'água de 25 m de profundidade e diâmetro de bolha inicial de 2 mm



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 4.14 - Comparação do diâmetro das bolhas com e sem dissolução para corpo d'água de 100 m de profundidade e diâmetro de bolha inicial de 2 mm



Fonte: Elaborada pelo autor.

Tabela 4.12 - Desvios em relação à curva “Sem dissolução” calculados para bolhas com 2 mm de diâmetro inicial

Diâmetro inicial de bolha 2 mm		Vazão de saída do difusor		
		50 L/min	150 L/min	450 L/min
Profundidade	25 m	25,7%	21,7%	17,5%
	50 m	69,6%	59,2%	48,5%
	100 m	99,9%	99,9%	99,9%

Fonte: Elaborada pelo autor.

Quando comparados com os valores mostrados na Tabela 4.11, constata-se que o impacto da TM no diâmetro de bolha é maior quanto menor for o diâmetro inicial. As simulações indicam que bolhas grossas apresentam comportamento semelhante em águas rasas e profundas.

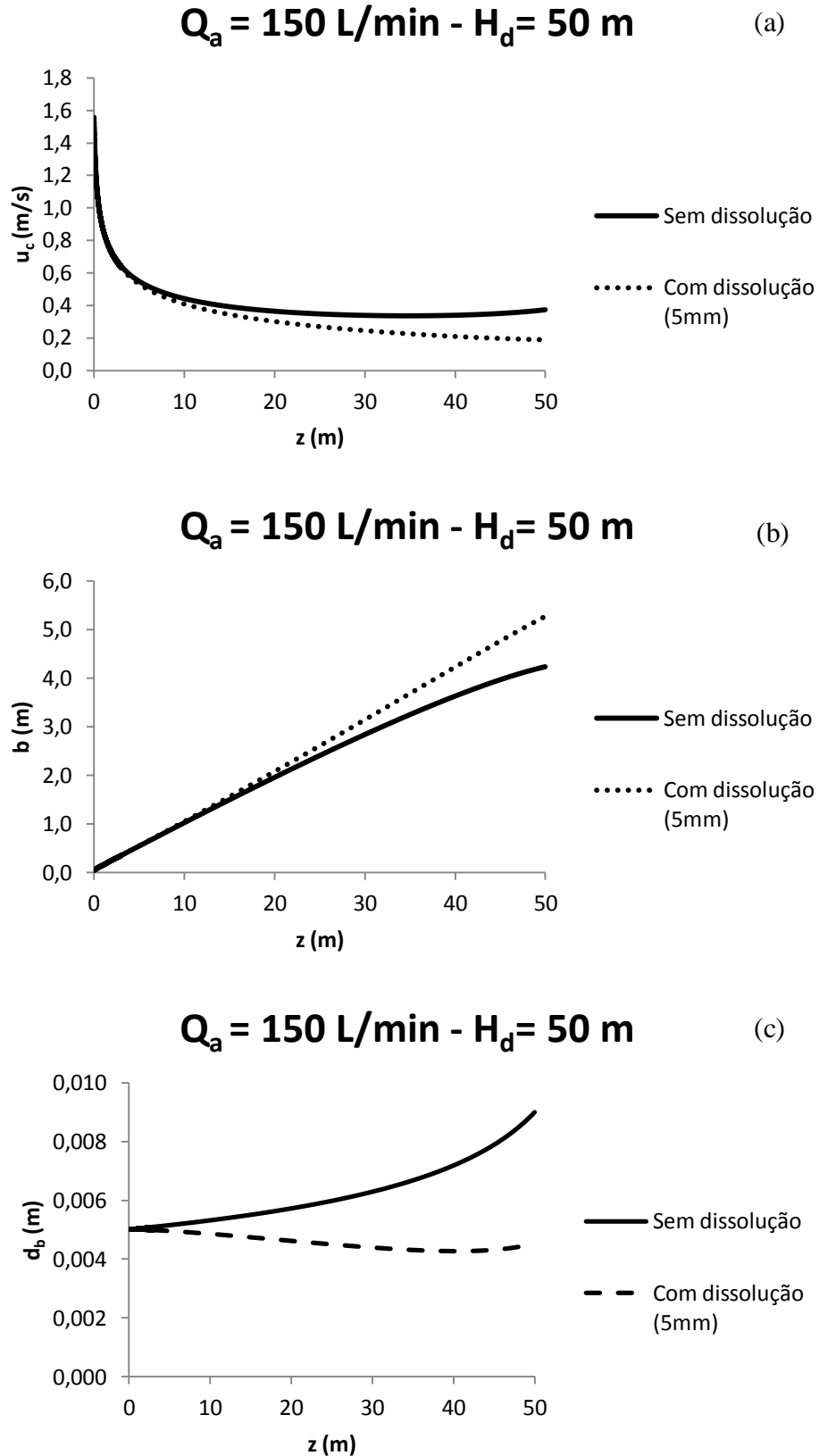
As simulações mostraram que bolhas finas e grossas atingem maiores diâmetros em águas rasas do que em profundas. Analisando as Figuras 4.11, 4.12, 4.13 e 4.14 e as Tabelas 4.11 e 4.12, percebe-se, portanto, que a influência da TM no diâmetro é maior quanto maior for a profundidade e menores forem o diâmetro inicial das bolhas e a vazão de saída do difusor.

4.3. Efeito da transferência de massa na hidrodinâmica do modelo para processos de oxigenação

Nesta seção, foram realizadas simulações para avaliar o impacto da TM na hidrodinâmica do processo de oxigenação. As simulações foram feitas para bolhas de 5 mm de diâmetro, lagos ou reservatórios de 50 m de profundidade e vazão de saída do difusor de 150 L/min.

As Figuras 4.15(a-c) apresentam o comportamento da velocidade no centro da pluma, do raio da pluma e do diâmetro da bolha em função da profundidade para um processo de oxigenação.

Figura 4.15 - Comparação (a) da velocidade no centro da pluma, (b) do raio da pluma e (c) do diâmetro de bolha com e sem dissolução para corpo d'água de 50 m de profundidade, diâmetro inicial de 5 mm e $Q_a = 150$ L/min



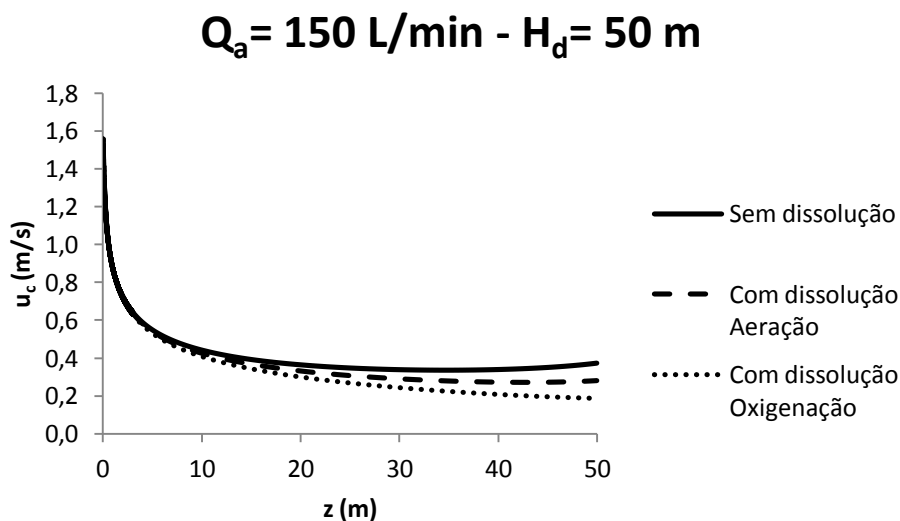
Fonte: Elaboradas pelo autor.

Pode-se verificar que a tendência seguida por esse modelo se assemelha às, previamente, demonstradas para o processo de aeração. Nas subseções a seguir, uma melhor descrição é apresentada.

4.3.1. Análise para a velocidade da pluma no centro

Comparando-se os processos de oxigenação e aeração, obteve-se, para a velocidade no centro da pluma, a Figura 4.16. Observa-se que a curva de aeração se aproxima mais da curva “Sem dissolução” do que a curva de oxigenação. Isso quer dizer que, no processo de aeração, o efeito da TM na velocidade é menos significativo, cujo desvio calculado foi de 33% para o caso testado.

Figura 4.16 - Comparação da velocidade no centro da pluma com e sem dissolução para corpo d'água de 50 m de profundidade, diâmetro inicial de 5 mm e $Q_a = 150$ L/min

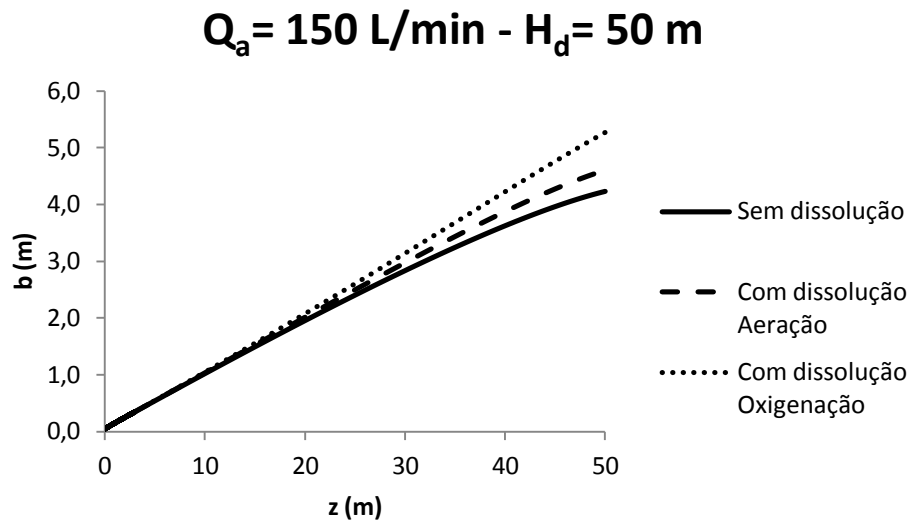


Fonte: Elaborada pelo autor.

4.3.2. Análise para o raio da pluma

A Figura 4.17 exibe a comparação entre os dois processos no que diz respeito à largura da pluma. Constata-se que, nas condições em que as simulações foram realizadas, o raio da pluma é afetado pela transferência de massa em 14% no processo de oxigenação, cujo desvio se apresentou maior que no processo de aeração.

Figura 4.17 - Comparação do raio da pluma com e sem dissolução para corpo d'água de 50 m de profundidade, diâmetro inicial de 5 mm e $Q_a = 150$ L/min

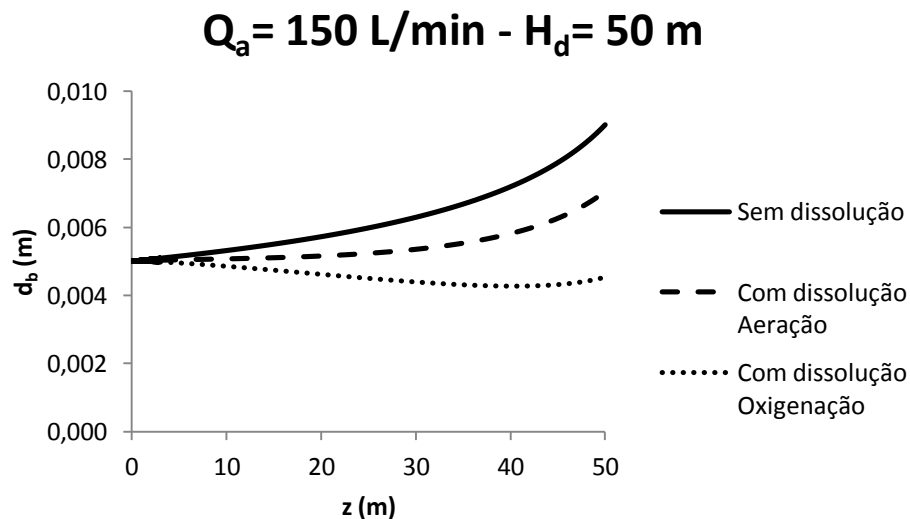


Fonte: Elaborada pelo autor.

4.3.3. Análise para o diâmetro das bolhas

Nota-se, através da Figura 4.18, que, novamente, o processo de oxigenação sofre maior efeito da transferência de massa, verificado no diâmetro das bolhas, com mais significância em 36%, para os testes realizados, em relação ao processo de aeração.

Figura 4.18 - Comparação do diâmetro de bolha com e sem dissolução para corpo d'água de 50 m de profundidade, diâmetro inicial de 5 mm e $Q_a = 150$ L/min

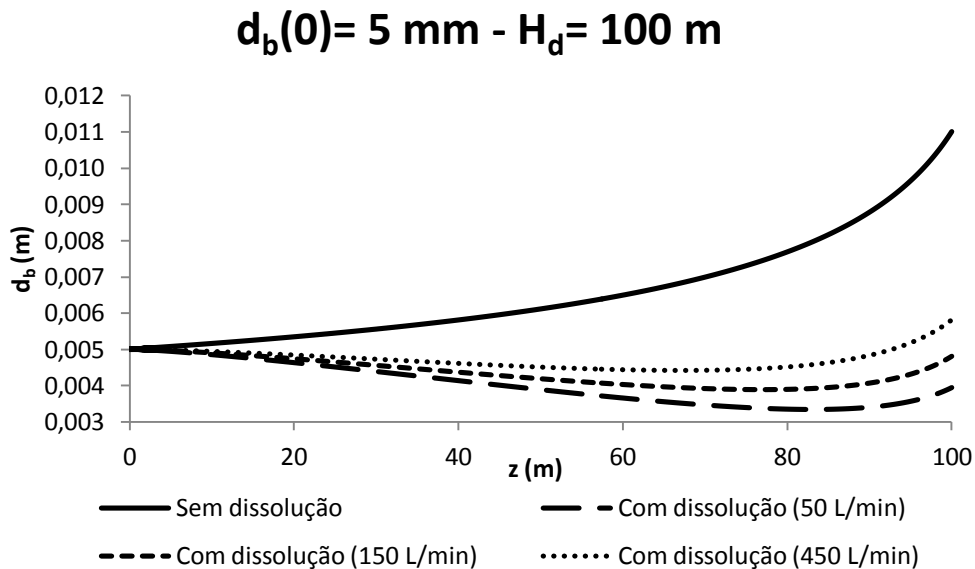


Fonte: Elaboradas pelo autor.

No entanto, comparando-se os fenômenos ocorrentes em ambos, verifica-se que, no processo de aeração, o diâmetro aumenta suavemente até atingir a superfície; o que não ocorre

no processo de oxigenação, no qual as bolhas são suavemente comprimidas, sofrendo posterior descompressão. Esse comportamento apresentado pelas bolhas no processo de oxigenação só se apresenta no processo de aeração em profundidades maiores, como demonstrado na Figura 4.19.

Figura 4.19 - Comparação do diâmetro de bolha com e sem dissolução para corpo d'água de 100 m de profundidade e diâmetro inicial de 5 mm



Fonte: Elaborada pelo autor.

As Figuras 4.16, 4.17 e 4.18 permitem concluir que o processo de oxigenação sofre mais influência da TM do que o de aeração. Isso ocorre pelo fato de a constante de Henry do oxigênio ser maior do que a do nitrogênio. Quanto maior a constante de Henry, maior a TM, como pode ser observado através da Eq. (3.41). Esses impactos foram manifestados no comportamento da velocidade no centro da pluma, da raio da pluma e do diâmetro das bolhas.

4.4. Estudo de caso

4.4.1. Aeração

Neste estudo de caso, através de aeração no açude Acarape do Meio (Figura 4.20), realizaram-se simulações com o modelo validado na seção 4.1 a fim de se calcular a eficiência de transferência de oxigênio padrão (do inglês, SOTE) e a vazão de circulação próxima à superfície (Q_{circ}). As condições utilizadas para realizar as simulações desse estudo são apresentadas na Tabela 4.13.

Figura 4.20 - Açude Acarape do Meio



Fonte: <atlas.srh.ce.gov.br>.

Tabela 4.13 - Dados utilizados no estudo de caso de aeração

Gás liberado	O_2 e N_2
Porcentagem de O_2 no ar (%)	21
Porcentagem de N_2 no ar (%)	79
Profundidade (m)	33
Concentração inicial de O_2 no hipolímnio (mg/L)	3,0
Concentração inicial de N_2 no hipolímnio (mg/L)	15,0

Fonte: Elaborada pelo autor.

A Tabela 4.14 ilustra os resultados obtidos, que permitem observar que, para um mesmo diâmetro, o valor da SOTE é maior para menores valores de vazão de saída do difusor e, para uma mesma vazão de saída do difusor, quanto menor o diâmetro, maior a SOTE. Esse comportamento também foi verificado por Amberg et al. (1969) e Mueller et al. (2002). A razão disso pode ser atribuída ao tempo de contato, uma vez que a velocidade relativa entre as bolhas e o jato vertical (u_s) não é reduzida a valores tão pequenos à medida que se aumenta a vazão de saída do difusor.

Tabela 4.14 - Estudo de caso para aeração

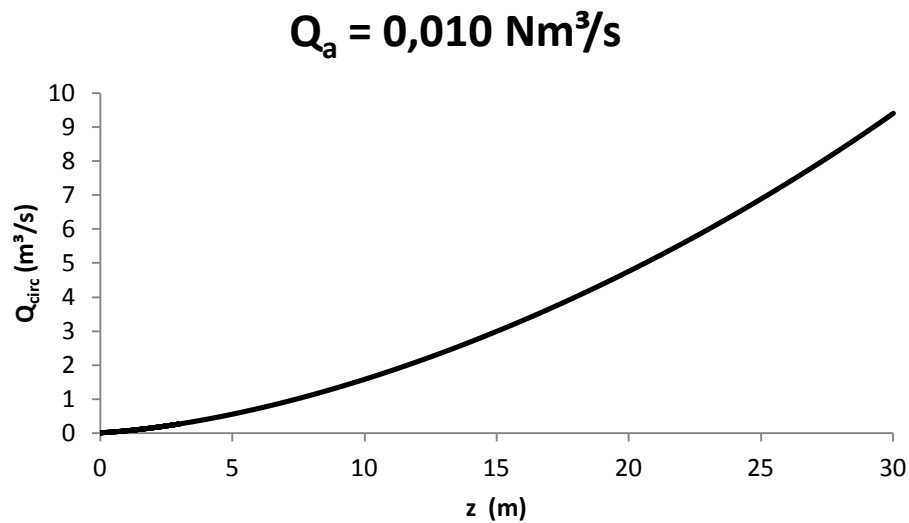
		Diâmetro					
		2mm	4mm	6mm	8mm	10mm	
Vazão de saída do difusor	1280 L/min	SOTE	44,10%	23,51%	15,99%	12,09%	9,55%
		Q _{circ} (m ³ /s)	34,993	36,603	37,131	37,372	37,256
		Q _{circ} (L/min)	2,10E+06	2,20E+06	2,23E+06	2,24E+06	2,24E+06
	640 L/min	SOTE	49,94%	27,00%	18,44%	13,96%	11,02%
		Q _{circ} (m ³ /s)	22,226	23,464	23,870	24,058	23,974
		Q _{circ} (L/min)	1,33E+06	1,41E+06	1,43E+06	1,44E+06	1,44E+06
	320 L/min	SOTE	55,71%	30,61%	21,01%	15,94%	12,55%
		Q _{circ} (m ³ /s)	13,892	14,818	15,123	15,265	15,206
		Q _{circ} (L/min)	8,34E+05	8,89E+05	9,07E+05	9,16E+05	9,12E+05
	160 L/min	SOTE	61,16%	34,20%	23,59%	17,95%	14,11%
		Q _{circ} (m ³ /s)	8,520	9,188	9,409	9,514	9,475
		Q _{circ} (L/min)	5,11E+05	5,51E+05	5,65E+05	5,71E+05	5,68E+05
	80 L/min	SOTE	66,06%	37,64%	26,10%	19,91%	15,64%
		Q _{circ} (m ³ /s)	5,108	5,572	5,726	5,799	5,775
		Q _{circ} (L/min)	3,06E+05	3,34E+05	3,44E+05	3,48E+05	3,46E+05
	40 L/min	SOTE	70,25%	40,76%	28,43%	21,74%	17,06%
		Q _{circ} (m ³ /s)	2,980	3,287	3,389	3,439	3,424
		Q _{circ} (L/min)	1,79E+05	1,97E+05	2,03E+05	2,06E+05	2,05E+05
	20 L/min	SOTE	73,64%	43,45%	30,45%	23,35%	18,31%
		Q _{circ} (m ³ /s)	1,680	1,871	1,936	1,967	1,959
		Q _{circ} (L/min)	1,01E+05	1,12E+05	1,16E+05	1,18E+05	1,18E+05
	10 L/min	SOTE	76,13%	45,55%	32,06%	24,63%	19,31%
		Q _{circ} (m ³ /s)	0,904	1,015	1,053	1,071	1,067
		Q _{circ} (L/min)	5,42E+04	6,09E+04	6,32E+04	6,43E+04	6,40E+04

Fonte: Elaborada pelo autor.

Já a vazão de circulação se manifesta do modo inverso em praticamente todas as situações testadas: para um mesmo diâmetro, quanto maior a vazão de saída do difusor, maior a vazão de circulação (Q_{circ}) e, para uma mesma vazão de saída do difusor, quanto maior o diâmetro, maior a vazão de circulação (Q_{circ}). Isso também é justificado pelo tempo de contato. Vale ainda ressaltar que vazões de saída do difusor mais elevadas, 1280 L/min por exemplo, atingem vazões de circulação (Q_{circ}) de cerca de 1700 vezes a vazão de saída do difusor, enquanto que vazões de saída mais baixas, como 10 L/min, atingem cerca de 6000 vezes. Isso indica que a influência das vazões de saída na vazão de circulação é mais significativa em menores valores de vazão de saída do difusor.

A Figura 4.21 fornece a relação de vazão de circulação e profundidade, indicando que a vazão de circulação aumenta conforme se aproxima da superfície da água. Devido à entrada turbulenta, a pluma vai abrindo e ganhando vazão, gerando a circulação quando atinge a superfície.

Figura 4.21 - Relação entre vazão de circulação e profundidade utilizando vazão de saída do difusor de 0,010 Nm³/s



Fonte: Elaborada pelo autor.

A configuração adequada de vazão de saída e diâmetro do difusor vai depender do objetivo que se quer atingir. Se o que se deseja é oxigenar o reservatório, deve-se escolher a configuração que apresentar maior SOTE, uma vez que ela indica quanto oxigênio está sendo absorvido pelo meio. Porém, se o que se quer é circular a água e quebrar a estratificação, deslocar algas para zonas afóticas e/ou promover melhor mistura da matéria orgânica, a vazão de circulação (Q_{circ}) é o parâmetro mais importante a ser levado em consideração nessa decisão. Há também situações em que se precisa aplicar mais de um caso, os quais se veem necessários analisar os dois parâmetros. Esse último cenário pode ser verificado em Sahoo & Luketina (2003) e Singleton & Little (2006).

4.4.2. Oxigenação

Neste estudo de caso, foi realizada uma análise que visava determinar as configurações adequadas para impedir a ressolubilização do fósforo no açude Orós (Figura 4.22). As condições de simulação desse estudo de caso estão apresentadas na Tabela 4.15.

Figura 4.22 - Açude Orós



Fonte: <atlas.srh.ce.gov.br>.

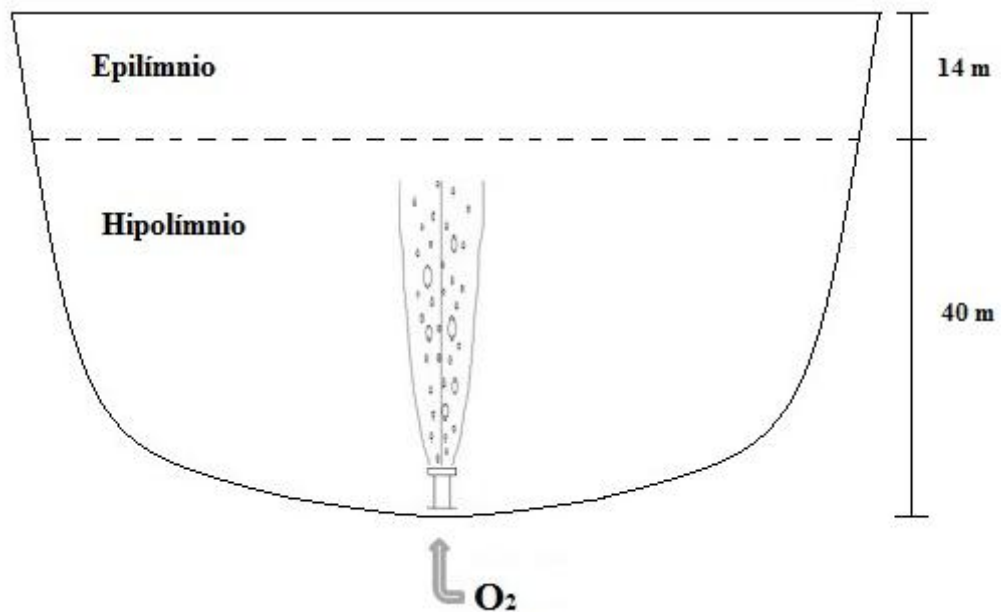
Tabela 4.15 - Dados utilizados no estudo de caso de oxigenação

Gás liberado (99%)	O_2
Profundidade (m)	54
Altura do Hipolímnio (m)	40
Altura do Epilímnio (m)	14
Concentração inicial de O_2 no hipolímnio (mg/L)	2,0

Fonte: Elaborada pelo autor.

A Figura 4.23 apresenta o esquema ilustrativo desse estudo de caso.

Figura 4.23 - Esquema do estudo de caso para oxigenação



Fonte: Elaborada pelo autor.

Para tal, foram realizadas diversas simulações, utilizando o modelo validado na seção 4.1, a fim de se obter as condições de vazão e diâmetro do difusor de bolha aptas à execução desse objetivo. A Tabela 4.16 ilustra as situações em que ocorrem ou não dissolução completa no hipolímnio. Não foram apresentadas as alturas de dissolução acima do hipolímnio, pois o objetivo é que ocorra oxigenação nessa região.

Tabela 4.16 - Dissolução das bolhas

		Diâmetro					
		1mm	2mm	3mm	4mm	5mm	10mm
Vazão de saída do difusor	1280 L/min						
	640 L/min						
	320 L/min						
	160 L/min						
	80 L/min	D34,4					
	40 L/min	D29,7	D37,5				
	20 L/min	D25,9	D33,4				
	10 L/min	D22,9	D30,2				

LEGENDA

D10 -> Dissolve em 10m

Dissolve no hipolímnio

Não dissolve no hipolímnio

Fonte: Elaborada pelo autor.

Nesse açude, considerou-se a altura correspondente ao limite entre o hipolímnio e o epilímnio de 40 m a partir da fonte. Como se pode observar, apenas utilizando o diâmetro de 1 e 2 mm nas vazões variando de 10 a 80 L/min e 10 a 40 L/min, respectivamente, constata-se a ocorrência de dissolução das bolhas no hipolímnio.

Considera-se aqui que o hipolímnio está completamente isolado em relação ao epilímnio e a qualquer influência externa. Verifica-se, portanto, através da Tabela 4.16, as possíveis configurações para realizar oxigenação no hipolímnio deste açude, impedindo, portanto, a ressolubilização do fósforo. As vazões mais elevadas permitem que as bolhas dissolvam o mais próximo possível do nível delimitador do hipolímnio ocasionando maior transferência de oxigênio.

No entanto, vê-se necessário realizar um estudo de viabilidade econômica para inserir na análise os custos de implantação, operação e manutenção, visto que os custos tendem a ser mais elevados quanto maior for a vazão que se deseja fornecer.

5. CONCLUSÕES

No presente estudo, foi desenvolvido um modelo matemático para simulação da hidrodinâmica de plumas de bolhas e a ele foi implementada uma rotina de transferência de massa da fase gasosa para a fase líquida, permitindo, assim, fornecer perfis efetivos da velocidade no centro da pluma, raio da pluma e diâmetro de bolha, considerando corpos d'água de diferentes profundidades, diferentes diâmetros iniciais de bolha e diferentes vazões de saída do difusor.

O modelo foi validado através da comparação com os trabalhos desenvolvidos por Wüest et al. 1992 e Buscaglia et al. 2002 para plumas de bolhas em corpos d'água relativamente profundos. Esse modelo executa as simulações através de métodos mais simples do que os disponíveis na literatura, assumindo diferentes condições iniciais e através de diferentes equações. Mesmo assim, ele apresentou resultados satisfatórios. Outra diferença presente nesse estudo diz respeito à maneira como o coeficiente de entrada turbulenta e o fator de amplificação da quantidade de movimento devido à turbulência foram calculados. Além disso, este estudo levou em consideração o efeito da turbulência, o que pode ser significativo como nas simulações realizadas.

Foram realizadas simulações para vários cenários que permitiram a análise do efeito da transferência de massa na velocidade no centro da pluma, no raio da pluma e no diâmetro de bolha. Essa análise permitiu concluir que a transferência de massa pode ser negligenciada quando bolhas grossas são utilizadas, exceto em águas profundas. Bolhas médias apresentam comportamento muito semelhante ao de bolhas grossas, porém, o efeito da transferência de massa é mais significativo, sobretudo em corpos d'água mais profundos e a menores vazões de saída do difusor, situações em que o efeito da transferência de massa não pode ser desprezado. Bolhas finas são muito suscetíveis aos efeitos da transferência de massa em qualquer situação. Foi constatado também que, em corpos d'água profundos, as bolhas finas se comportam de forma oposta aos demais tamanhos de bolhas e profundidades, ou seja, nas bolhas finas, vazões maiores causam maiores desvios do que vazões menores, que é o contrário ao evidenciado nas demais situações. Esse comportamento foi observado na análise da velocidade e do raio da pluma.

Finalmente, duas aplicações do modelo foram realizadas: (1) em um processo de aeração no açude Acarape do Meio, para análise da eficiência de transferência de oxigênio

padrão e da vazão de circulação próxima à superfície, e (2) em um processo de oxigenação no açude Orós, para escolha de configuração adequada para garantir a oxigenação hipolímica.

A simulação do processo de aeração forneceu eficiência padrão de transferência de oxigênio de até 76% e vazão de circulação de até 37 m³/s aproximadamente. A simulação do processo de oxigenação hipolímica permitiu verificar as configurações aptas a realizar a oxigenação nessa região a fim de impedir a ressolubilização do fósforo depositado no fundo, uma vez que condições anóxicas propiciam a ressolubilização, por isso, é necessário evitar que os níveis de oxigênio dissolvidos atinjam valores muito baixos.

Como estudos complementares, sugere-se:

- ℵ Desenvolver pesquisa que investigue os efeitos da estratificação no corpo hídrico e verificar a sua influência no processo de transferência de massa;
- ℵ Realizar simulações e validações do modelo proposto para reservatórios reais, incluindo o caso do açude Santo Anastácio localizado no Campus do Pici da Universidade Federal do Ceará (estudo em andamento);
- ℵ Adaptar o modelo a rios e estuários;
- ℵ Incluir efeito de outras variáveis (sólidos suspensos, salinidade, temperatura, etc);
- ℵ Realizar acoplamento do modelo de pluma de bolhas a modelo de qualidade de água em rios, estuários, lagos e reservatórios;
- ℵ Realizar os mesmos estudos supracitados utilizando jatos de bolhas.

REFERÊNCIAS

- ALVES, S. S.; ORVALHO, S. P.; VASCONCELOS, J. M. T. **Effect of bubble contamination on rise velocity and mass transfer.** Chemical Engineering Science, 60, 1-9, 2005.
- AMBERG, H. R.; WISE, D. W.; ASPITARTE, T. R. **Aeration of streams with air and molecular oxygen.** Tappi, 52 (10), 1866-1871, 1969.
- ASAEDA, T.; IMBERGER, J. **Structure of bubble plumes in linearly stratified environments.** Journal of Fluid Mechanics, 249, 35-57, 1993.
- BEYERSDORF, J. **Verhalten von Luftblasen und Sedimenten in Blasensälen in abhängigkeit vom Salzgehalt im Wasser,** Mitteilungen, Heft 79, Franzius-Institut f. Wasserbau u. Küsteningenieurwesen, Universität Hannover, 1997.
- BEUTEL, M. W.; HORNE, A. J. **A review of the effects of hypolimnetic oxygenation on lake and reservoir in water quality.** Lake and Reservoir Management, 15(4), 285-297, 1999.
- BREVIK, I.; KILLIE, R. **Phenomenological description of the axisymmetric air-bubble Plume.** International Journal of Multiphase Flow, 22(3), 535-549, 1996.
- BREVIK, I.; KLUGE, R. **On the role of turbulence in the phenomenological theory of plane and axisymmetric air-bubble plume.** International Journal of Multiphase Flow, 25, 87-108, 1999.
- BREVIK, I.; KRISTIANSEN, Ø. **The flow in and around air bubble plumes.** International Journal of Multiphase Flow, 28, 617-634, 2002.
- BULSON, P. S. **Bubble Breakwaters with Intermittent Air Supply.** Research Report 9 -2, 1962; and **Large Scale Bubble Breakwater Experiments.** Research Report 9-3 1962 Military Engineering Experimental Establishment, Christchurch, Hampshire, England.
- BURRIS, V. L.; LITTLE, J. C. **Bubble dynamics and oxygen transfer in a hypolimnetic aerator.** Water Science and Technology, 37(2), 293-300, 1998.
- BURRIS, V. L.; MCGINNIS, D. F.; LITTLE, J. C. **Predicting oxygen transfer and water flow rate in airlift aerators.** Water Resources Research, 36, 4605-4615, 2002.
- BUSCAGLIA, G. C.; BOMBARDELLI, F. A.; GARCÍA, M. H. **Numerical modeling of large-scale bubble plumes accounting for mass transfer effects.** International Journal of Multiphase Flow, 28, 1763-1785, 2002.
- CEDERWALL, K.; DITMARS, J. D. **Analysis of air-bubble plumes.** KH-R-24, W. M. Keck Laboratory of Hydraulics and Water Resources, Division of Engineering and Applied Science, California Institute of Technology, Pasadena, CA, 1970.

CLIFT, R.; GRACE, J. R.; WEBER, M. E. **Bubbles, drops, and particles**. Academic Press, New York, 380, 1978.

COGERH. **Estado trófico dos açudes: Últimos resultados**, Dezembro de 2008. <http://portal.cogerh.com.br>.

CONAMA – Conselho Nacional de Meio Ambiente (Brasil). **Resolução CONAMA nº 357, de 17 de março de 2005**. Brasília – DF, 2005.

CROWE, C.; SOMMERFIELD, M.; TSUJI, Y. **Multiphase flows with droplets and particles**. CRC Press, 1998.

DUCHENE, P.; COTTEUX, E.; CAPELA, S. **Applying fine bubble aeration to small aeration tanks**. Water Science and Technology, 44 (2-3), 203-210, 2001.

EINARSRUD, K. E.; BREVIK, I. **Kinetic energy approach to dissolving axisymmetric multiphase plumes**. Journal of Hydraulic Engineering, 1041-1051, 2009.

FANNELOP, T. K.; SJOEN, K. **Hydrodynamics of underwater blowouts**. 8th AIAA Meeting Aerospace Sciences Pasadena 80-0219, 17–33, 1980.

FAST, A. W.; OVERHOLTZ, W. J.; TUBB, R. A. **Hypolimnetic oxygenation using liquid oxygen**. Water Resources Research, 11 (2), 294-299, 1975.

FAST, A. W.; OVERHOLTZ, W. J.; TUBB, R. A. **Hyperoxygen concentrations in the hypolimnion produced by injection of liquid oxygen**. Water Resources Research, 13 (2), 474-476, 1977.

FIGUEIRÊDO, M. C. B.; TEIXEIRA, A. S.; ARAÚJO, L. F. P.; ROSA, M. F.; PAULINO, W. D.; MOTA, S.; ARAÚJO, J. C. **Avaliação da vulnerabilidade ambiental de reservatórios à eutrofização**. Engenharia Sanitária e Ambiental, 12, 399-409, 2007.

FISCHER, H. B.; LIST, E. J.; KOH, R. C. Y.; IMBERGER, J.; BROOKS, N. H. **Mixing in inland and coastal waters**. San Diego, Academic Press, 1979.

GAFSI, M.; KETTAB, A.; BENMAMAR, S.; BENZIADA, S. **Comparative studies of the different mechanical oxygenation systems used in the restoration of lakes and reservoirs**. Journal of Food, Agriculture & Environment. 7(2), 815-822, 2009.

HABERMAN, W. L.; MORTON, R. K. **An experimental study of bubbles moving in liquids**. Proceedings of the American Society of Civil Engineers, 80, 379-427, 1954.

IMTEAZ, M. A.; ASAEDA, T. **Artificial mixing of lake water by bubble plume and effects of bubbling operations on algal bloom**. Water Resources Research, 34(6), 1919-1929, 2000.

JOHANSEN, Ø. **Development and verification of deep-water blowout models**. Marine Pollution Bulletin, 47, 360-368, 2003.

JUNGO, E.; VISSER, P. M.; STROOM, J.; MUR, L. R. **Artificial mixing to reduce growth of the blue-green alga *Microcystis* in lake Nieuwe Meer, Amsterdam: An evaluation of 7 years of experience.** Water Science and Technology, 1, 17-23, 2001.

KOBUS, H. E. **Analysis of the flow induced by air – Bubble systems.** Coastal Engineering, Conf. Vol. II, London, 1968.

LEIFER, I.; PATRO, R. K. **The bubble mechanism for methane transport from the shallow sea bed to the surface: A review and sensitivity study.** Continental Shelf Research, 22, 2409-2428, 2002.

LEITCH, A. M.; BAINES, W. D. **Liquid volume flux in a weak bubble plume.** Journal of Fluid Mechanics, 205, 77-98, 1989.

LEMCKERT, C. J.; IMBERGER, J. **Energetic bubble plumes in arbitrary stratification.** Journal of Hydraulic Engineering, 119(6), 680-703, 1993.

LIMA NETO, I. E. **Bubble plume modeling with new functional relationships.** Journal of Hydraulic Research, 50(1), 134-137, 2012a.

LIMA NETO, I. E. **Gas injection in water for artificial aeration and circulation.** Ph.D. Thesis, University of Alberta, Edmonton, Alberta, Canada, 2007.

LIMA NETO, I. E. **Modeling the liquid volume flux in bubbly jets using a simple integral approach.** Journal of Hydraulic Engineering, 138(2), 210-215, 2012b.

LIMA NETO, I. E.; WIEGAND, M. C.; ARAÚJO, J. C. **Sediment redistribution due to a dense reservoir network in a large semi-arid Brazilian basin.** Hydrological Sciences Journal, v. 56, p. 319-333, 2011.

LIMA NETO, I. E.; ZHU, D. Z.; RAJARATNAM, N. **Air injection in water with different nozzles.** Journal of Environmental Engineering, 134 (4), 283-294, 2008a.

LIMA NETO, I. E.; ZHU, D. Z.; RAJARATNAM, N. **Bubbly jets in stagnant water.** International Journal of Multiphase Flow, 34 (12), 1130-1141, 2008b.

LIMA NETO, I. E.; ZHU, D. Z.; RAJARATNAM, N. **Effect of tank size and geometry on the flow induced by circular bubble plumes and water jets.** Journal of Hydraulic Engineering, 134 (6), 833-842, 2008c.

LIMA NETO, I. E.; ZHU, D. Z.; RAJARATNAM, N. **Horizontal injection of gas-liquid mixtures in a water tank.** Journal of Hydraulic Engineering, 134 (12), 1722-1731, 2008d.

LIMA NETO, I. E.; ZHU, D. Z.; RAJARATNAM, N.; YU, T.; SPAFFORD, M.; MCEACHERN, P. **Dissolved oxygen downstream of an effluent outfall in an ice-covered river: Natural and artificial aeration.** Journal of Environmental Engineering, 134 (4), 283-294, 2007.

LINDENSCHMIDT, K. E.; HAMBLIN, P. F. **Hypolimnetic aeration in lake Tegel, Berlin.** Water Resources Research, 31(7), 1619-1628, 1997.

- LIRO, C. R.; ADAMS, E. E.; HERZOG, H. J. **Modeling the release of CO₂ in the deep ocean**. Technical Report MIT-EL 91-002, Energy Laboratory, MIT, Cambridge, MA, 1991.
- LITTLE, J. C.; MCGINNIS, D. F. **Hypolimnetic oxygenation: Predicting performance using a discrete-bubble model**. *Water Science and Technology: Water Supply*, 1(4), 185-191, 2001.
- MCDUGALL, T. J. **Bubble plumes in stratified environments**. *Journal of Fluid Mechanics*, 85, 655-672, 1978.
- MCGINNIS, D. F.; LITTLE, J. C. **Bubble dynamics and oxygen transfer in a Speece Cone**. *Water Science and Technology*, 37, 285-292, 1998.
- MCGINNIS, D. F.; LITTLE, J. C. **Predicting diffused-bubble oxygen transfer rate using the discrete-bubble model**. *Water Resources Research*, 36(18), 4627-4635, 2002.
- MCGINNIS, D. F.; LORKE, A.; WÜEST, A.; STÖCKLI, A.; LITTLE, J. C. **Interaction between a bubble plume and the near-field in a stratified lake**. *Water Resources Research*, 40(10, W10206), 2004.
- MILGRAM, H. **Mean flow in round bubble plumes**. *Journal of Fluid Mechanics*, 133, 345-376, 1983.
- MORTON, B. R.; TAYLOR, G. I.; TURNER, J. S. **Turbulent gravitational convection from maintained and instantaneous sources**. *Proceedings of Royal Society, London, Ser. A*, 234, 1-23, 1956.
- MOTARJEMI, M.; JAMESON, G. J. **Mass transfer from very small bubbles - The optimum bubble size for aeration**. *Chemical Engineering Science*, 33, 1415-1423, 1978.
- MUELLER, J. A.; BOYLE, W. C.; PÖPEL, H. J. **Aeration: principles and practice**. CRC Press, New York, 2002.
- PREPAS, E. E.; FIELD, K. M.; MURPHY, T. P., JOHNSON, W. L., BURKE, J. M., TONN, W. M. **Introduction to the Amisk Lake Project: oxygenation of deep, eutrophic lake**. *Canadian Journal of Fisheries Aquatic Sciences*, 54, 2105-2110, 1997.
- SAHOO, G. B.; LUKETINA, D. **Modeling of bubble plume design and oxygen transfer for reservoir restoration**. *Water Resources Research*, 37(2), 393-401, 2003.
- SCHIERHOLZ, E. L.; GULLIVER, J. S.; WILHELMS, S. C.; HENNEMAN, H. E. **Gas transfer from air diffusers**. *Water Resources Research*, 40 (5), 1018-1026, 2006.
- SCHLADOW, S. G. **Bubble plume dynamics in a stratified medium and the implications for water quality amelioration in lakes**. *Water Resources Research*, 28, 313-321, 1992.
- SINGLETON, V. L.; LITTLE, J. C. **Designing hypolimnetic aeration and oxygenation systems – A review**. *Environmental Science and Technology*, 40, 7512-7520, 2006.

SINGLETON, V. L.; GANTZER, P.; LITTLE, J. C. **Linear bubble plume model for hypolimnetic oxygenation: Fullscale validation and sensitivity analysis.** Water Resources Research, 43, W02405, 2007.

SINGLETON, V. L. **Hypolimnetic Oxygenation: Coupling bubble-plume and reservoir models.** Ph.D. Thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University. Blacksburg, Virginia, 2008.

SJÖBERG, A. **Stromningshastigheter kring luft-bubbelridå i t äthetshomogent och stillastående vatten.** (In Swedish), Chalmers Institute of Technology, Hydraulics Division. Report No. 39, 1967.

SOCOLOFSKY, S. A. **Laboratory experiments of multi-phase plumes in stratification and crossflow.** Ph.D. Thesis, Massachusetts Institute of Technology. Massachusetts, 2001.

SOCOLOFSKY, S. A.; CROUNSE, B.; ADAMS, E. E. **Multi-phase plumes in uniform, stratified and flowing environments.** Ch. 4 in Environmental Fluid Mechanics: Theories and Applications, ASCE, 2002.

SOCOLOFSKY, S. A.; ADAMS, E. E. **Liquid volume fluxes in stratified multiphase plumes.** Journal of Hydraulic Engineering, 129(11), 905-914, 2003.

SOCOLOFSKY, S. A.; BHAUMIK, T.; SEOUL, D. G. **Double-plume integral models for near-field mixing in multiphase plumes.** Journal of Hydraulic Engineering, 134(6), 772–783, 2008.

SOGA, C. L. M.; REHMANN, C. R. **Dissipation of turbulent kinetic energy near a bubble plume.** Journal of. Hydraulic Engineering, 130 (5), 441-449, 2004.

SOUZA FILHO, F. A.; MARTINS, E. S. P. R. **O processo de mistura em reservatórios do semi-árido e sua implicação na qualidade da água.** Revista Brasileira de Recursos Hídricos, 11, 109-119, 2006.

SPEECE, R. E.; RAYYAN, F. **Hypolimnetic aeration with commercial oxygen - Volume I: Dynamics of bubble plume.** US Environmental Protection Agency, Washington, DC, 1973.

SPEECE, R. E.; MURFEE, G. **Hypolimnetic aeration with commercial oxygen - Volume 2: Bubble plume gas transfer.** US Environmental Protection Agency, Washington, DC, 1973.

TACKE, K. H.; SCHUBERT, H. G.; WEBER, D. J.; SCHWERDTFEGER, K. **Characteristics of round vertical gas bubble jets.** Metallurgical and Materials Transactions, B 16B(2), 263-275, 1985.

TAYLOR, G. L. **The action of a surface current used as a breakwater.** Proceedings of Royal Society, A, 231, 1955.

TOWNSEND, A. A. **The structure of turbulent shear flow.** Cambridge University Press, 1976.

TSANG, G. **Theoretical investigation of oxygenating bubble plumes.** Paper presented at Second International Symposium on Gas Transfer at Water Surfaces, American Society of Civil Engineers, Minneapolis, MN, 11-14 Sept, 1990.

TURNER, J. S. **Turbulent entrainment: the development of the entrainment assumption, and its application to geophysical flows.** Journal of Fluid Mechanics, 173, 431-471, 1986.

VAN DIJK, M.; VAN VUUREN, S. J. **Destratification induced by bubble plumes as a means to reduce evaporation from open impoundments.** Water SA, 35, 158-167, 2009.

VASCONCELOS, J. M. T.; RODRIGUES, J. M. L.; ORVALHO, S. C. P.; ALVES, S. S. MENDES, R. L.; REIS, A. **Effect of contaminants on mass transfer coefficients in bubble column and airlift contactors.** Chemical Engineering Science, 58, 1431-1440, 2003.

VON SPERLING, M. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos – princípios do tratamento biológico de águas residuárias.** v. 1, DESA-UFGM, ABES, Belo Horizonte, 1996.

WAGNER, M. R.; PÖPEL, H. J. **Oxygen transfer and aeration efficiency – Influence of diffuser submergence, diffuser density, and blower type.** Water Science and Technology, 38 (3), 1-6, 1998.

WHIPPLE, W. J.; YU, S. L. **Instream aerators for polluted rivers.** Journal of the Sanitary Engineering Division, 96(5), 1153-1165, 1970.

WILKINSON, D. L. **Two-dimensional bubble plumes.** Journal of the Hydraulics Division, 105(HY2), 139-154, 1979.

WPCF – Water Pollution Control Federation. **Aeration – Manual of practice n° FD-13.** ALEXANDRIA, VA, 1988.

WÜEST, A.; BROOKS, N. H.; IMBODEN, D. M. **Bubble plume modeling for lake restoration.** Water Resources Research, 28, 3235-3250, 1992.

YAPA, P. D.; CHEN, F. **Behavior of Oil and Gas from Deepwater Blowouts.** Journal of Hydraulic Engineering, 540-553, 2004.

ZHANG, W. **Air Injection for River Water Quality Improvement.** Ph.D. Thesis, University of Alberta, Edmonton, 2012.