



**UNIVERSIDADE CATÓLICA DE PERNAMBUCO**  
**PRÓ-REITORIA ACADÊMICA**  
**COORDENAÇÃO GERAL DE PÓS-GRADUAÇÃO**  
**MESTRADO EM DESENVOLVIMENTO DE PROCESSOS AMBIENTAIS**

**ROBSON DE SOUZA VASCONCELOS**

**MODELAGEM E SIMULAÇÃO DAS CORRELAÇÕES DE  
*SCALE-UP* PARA O PROCESSO DE FLOTAÇÃO POR  
AR DISSOLVIDO (FAD) UTILIZANDO ANÁLISE  
DIMENSIONAL**

**RECIFE  
2015**

**ROBSON DE SOUZA VASCONCELOS**

**MODELAGEM E SIMULAÇÃO DAS CORRELAÇÕES DE  
*SCALE-UP* PARA O PROCESSO DE FLOTAÇÃO POR  
AR DISSOLVIDO (FAD) UTILIZANDO ANÁLISE  
DIMENSIONAL**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento em Processos Ambientais da Universidade Católica de Pernambuco (UNICAP) como pré-requisito para a obtenção do título de Mestre em **Desenvolvimento de Processos Ambientais**.

**Área de Concentração:** Desenvolvimento em Processos Ambientais.

**Linha de Pesquisa:** Modelagem e Otimização de Processos.

**Orientadora:** Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Leonie Asfora Sarubbo  
**Co-orientador:** Prof<sup>o</sup>. Dr. Valdemir Alexandre dos Santos

**RECIFE  
2015**

VASCONCELOS, R. S. **Modelagem e Simulação das Correlações de *Scale-Up* Para o Processo de Flotação Por Ar Dissolvido (FAD) Utilizando Análise Dimensional.**

V331m Vasconcelos, Robson de Souza

Modelagem e simulação das correlações de scale-up para o processo de flotação por ar dissolvido (FAD) utilizando análise dimensional / Robson de Souza Vasconcelos ; orientador Leonie Asfora Sarubbo, 2015.139 f. : il.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Católica de Pernambuco. Pró-reitoria Acadêmica. Curso de Mestrado em Desenvolvimento de Processos Ambientais, 2015.

1. Flotação. 2. Análise dimensional. 3. Águas residuais – Purificação. I. Título.

CDU 628.16

VASCONCELOS, R. S. **Modelagem e Simulação das Correlações de *Scale-Up* Para o Processo de Flotação Por Ar Dissolvido (FAD) Utilizando Análise Dimensional.**

**Modelagem e Simulação das Correlações de *Scale-Up*  
Para o Processo de Flotação Por Ar Dissolvido (FAD)  
Utilizando Análise Dimensional.**

**ROBSON DE SOUZA VASCONCELOS**

**Comissão Examinadora**

---

**Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup> Leonie Asfora Sarubbo (Orientadora)  
Universidade Católica de Pernambuco – UNICAP**

---

**Prof<sup>o</sup>. Dr. Francisco Madeiro Bernardino Júnior  
Universidade Católica de Pernambuco – UNICAP**

---

**Prof<sup>o</sup>. Dr<sup>o</sup>. Yana Batista Brandão  
Universidade Federal Rural de Pernambuco - UFRPE**

Defendida em \_\_\_\_ / \_\_\_\_ / \_\_\_\_

**Coordenadora: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Clarissa Daisy Costa Albuquerque**

VASCONCELOS, R. S. **Modelagem e Simulação das Correlações de *Scale-Up* Para o Processo de Flotação Por Ar Dissolvido (FAD) Utilizando Análise Dimensional.**

A Deus pela oportunidade, aos espíritos protetores e amigos pela intuição e a minha família, em especial aos meus pais construtores de meu caráter e sempre presentes nos grandes momentos de minha vida.

VASCONCELOS, R. S. **Modelagem e Simulação das Correlações de *Scale-Up* Para o Processo de Flotação Por Ar Dissolvido (FAD) Utilizando Análise Dimensional.**

“Embora ninguém possa voltar atrás e fazer um novo começo, qualquer um pode começar agora e fazer um novo fim.”

(Chico Xavier)

VASCONCELOS, R. S. **Modelagem e Simulação das Correlações de *Scale-Up* Para o Processo de Flotação Por Ar Dissolvido (FAD) Utilizando Análise Dimensional.**

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a Deus pela oportunidade de um novo recomeço.

Aos protetores e amigos espirituais as intuições e os bons pensamentos que me deram forças para essa longa jornada.

A minha Orientadora e amiga, Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Leonie Asfora Sarubbo, pelas palavras ditas nas horas certas, seu sorriso contagiante, pelo seu “boa tarde meu lindo” muito bem vindo, sem contar com o seu apoio técnico.

Ao meu Co-orientador e amigo, Prof<sup>o</sup>. Dr. Valdemir Alexandre dos Santos, pelo apoio técnico, profissional e, (muitas vezes) pessoal durante todo o Mestrado e alguns momentos de minha vida.

À Coordenadora do Mestrado em Desenvolvimento de Processos Ambientais, Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Clarissa Dayse da Costa Albuquerque, pelo apoio durante o curso.

Ao Reitor da UNICAP, Pe. Pedro Rubens Ferreira de Oliveira, S. J. pela oportunidade em desenvolver este trabalho nesta universidade.

Aos meus professores, pela amizade e ensinamentos repassados ao longo do Mestrado.

A minha amiga Mikele Sat’Anna, pelo apoio técnico conferido.

Ao técnico Francisco dos Santos (Chicó) pela paciência e ajuda conferida ao longo do Mestrado.

Aos meus pais Luiz Carlos Vieira de Vasconcelos e Maria Joseane de Souza, pelo grande apoio, compreensão, ajuda e, em especial, por todo carinho da presente caminhada.

A minha irmã Luiziane Vasconcelos, pela ajuda.

A minha namorada, Rosangela Henauth, pela cumplicidade, compreensão e oportunidade de caminharmos juntos na mesma estrada.

Ao meu amigo Alex Elton, pela paciência e pelo auxílio nos momentos de dificuldades.

Aos meus sogros, Rosa Cristina da Silva Henauth e João de Deus Henauth Filho, pela acolhida.

VASCONCELOS, R. S. **Modelagem e Simulação das Correlações de *Scale-Up* Para o Processo de Flotação Por Ar Dissolvido (FAD) Utilizando Análise Dimensional.**

A minha madrinha Maria Auxiliadora Medeiros de Aguiar e minha tia Marineide Araujo dos Santos, pela força espiritual e por acreditarem em mim nos momentos em que até eu duvidei da minha capacidade.

À Fundação de Amparo à Ciência e Tecnologia do Estado de Pernambuco (FACEPE), pela concessão da bolsa de Mestrado.

Ao Centro de Gestão de Tecnologia e Inovação (CGTI) pelo apoio técnico concedido.

A todos que direta ou indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho.

VASCONCELOS, R. S. **Modelagem e Simulação das Correlações de *Scale-Up* Para o Processo de Flotação Por Ar Dissolvido (FAD) Utilizando Análise Dimensional.**

## SUMÁRIO

|  |                   |
|--|-------------------|
| <b><u>LISTA DE FIGURAS</u></b>               | <b><u>XI</u></b>  |
| <b><u>LISTA DE SÍMBOLOS</u></b>              | <b><u>XII</u></b> |
| <b><u>LISTA DE ABREVIATURAS</u></b>          | <b><u>XIV</u></b> |
| <b><u>RESUMO</u></b>                         | <b><u>XV</u></b>  |
| <b><u>ABSTRACT</u></b>                       | <b><u>XVI</u></b> |
| <b><u>CAPÍTULO 1</u></b>                     | <b><u>1</u></b>   |
| <b>1 INTRODUÇÃO</b>                          | <b>2</b>          |
| <b>2 OBJETIVOS</b>                           | <b>4</b>          |
| 2.1 OBJETIVO GERAL                           | 4                 |
| 2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS                    | 4                 |
| <b>3 REVISÃO DE LITERATURA</b>               | <b>5</b>          |
| 3.1 MODELAGEM MATEMÁTICA                     | 5                 |
| 3.1.1 Modelos matemáticos                    | 6                 |
| 3.2 METODOLOGIA DE CFD                       | 9                 |
| 3.3 ESCOAMENTO MULTIFÁSICO E SUAS ABORDAGENS | 19                |
| 3.4 ANÁLISE DIMENSIONAL                      | 19                |
| 3.4.1 Números adimensionais                  | 22                |
| 3.5 MUDANÇA DE ESCALA                        | 24                |
| 3.6 FLOTAÇÃO POR AR DISSOLVIDO - FAD         | 25                |
| 3.7 <i>SCALE-UP</i> NA FLOTAÇÃO              | 28                |
| 3.8 MOVIMENTO DE CORPOS NUM FLUIDO           | 28                |
| <b>4 REFERÊNCIAS</b>                         | <b>31</b>         |
| <b><u>CAPÍTULO 2</u></b>                     | <b><u>43</u></b>  |
| <b>RESUMO</b>                                | <b>45</b>         |
| <b>1. INTRODUÇÃO</b>                         | <b>45</b>         |
| <b>2. MATERIAL E MÉTODOS</b>                 | <b>47</b>         |
| 2.1. MATERIAL                                | 47                |

VASCONCELOS, R. S. **Modelagem e Simulação das Correlações de *Scale-Up* Para o Processo de Flotação Por Ar Dissolvido (FAD) Utilizando Análise Dimensional.**

|   |            |
|---|------------|
| 2.2. MÉTODOS  | 49         |
| <b>3. RESULTADOS E DISCUSSÃO</b>  | <b>50</b>  |
| 3.1. GRANDEZAS FLUIDODINÂMICAS PREDOMINANTES                                    | 50         |
| 3.2. CORRELAÇÕES DE SCALE-UP PROPOSTAS  | 52         |
| <b>4. CONCLUSÃO</b>   | <b>54</b>  |
| <b>AGRADECIMENTOS</b>   | <b>55</b>  |
| <b>REFERÊNCIAS</b>  | <b>55</b>  |
| <b>CAPÍTULO 3</b>   | <b>69</b>  |
| <b>CONCLUSÕES GERAIS</b>  | <b>70</b>  |
| <b>ANEXOS</b>   | <b>71</b>  |
| <b>STRATEGY FOR A SCALE-UP CORRELATION IN A DISSOLVED AIR FLOTATION CHAMBER</b> |            |
| <b>CHAMBER</b>  | <b>72</b>  |
| ABSTRACT  | 73         |
| 1 INTRODUCTION  | 73         |
| 2 EXPERIMENTAL  | 75         |
| 2.1 Lab-scale DAF unit  | 75         |
| 2.2 Experimental  | 76         |
| 3 RESULTS AND DISCUSSION  | 77         |
| 3.1 Predominant fluid dynamics  | 77         |
| 3.2 Proposed scale-up correlations  | 79         |
| 4 CONCLUSIONS   | 82         |
| ACKNOWLEDGMENT  | 84         |
| REFERENCES  | 84         |
| TABLE LEGENDS   | 97         |
| FIGURE LEGENDS  | 98         |
| SHORT TEXT FOR THE TABLE OF CONTENTS SECTION                                    | 99         |
| <b>NORMAS PARA SUBMISSÃO EM PERIÓDICO INTERNACIONAL</b>                         | <b>102</b> |
| <b>DEPÓSITO DE PATENTE</b>  | <b>123</b> |

VASCONCELOS, R. S. **Modelagem e Simulação das Correlações de *Scale-Up* Para o Processo de Flotação Por Ar Dissolvido (FAD) Utilizando Análise Dimensional.**

## LISTA DE FIGURAS

|  |    |
|--|----|
| Figura 1 - Similaridade geométrica entre tanques de diferentes volumes ..... | 25 |
| Figura 2 - Esquema genérico do sistema de flotação por ar dissolvido (FAD) . | 27 |
| Figura 3 - Mecanismo de recuperação .....                                    | 29 |

VASCONCELOS, R. S. **Modelagem e Simulação das Correlações de *Scale-Up* Para o Processo de Flotação Por Ar Dissolvido (FAD) Utilizando Análise Dimensional.**

## LISTA DE SÍMBOLOS

### Símbolos Latinos

M, P = Modelo, Protótipo

$C_D$  = Coeficiente de arraste

$F_D$  = força de arraste no corpo;

V = Velocidade na direção do escoamento

A = Área da seção transversal do corpo

$Re_p$  = Número de Reynold da partícula

$V_{PS}$  = Velocidade na direção do escoamento

$d_p$  = Diâmetro da partícula

g = Força da gravidade

VASCONCELOS, R. S. **Modelagem e Simulação das Correlações de *Scale-Up* Para o Processo de Flotação Por Ar Dissolvido (FAD) Utilizando Análise Dimensional.**

### **Símbolos Gregos**

$\Pi_i$  = Grupo adimensional

$V_i$  = Fator de escala

$\Phi$  = Número adimensional

$\rho_s$  = Massa específica do sólido

$\mu$  = Viscosidade do fluido

$\rho$  = Massa específica do fluido

VASCONCELOS, R. S. **Modelagem e Simulação das Correlações de *Scale-Up* Para o Processo de Flotação Por Ar Dissolvido (FAD) Utilizando Análise Dimensional.**

## LISTA DE ABREVIATURAS

FAD – Flotação Por Ar Dissolvido

CFD – *Computational Fluid Dynamics*

DBO – Demanda Bioquímica de Oxigênio

DQO – Demanda Química de Oxigênio

AFD – *Analytical Fluid Dynamics*

EFD – *Experimental Fluid Dynamics*

## RESUMO

Os custos com a implantação de unidades piloto de flotação por ar dissolvido (FAD) requerem estratégias especiais em função da falta de correlações entre a escala laboratorial e a industrial, uma vez que os projetos de FAD têm sido concebidos apenas sob o ponto de vista econômico. Nesse sentido, tem-se realizado esforços significativos para descrever e modelar um *scale-up* para o processo de FAD, sendo necessário elaborar e validar um modelo de previsão de *scale-up* para promover a mudança de escala necessária. No presente trabalho foi obtida uma correlação de *scale-up* como base para o projeto de uma unidade piloto, a partir de um modelo físico em escala de laboratório por meio da análise de correlações de semelhança dinâmica envolvendo grandezas predominantes em uma câmara de FAD usada na separação e recuperação de águas oleosas. Com auxílio da fluidodinâmica computacional e de vídeos dos fluxos de microbolhas e flocos, as forças de inércia e de gravidade foram identificadas como as grandezas predominantes em uma câmara de FAD pela discrepância entre as velocidades médias de ascensão de microbolhas e flocos, de  $8,73 \cdot 10^{-7}$  m/s e  $1,175 \cdot 10^{-5}$  m/s, respectivamente. As simulações foram realizadas por meio do *software* ANSYS e as medidas foram efetuadas com o auxílio de uma câmera fotográfica. A metodologia de trabalho empregada permitiu o desenvolvimento de uma técnica simples e de baixo custo, diminuindo a probabilidade de riscos futuros em um investimento de *scale-up*.

**Palavras-chave:** Modelos Hidráulicos; Similaridade; Velocidade de Ascensão; *Scale-up*; FAD; Unidade Piloto.

## ABSTRACT

The implantation costs of dissolved air flotation (DAF) pilot units require special strategies due to the lack of correlations between laboratory and industrial scale, as novel flotation methods have been considered strictly from an economic standpoint. In this sense, significant efforts have been made to describe and model a scale-up to the process of FAD, being necessary to design and validate a scale-up forecasting model to promote a change in the required scale. In this study a scale-up correlation for a pilot unit project was determined based on the analysis of dynamic similarity correlations involving the predominant phenomena of a dissolved air flotation (DAF) chamber used in separating and recovering oily water. With the aid of computational fluid dynamics and videos of microbubble and floc flow, inertia and gravity were identified as the predominant phenomena in a DAF chamber by the discrepancy between the average speeds of rise of microbubbles and flakes of  $8.73 \cdot 10^{-7}$  m/s and  $1.175 \cdot 10^{-5}$  m/s, respectively. The simulations were performed using ANSYS software and measurements were made with the aid of a camera. The strategy described herein is simple and reduces the likelihood of future risks in scale-up investments.

**Keywords:** Hydraulic Model; Similarity; Speed Ascension; Scale-up; DAF; Pilot Unity.

VASCONCELOS, R. S. **Modelagem e Simulação das Correlações de *Scale-Up* Para o Processo de Flotação Por Ar Dissolvido (FAD) Utilizando Análise Dimensional.**

# CAPÍTULO 1

## 1 INTRODUÇÃO

O Polo Petroquímico de SUAPE tem permitido ao Estado de Pernambuco alcançar níveis de desenvolvimento elevados em virtude da instalação de inúmeros empreendimentos econômicos. A instalação da Refinaria Abreu e Lima, a despeito de desenvolvimento tecnológico que será proporcionado ao Estado, tem despertado a preocupação das indústrias instaladas no seu entorno. No caso específico da Termelétrica de Pernambuco (TERMOPE), com sua localização em termos de captação de água para refrigeração de seu sistema gerador, a jusante de grandes tanques de armazenagem de derivados de petróleo, esta se encontra sujeita a perigo iminente de derramamento ou vazamento desses produtos. Portanto, faz-se necessário o desenvolvimento de estratégias tecnológicas para prevenir problemas indesejáveis causados por possíveis acidentes ambientais (SARUBBO et al., 2012a; 2012b).

Mecanismos de separação física, como a flotação por ar dissolvido (FAD), reduzirão o tempo de recuperação do sistema impactado e, sobretudo, não irão interferir no estado estacionário que deve reger o funcionamento do sistema afetado (ALBUQUERQUE et al., 2012; TRUSHIN; DMITRIEV; AKIMOV, 2011; MENEZES et al., 2010; MASSI et al., 2008; AGARWAL; JERN; LIU, 2011). Para isso, fazem-se necessárias realizações de testes em escala intermediária (escala piloto), uma vez que grande parte dos processos elaborados em escala de laboratório não garante a reprodutibilidade em escala comercial (ZLOKARNIK, 1998).

Dessa forma, a conveniência de se construir um protótipo piloto justifica-se em virtude da necessidade de aprimoramento dos processos em escala de bancada para uma escala intermediária, da complexidade do processo de escalonamento, da importância do escalonamento como estratégia de aproximação da escala comercial e da possibilidade de estimar os custos de investimentos e insumos (vapor, água, ar comprimido, eletricidade) com melhor precisão em escala piloto (ZLOKARNIK, 2006).

VASCONCELOS, R. S. **Modelagem e Simulação das Correlações de *Scale-Up* Para o Processo de Flotação Por Ar Dissolvido (FAD) Utilizando Análise Dimensional.**

Com as adoções de um protótipo em menor amplitude e da metodologia de flotação por ar dissolvido (FAD) na separação e recuperação de águas oleosas, existe a necessidade de ser elaborado e validado um modelo de previsão de *scale-up* (ZLOKARNIK, 2006) para promover a mudança de escala necessária. O estudo envolve a seleção de parâmetros relevantes por meio da análise dimensional e permitirá a realização de um *scale-up* com base em critérios de semelhança dinâmica. Nesse sentido, a modelagem e simulação das correlações de *scale-up* para o processo de flotação por ar dissolvido (FAD) utilizando análise dimensional tem por finalidade obter a validação de um modelo de previsão que será utilizado para tratar águas residuárias do tipo oleosas.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo Geral**

Validar um modelo para previsão de *scale-up* de protótipos na aplicação da técnica de flotação por ar dissolvido (FAD) no tratamento de águas residuárias do tipo oleosas.

### **2.2 Objetivos Específicos**

- Construir um arranjo para realizar experimentos de aplicação de FAD no tratamento de águas residuárias;
  - testar experimentalmente a aplicação de FAD com auxílio de métodos estatísticos de análises;
  - desenvolver uma técnica não intrusiva para medir a velocidade de ascensão de microbolhas no processo de FAD e,
  - validar experimentalmente o modelo de previsão baseado em análise dimensional.

### **3 REVISÃO DE LITERATURA**

#### **3.1 Modelagem Matemática**

A modelagem é a representação matemática de um sistema real e deve, dentro do possível, ser validada com experiências práticas ou calibrada com observações no campo ou laboratório. A simulação computacional permite fazer avaliações dos parâmetros do modelo, de modo a minimizar o tempo gasto, além do que o estado do sistema pode ser conhecido em qualquer momento e até pode-se observar processos impossíveis de visualizar na vida real (RAMIREZ, 2009).

A obtenção de uma solução numérica de qualquer problema físico requer, inicialmente, a habilidade da criação de um modelo matemático correspondente, o qual deve ser resolvido com tempo de computação não-proibitivo e ainda que os resultados obtidos representem adequadamente o fenômeno físico em consideração (MALISKA, 2004).

Sant'anna (2012) afirma que o procedimento da modelagem matemática começa com a elaboração de um modelo a partir da aplicação de princípios físicos, descritos por leis de conservação adequadas ao fenômeno, tais como conservação da massa, energia e movimento. Os modelos resultantes são expressos por equações que relacionam as grandezas relevantes entre si para um determinado espaço e tempo. Eles podem ser utilizados tanto para explicar como para prever o comportamento do sistema em diferentes situações (FORTUNA, 2000).

### 3.1.1 Modelos matemáticos

Embora os modelos matemáticos tenham sido usados durante toda a história da Matemática, foi no início das últimas duas décadas do século XIX que sua utilização se difundiu na comunidade científica dando origem a aplicações e estudos em diferentes áreas do conhecimento (BURAK, 1987; FERRUZZI, 2003).

Bazzo; Pereira (2000) mencionaram que o uso de modelos na engenharia é importante porque:

- é muito dispendioso e nada prático construir todas as alternativas possíveis para o sistema físico real até encontrar uma solução satisfatória;
- o processo direto de construção pode ser destrutivo e perigoso;
- um modelo pode ser facilmente aprimorado, visto que há menos variáveis para controlar durante os testes;
- é possível fazer um exame da situação de muitas variáveis, determinando seus efeitos sobre o sistema físico real;
- com o avanço computacional, as variáveis podem ser facilmente analisadas, pois vários testes podem ser realizados até a exaustão num curto espaço de tempo;
- a abstração leva a um problema familiar, ou seja, algo mais conhecido e presente na vida do técnico.

Para Hilgard (1973), um modelo representa uma série de relações matemáticas, físicas ou conceituais, que se mostram adequadas à compreensão e interpretação de um conjunto de dados. De acordo com Bassanezi (1994), modelo é quando se procura refletir sobre uma porção da realidade. Na tentativa de entender ou agir sobre ela, o processo usual é selecionar argumentos ou parâmetros essenciais e formalizá-los através de um sistema artificial.

O ato de modelar pode ser aplicado a um grande número de problemas. Por exemplo, o estudo da análise ambiental nas proximidades de um rio, a forma

da asa de um avião, um sistema econômico, uma cultura agrícola, um estudo populacional, um estudo físico, e até mesmo um sistema matemático, como o conjunto dos números naturais (LIMA, 2012).

Para Sokolowski; Banks (2010), modelo é imitação ou aproximação de um protótipo, que pode ser uma concepção, um objeto, um sistema ou um processo. Na maioria dos casos, os modelos reduzem custos, riscos e tempo de fluxo de tarefas. São usados por artistas, arquitetos, engenheiros, desenhistas, economistas, administradores cientistas, entre outros profissionais (REHFELDT, 2009). Para Close; Frederick; Newell (2001), os modelos são classificados conforme o tipo de equação que é usado em sua formulação.

Aguirre (2007) aponta que seria impossível descrever todos os modelos matemáticos, mencionando os modelos estáticos e dinâmicos. Os estáticos se relacionam com as variáveis sem quantificar sua dependência temporal. Se a evolução temporal de um sistema é desejada, modelos dinâmicos devem ser usados.

Modelos ditos paramétricos utilizam estruturas matemáticas parametrizadas para descrever o comportamento dinâmico original no domínio do tempo. Os parâmetros destas estruturas matemáticas são ajustados por algoritmos de estimação a partir dos dados medidos (LJUNG, 1987; JÁCOME, 1996). Os métodos ditos não-paramétricos também geram modelos no domínio do tempo. Nesse caso, o comportamento dinâmico do sistema é determinado através de funções de correlações calculadas sobre os dados disponíveis (GARCIA, 2005).

Modelos multivariáveis são caracterizados por possuírem mais de uma entrada ou saída. Os modelos monovariáveis representam a relação causa e efeito de apenas um par de variáveis, ou seja, de uma entrada para uma saída, apenas (AGUIRRE, 2007).

VASCONCELOS, R. S. **Modelagem e Simulação das Correlações de *Scale-Up* Para o Processo de Flotação Por Ar Dissolvido (FAD) Utilizando Análise Dimensional.**

Quando o parâmetro diz respeito aos modelos determinísticos e estocásticos, os autores Garcia (2005); Aguirre (2007) concordam que os modelos determinísticos são aqueles em que as variáveis e parâmetros são tratados como não variáveis aleatórias. Os modelos estocásticos lidam com as diversas fontes de incertezas presentes em qualquer situação real por meio do uso de variáveis aleatórias. Consequentemente, a saída de um modelo estocástico não é, a rigor, um número determinístico, mas sim uma variável aleatória. Deste modo, os modelos estocásticos incluem elementos randômicos como parte do modelo, e desta forma, as previsões tem uma distribuição de probabilidade associada. O problema com estes modelos é que pode ser difícil sua construção e avaliação (MANRIQUE, 2012).

Os modelos mecanísticos proporcionam um grau de entendimento ou explicação de um problema que está sendo modelado (THORNLEY; FRANCE apud MANRIQUE, 2012). Os métodos mecanicistas visam o desenvolvimento de soluções analíticas descritivas do escoamento a partir dos conceitos básicos da mecânica dos fluidos (PACHECO et al., 2007).

Os modelos empíricos, de acordo com Thornley; France (2007) descrevem as respostas de desempenho de um sistema, habitualmente utilizando equações matemáticas ou estatísticas sem nenhuma interpretação biológica dos parâmetros e sem as restrições dos princípios científicos. Segundo Pacheco et al., (2007), o desenvolvimento empírico consiste na obtenção de correlações por meio da análise de dados experimentais. Os modelos empíricos têm sua aplicação restrita às faixas de diâmetros, vazões e propriedades de fluidos testados para ajuste do modelo. Por outro lado, têm como vantagem a possibilidade de serem aplicados, independente do conhecimento do padrão de escoamento (SOUZA, 2010). Um modelo empírico é construído a partir de uma análise estatística de observações experimentais, utilizando técnicas de regressão. Esses modelos são utilizados em situações onde não há base teórica para alguma fundamentação a respeito da relação existente entre as variáveis do sistema (FINKLER, 2003).

VASCONCELOS, R. S. **Modelagem e Simulação das Correlações de *Scale-Up* Para o Processo de Flotação Por Ar Dissolvido (FAD) Utilizando Análise Dimensional.**

O modelo fenomenológico é baseado no conhecimento dos processos físicos e químicos que estão por trás do sistema em estudo, tais como os princípios da termodinâmica e as leis da conservação da massa, da energia e da quantidade de movimento. Embora sejam baseados em fundamentações teóricas, muitos modelos fenomenológicos também recorrem a observações experimentais para a obtenção de parâmetros. Souza (2010) comenta que os modelos fenomenológicos têm uma aplicação mais ampla já que são baseados na descrição das leis físicas que caracterizam a dinâmica dos fluidos. No entanto, dependem de equações de fechamento empíricas, que por sua vez são diferentes para cada padrão de escoamento (FINKLER, 2003).

O sucesso das instalações industriais depende substancialmente das bases consideradas no *scale-up* e do projeto do equipamento. O primeiro passo consiste na realização de testes em uma unidade piloto que permita avaliar as condições operacionais (OLIVEIRA; AQUINO, 2006).

Os parâmetros definidos nos testes piloto são aplicados a modelos matemáticos específicos que permitem o *scale-up* e projeto final (OLIVEIRA; AQUINO, 2006).

Atualmente, as indústrias de médio e grande porte estão cada vez mais buscando soluções através do uso extensivo da *Computational Fluid Dynamics* (CFD) no desenvolvimento e na otimização de seus produtos, uma vez que usando esta ferramenta pode-se prever o desempenho de um novo equipamento antes de o mesmo ser fabricado ou implementado (TU; YEOH; CHAOQUN, 2008).

### **3.2 Metodologia de CFD**

A *Computational Fluid Dynamics* (CFD) ou Fluidodinâmica Computacional é uma ferramenta poderosa, aplicada tanto no projeto de engenharia como na investigação e desenvolvimento de uma base de conhecimentos para auxiliar em

VASCONCELOS, R. S. **Modelagem e Simulação das Correlações de *Scale-Up* Para o Processo de Flotação Por Ar Dissolvido (FAD) Utilizando Análise Dimensional.**

novos projetos. A utilização desse conjunto de ferramentas tem se destacado, nos últimos anos, em função da possibilidade de fornecer resultados com maior acurácia para situações com escoamentos complexos, onde o acesso a instrumentação de equipamentos industriais se torna difícil (OLIVEIRA et al., 2010).

As soluções de problemas práticos em dinâmica dos fluidos eram, antes do surgimento dos computadores, de exclusividade da pesquisa experimental, que, através de observações em laboratórios, estudava situações próximas da realidade. Por outro lado, os pesquisadores teóricos se restringiam à resolução de problemas bem formulados e bastante simplificados, geralmente fazendo uso de modelos analíticos. Com o advento dos computadores e a intensificação da pesquisa na área da análise numérica, surgiu um segmento direcionado ao estudo da dinâmica dos fluidos que atualmente é conhecida como Dinâmica de Fluido Computacional, ou CFD (PIAIA, 2009).

O termo Fluidodinâmica Computacional pode ser descrito de forma generalizada, como a simulação numérica de todos aqueles processos físicos e/ou físico-químicos que apresentam escoamento. A predição dos campos de concentração, velocidades, pressão, temperaturas, propriedades em regime turbulento e outras, são efetuadas através de modelos microscópicos baseados nos princípios gerais de conservação da massa, da energia e da quantidade de movimento, nos domínios do espaço e do tempo. No campo da aerodinâmica, por exemplo, todos esses fenômenos são governados pela equação de Navier-Stokes (FONTES et al., 2005).

Ao longo dos anos, as equações de Navier-Stokes foram inseridas nos modelos, mas ainda sob hipóteses muito simplificadoras devido à limitação de recursos computacionais. Porém, na década de 90, com o avanço na capacidade de processamento computacional, trabalhos mais elaborados foram apresentados (CAPELA apud NASCIMENTO, 2008).

VASCONCELOS, R. S. **Modelagem e Simulação das Correlações de *Scale-Up* Para o Processo de Flotação Por Ar Dissolvido (FAD) Utilizando Análise Dimensional.**

Simulação em CFD é utilizada por Químicos, Físicos, Engenheiros ou Arquitetos para prever o comportamento de um produto, processo, material em determinadas condições assumidas ou aferidas ou até mesmo avaliar o conforto ambiental de instalações (SOUZA, 2009). Para um problema típico de hidrodinâmica, um modelo matemático é estabelecido com base nas equações de conservação da quantidade de movimento, da massa e da energia. Estas equações, quando submetidas a condições de contorno apropriadas, representam, matematicamente, um problema particular. A solução analítica destas equações somente é possível para escoamentos muito simples. Para se analisar problemas reais, lança-se mão do uso dos chamados métodos numéricos, através de técnicas de CFD (NASCIMENTO, 2008).

Nos casos de escoamentos laminares, os modelos são simples, pois as equações de Navier-Stokes, conservação da massa e conservação de energia podem ser resolvidas. Contudo, como a maioria dos escoamentos que acontecem na natureza e no meio industrial são turbulentos, estes têm um alto grau de complexidade e, portanto, deve-se lançar mão de modelos matemáticos de turbulência. A turbulência ainda é um grande desafio para os pesquisadores, pois os escoamentos turbulentos são instáveis e contém flutuações que são dependentes do tempo e do espaço (NASCIMENTO, 2008).

A importância das técnicas de simulação, em especial, as de fluidodinâmica se deve a diversas razões tais como: a possibilidade de fornecer informações muito mais detalhadas do que as obtidas através de medições; investigação de situações de risco que não podem ser reproduzidas ou geradas, como explosões, falhas em processos e; os parâmetros fornecidos são mais facilmente variados em uma larga faixa, o que simplifica a otimização e o projeto de equipamentos e evita transtornos operacionais (SOUZA, 2009).

A indústria aerodinâmica foi a principal impulsionadora dos estudos e do avanço da fluidodinâmica computacional e, por exemplo, a solução do

escoamento turbulento supersônico sobre um aerofólio que na década de 60 consumiria um tempo de computação de aproximadamente 30 anos e um custo de 10 milhões de dólares, usando computadores do tipo IBM 704, nos dias de hoje, utilizando os computadores atuais, não iriam requerer mais do que minutos de CPU com custo de centenas de dólares (MALISKA, 1995).

A transferência de *momentum* num fluido envolve o estudo do movimento do mesmo e as forças que produzem esse movimento. Da segunda lei de Newton, sabe-se que a força é diretamente relacionada com a taxa de variação do momento do sistema. Por outro lado, excluindo-se a ação das forças que atuam a distância, tal como a gravidade, as forças que atuam num fluido são devido a pressão ou ao tensor cisalhamento. Pode-se mostrar que essas forças são resultantes de uma transferência microscópica (molecular) de *momentum* (COSTA-MATOS, 1995; INCROPERA, 2008; SOUSA et al., 2011).

A equação de Navier-Stokes é a forma diferencial da segunda lei de Newton aplicada ao movimento de um fluido incompressível, em fluxo laminar com viscosidade constante. Estas equações diferenciais parciais foram desenvolvidas no início do século dezanove e não possuem nenhuma solução analítica geral conhecida, porém podem ser discretizadas e estimadas numericamente (COELHO, 2011). Na sua forma mais geral o movimento do fluido é representado pelas equações de Cauchy, listadas nas equações (1, 2 e 3), em coordenadas cartesianas (BIRD; STEWART; LIGHTFOOT, 2002; YUMUS; CIMBALA, 2006):

$$\rho \frac{Du}{Dt} = \rho g_x + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} \quad (1)$$

$$\rho \frac{Dv}{Dt} = \rho g_y + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} \quad (2)$$

VASCONCELOS, R. S. **Modelagem e Simulação das Correlações de *Scale-Up* Para o Processo de Flotação Por Ar Dissolvido (FAD) Utilizando Análise Dimensional.**

$$\rho \frac{Dw}{Dt} = \rho g_z + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} \quad (3)$$

Em que:

$$\frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z}, \quad \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z}, \quad \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} : \text{Componentes}$$

cisalhantes de tensão nas coordenadas x, y e z, respectivamente;

$\rho g_x, \rho g_y, \rho g_z$  : Peso do corpo (Partículas nas direções x, y e z)

$\rho \frac{Du}{Dt}$  : Aceleração

As equações, descritas anteriormente, são aplicadas a qualquer fluido. Se a relação de Stokes é usada para relacionar a tensão de cisalhamento para uma partícula fluida, para fluidos newtonianos (BROOKS; HUGHES, 1982), então as equações são:

$$\sigma_{xx} = -p + \tau_{xx} \quad (4)$$

$$\tau_x = \mu \cdot \frac{\partial u}{\partial x} \therefore \tau_{xx} = 2 \cdot \tau_x = 2 \cdot \mu \cdot \frac{\partial u}{\partial x} \quad (5)$$

$$\tau_y = \mu \cdot \frac{\partial v}{\partial y} \therefore \tau_{yy} = 2 \cdot \tau_y = 2 \cdot \mu \cdot \frac{\partial v}{\partial y} \quad (6)$$

VASCONCELOS, R. S. **Modelagem e Simulação das Correlações de *Scale-Up* Para o Processo de Flotação Por Ar Dissolvido (FAD) Utilizando Análise Dimensional.**

$$\tau_z = \mu \cdot \frac{\partial w}{\partial z} \therefore \tau_{zz} = 2 \cdot \tau_z = 2 \cdot \mu \cdot \frac{\partial w}{\partial z} \quad (7)$$

$$\tau_{yx} = \tau_{xy} = \mu \cdot \left( \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) \quad (8)$$

$$\tau_{zx} = \tau_{xz} = \mu \cdot \left( \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right) \quad (9)$$

$$\tau_{zy} = \tau_{yz} = \mu \cdot \left( \frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \right) \quad (10)$$

São obtidas as equações para o movimento do fluido que são chamadas de Equações de Navier-Stokes, dadas por (BROOKS; HUGHES, 1982).

$$\rho \frac{Du}{Dt} = \rho g_x - \frac{\partial P}{\partial x} - \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{2}{3} \mu \nabla \cdot \mathbf{u} \right) + \nabla \cdot \left( \mu \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial x} \right) + \nabla \cdot (\mu \nabla \mathbf{u}) \quad (11)$$

$$\rho \frac{Dv}{Dt} = \rho g_y - \frac{\partial P}{\partial y} - \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{2}{3} \mu \nabla \cdot \mathbf{v} \right) + \nabla \cdot \left( \mu \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial y} \right) + \nabla \cdot (\mu \nabla \mathbf{v}) \quad (12)$$

$$\rho \frac{Dw}{Dt} = \rho g_z - \frac{\partial P}{\partial z} - \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{2}{3} \mu \nabla \cdot \mathbf{w} \right) + \nabla \cdot \left( \mu \frac{\partial \mathbf{w}}{\partial z} \right) + \nabla \cdot (\mu \nabla \mathbf{w}) \quad (13)$$

VASCONCELOS, R. S. **Modelagem e Simulação das Correlações de *Scale-Up* Para o Processo de Flotação Por Ar Dissolvido (FAD) Utilizando Análise Dimensional.**

Por outro lado, para fluidos incompressíveis, com propriedades constantes, regime de operação laminar e permanente tem-se as Equações de conservação de massa, Eq. (14), Navier-Stokes, Eqs. (15, 16 e 17) e energia, Eq. (18), em coordenadas cartesianas, que são apresentadas na sequência (HOLLWEG, 2012):

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (14)$$

Com essa condição, Hollweg (2012) mostra a simplificação das Equações de Navier-Stokes e energia:

$$\text{Comp. x: } \rho \cdot \left( \frac{\partial u}{\partial t} + u \cdot \frac{\partial u}{\partial x} + v \cdot \frac{\partial u}{\partial y} + w \cdot \frac{\partial u}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu \cdot \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) + \rho g_x \quad (15)$$

$$\text{Comp. y: } \rho \cdot \left( \frac{\partial v}{\partial t} + u \cdot \frac{\partial v}{\partial x} + v \cdot \frac{\partial v}{\partial y} + w \cdot \frac{\partial v}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \mu \cdot \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) + \rho g_y \quad (16)$$

$$\text{Comp. z: } \rho \cdot \left( \frac{\partial w}{\partial t} + u \cdot \frac{\partial w}{\partial x} + v \cdot \frac{\partial w}{\partial y} + w \cdot \frac{\partial w}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \mu \cdot \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) + \rho g_z \quad (17)$$

Em que:

$$\text{Comp. x: } \rho \cdot \frac{\partial u}{\partial t}, \text{ Comp. y: } \rho \cdot \frac{\partial v}{\partial t}, \text{ Comp. z: } \rho \cdot \frac{\partial w}{\partial t} : \text{Componentes transientes}$$

das velocidades dos fluidos nas direções x, y e z, respectivamente.

VASCONCELOS, R. S. **Modelagem e Simulação das Correlações de *Scale-Up* Para o Processo de Flotação Por Ar Dissolvido (FAD) Utilizando Análise Dimensional.**

$$u \cdot \frac{\partial u}{\partial x} + v \cdot \frac{\partial u}{\partial y} + w \cdot \frac{\partial u}{\partial z} : \text{Componentes convectivos da velocidade}$$

(comportamento no espaço em x);

$$u \cdot \frac{\partial v}{\partial x} + v \cdot \frac{\partial v}{\partial y} + w \cdot \frac{\partial v}{\partial z} : \text{Componentes convectivos da velocidade}$$

(comportamento no espaço em y);

$$u \cdot \frac{\partial w}{\partial x} + v \cdot \frac{\partial w}{\partial y} + w \cdot \frac{\partial w}{\partial z} : \text{Componentes convectivos da velocidade}$$

(comportamento no espaço em z);

$$-\frac{\partial p}{\partial x} : \text{Componente da variação de pressão no espaço em x;}$$

$$-\frac{\partial p}{\partial y} : \text{Componente da variação de pressão no espaço em y;}$$

$$-\frac{\partial p}{\partial z} : \text{Componente da variação de pressão no espaço em z;}$$

$$\mu \cdot \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right), \mu \cdot \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right), \mu \cdot \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) :$$

Componentes das dissipações viscosas em x, y e z, respectivamente.

$\rho g_x$  : Peso do corpo (peso da partícula na direção x);

VASCONCELOS, R. S. **Modelagem e Simulação das Correlações de *Scale-Up* Para o Processo de Flotação Por Ar Dissolvido (FAD) Utilizando Análise Dimensional.**

$\rho g_y$  : Peso do corpo (peso da partícula na direção y);

$\rho g_z$  : Peso do corpo (peso da partícula na direção z).

Escrevendo-se essas equações numa forma vetorial fica:

$$\rho \cdot \frac{D\vec{v}}{dt} = -\nabla p + \mu \nabla^2 \vec{v} + \rho \vec{g} \quad (18)$$

As hipóteses assumidas na equação de Navier-Stokes são:

- Fluido incompressível;
- viscosidade constante e;
- fluxo laminar.

A necessidade do conhecimento detalhado da fluidodinâmica abordada anteriormente, em certos tipos de processos, pode ser fundamentada na seguinte premissa: a partir do ponto de vista da engenharia das reações químicas, modelos fluidodinâmicos são exigidos para uma apropriada descrição da mistura dos fluidos e formas de contato, isto é, eles modelam o caminho pelo qual os materiais escoam através do reator (SOKOLICHIN; EIGENBERGER, 1999).

O escoamento líquido-gás é largamente empregado nas mais diversas indústrias de processos devido, principalmente, ao baixo consumo de energia para o transporte de particulados via arraste por uma corrente (DECKER et al., 2010).

Segundo Decker (2003), detalhes do comportamento do escoamento não são totalmente conhecidos. Dentre eles pode-se salientar a influência da geometria sobre o escoamento multifásico. Para isso, o pesquisador tem a sua disposição três ferramentas para desenvolver ou analisar esse tipo de problema: métodos analíticos, métodos numéricos e experimentação laboratorial. Os

VASCONCELOS, R. S. **Modelagem e Simulação das Correlações de *Scale-Up* Para o Processo de Flotação Por Ar Dissolvido (FAD) Utilizando Análise Dimensional.**

métodos analíticos e os métodos numéricos formam a classe de métodos teóricos, pois ambos têm o objetivo de resolver as equações diferenciais que compõem o modelo matemático abordado (SOUSA et al., 2011).

A diferença entre esses métodos encontra-se na complexidade dos modelos para os quais cada método pode ser empregado. Os métodos da AFD (*Analytical Fluid Dynamics*) são aplicáveis apenas a geometrias e condições de contorno simples, ou situações em que as hipóteses simplificadoras requeridas não se desviam demasiadamente do fenômeno físico real (MALISKA, 1995).

Silva (2006) aponta que algumas de suas mais importantes aplicações tornam-se então o auxílio na validação de casos limites de métodos numéricos e o desenvolvimento de métodos numéricos mais robustos. A simulação numérica pode ser utilizada para solução de modelos complexos, definidos para geometrias também complexas e apresentando resultados dentro de intervalos de tempo muito pequenos. O tempo e o custo de um novo projeto ou a otimização de sistemas já existentes podem ser reduzidos com o uso da simulação numérica.

A grande vantagem da experimentação em laboratório, ou da EFD (*Experimental Fluid Dynamics*) é lidar com a configuração real. É, entretanto, de altíssimo custo e muitas vezes não pode ser posta em prática por questões de segurança ou pelas dificuldades de reprodução das condições reais. Entretanto, na ausência de modelos matemáticos para geometrias muito complexas, essa é, atualmente, a única ferramenta disponível. O que deve ser praticado na Engenharia é uma associação adequada de simulação numérica com experimentos selecionados em laboratório. Essa união resulta em projetos melhores e mais baratos (RIBEIRO, 2012).

### **3.3 Escoamento Multifásico e Suas Abordagens**

A simulação computacional de escoamentos multifásicos com detalhamento suficiente para capturar as escalas turbulentas e a forma das partículas ainda está distante das aplicações em escala industrial (SILVA, 2010; SANT'ANNA, 2012).

A modelagem de escoamentos multifásicos é dividida em dois grandes grupos: modelos com escoamento entre as fases e modelos sem escoamento entre as fases. Os modelos sem escoamento entre as fases utilizam um único campo de velocidade para as duas fases; neste caso, possuem aplicações como a modelagem de Superfície Livre. Dentre os modelos com escoamento entre as fases, ou seja, com mais um campo de velocidade, podemos subdividir os grupos novamente em dois: Euleriano-Euleriano e Euleriano-Lagrangeano (SANT'ANNA, 2012).

No primeiro caso, tanto a fase contínua quanto a dispersa são consideradas como meios contínuos, onde um sistema de referência Euleriano é utilizado para a dedução das equações governantes. Na abordagem Euleriana-Lagrangeana ou, simplesmente, Lagrangeana, como é chamada na literatura, é resolvida uma equação da conservação da quantidade de movimento para cada partícula, em um sistema de referência que se movimenta com a partícula (Lagrangeano). Evidentemente, esta abordagem restringe-se apenas a sistemas dispersos (PALADINO, 2005). Silva (2010) enfatiza que as duas abordagens, citadas acima, resolvem um sistema de equação de conservação da quantidade de movimento, calor e massa para a fase contínua, diferindo entre si, apenas, na modelagem da fase dispersa do sistema.

### **3.4 Análise Dimensional**

A análise dimensional é, basicamente, um método para reduzir o número e a complexidade das variáveis experimentais que afetam um dado fenômeno físico, pela aplicação da técnica de compactação. Se um fenômeno depende de  $n$  variáveis dimensionais, a análise dimensional reduzirá o problema a apenas  $k$

VASCONCELOS, R. S. **Modelagem e Simulação das Correlações de *Scale-Up* Para o Processo de Flotação Por Ar Dissolvido (FAD) Utilizando Análise Dimensional.**

variáveis adimensionais, são os chamados números adimensionais, em que a redução  $n - k = 1, 2, 3$  ou  $4$  dependendo da complexidade do problema. Geralmente,  $n - k$  é igual ao número de dimensões diferentes que regem o problema (BATISTA; MOZOLEVSKI, 2010; WHITE, 2010).

Embora a finalidade da análise dimensional seja reduzir as variáveis e agrupá-las em forma adimensional, este tipo de análise tem ainda vários benefícios adicionais (BARENBLATT, 1996; CARDOSO, 2010). O primeiro desses benefícios é uma economia de tempo e dinheiro; um segundo benefício é que ela ajuda nos assuntos relativos ao raciocínio e planejamento para um experimento ou uma teoria, sugerindo maneiras adimensionais de escrever equações antes de destinarmos dinheiro para análises numéricas a fim de encontrar soluções adequadas; um terceiro benefício é que a análise dimensional fornece as leis de escala que permitem converter dados de um modelo pequeno e barato para obter as informações para um protótipo maior e mais oneroso (WHITE, 2010).

Pode-se observar a aplicação deste princípio em certas situações onde diversas variáveis envolvidas num fenômeno físico em estudo devam ser agrupadas empiricamente e não de forma analítica. Em situações tais, em que não se conhece a equação diferencial pertinente, os métodos de análise dimensional tais como o método de *Buckingham*, por exemplo, são aplicados tomando-se por base o Princípio da Homogeneidade Dimensional (BENNETT; MYERS, 1978):

Qualquer equação que descreva completamente um fenômeno físico deve ser válida, independente das unidades de medida, desde que a dimensão de todos os termos da equação seja a mesma e, ainda, desde que não seja afetada por derivações ou integrações.

Assim sendo, estes métodos baseiam-se na premissa de que qualquer equação que represente o comportamento de um sistema deve ser de modo dimensional e homogêneo e, portanto, podendo ser descrito sob a forma de grupos adimensionais (BENNETT; MYERS, 1978).

VASCONCELOS, R. S. **Modelagem e Simulação das Correlações de *Scale-Up* Para o Processo de Flotação Por Ar Dissolvido (FAD) Utilizando Análise Dimensional.**

Dados científicos mostram que o teorema *Pi de Buckingham* torna possível determinar quais são os grupos adimensionais importantes para o problema e prever a relação funcional entre eles (BUCKINGHAM, 1914). De acordo com Cardoso (2010), o Teorema *Pi de Buckingham* declara que dada uma relação entre  $n$  parâmetros podem ser agrupados em  $n - m$  variáveis adimensionais, onde  $n$  representa o número de variáveis do problema e  $m$  o número de dimensões do sistema de unidades. Desse modo, o primeiro tratamento, considerado o mais rigoroso, é conhecido por *Buckingham*, cujo nome é ligado ao teorema principal (ATHERTON; BATES; WYNN, 2013).

A análise dimensional apresenta-se como uma alternativa interessante, pois se trata de uma ferramenta útil para obter equações que representam determinados fenômenos físicos, a partir de considerações sobre a dimensionalidade das grandezas físicas envolvidas, sem dispor de conhecimento prévio sobre o assunto nem dispor de informações obtidas empiricamente. Além da Engenharia, outras ciências, do cotidiano, lidam com grandezas dimensionais, usualmente consideradas como massa [M], comprimento [L] tempo [t], Temperatura [Θ], ou de maneira abreviada um sistema MLTΘ (CUNHA, 2009).

Garcia-ocha; Gomez (2009) enfatizam que a análise dimensional baseia-se em manter os valores dos grupos adimensionais dos parâmetros constantes durante o aumento de escala (*scale-up*). Os grupos adimensionais utilizados são razões de taxas ou constantes de tempo para os diferentes mecanismos envolvidos. Então, se todos os grupos adimensionais são mantidos constantes, a importância relativa dos mecanismos ou fenômenos envolvidos no processo não vai mudar durante o *scale-up*. Muitas vezes, é impossível manter todos os grupos adimensionais constantes durante esse aumento de escala, por isso, tem de se determinar os grupos mais importantes e minimizar o resto.

Os números adimensionais possuem algumas características, do tipo, expressões algébricas, ou seja, frações, onde tanto o numerador quanto o

denominador são potências de grandezas físicas com a dimensão física total igual à unidade. Por exemplo, o número de Reynolds,  $Re = \frac{D \cdot \rho \cdot V}{\mu}$ , tem dimensão [1], também denotado como [-]. Eles simplificam as equações que regem, tornando ambos os termos sem dimensão. Quando devidamente formados, eles têm interpretação física clara, contribuindo, assim, para a compreensão física do fenômeno em estudo. Além disso, escolhendo as escalas relevantes, indicam os processos dominantes (RUZICKA, 2008).

### 3.4.1 Números adimensionais

Segundo Alves; Costa (2011), um número adimensional é aquele desprovido de qualquer unidade física que o defina, sendo uma grandeza expressa somente pelo seu valor numérico. Nesse caso, a relação entre as unidades de base que constituem a unidade derivada é igual a um e, portanto, a unidade de uma grandeza adimensional é o número 1.

Ainda de acordo com Alves; Costa (2011), muitas vantagens de seu uso são observadas no âmbito industrial. Nas engenharias, os números adimensionais permitem que um resultado em escala laboratorial seja transformado via escala piloto para escala industrial. Esses números têm aplicações muito extensas na Química Técnica, isto é porque a base da descrição de acontecimentos naturais e tecnológicos são as leis que podem ser dadas de diversas formas, como equações algébricas, equações diferenciais, matrizes e valores numéricos. A base das Ciências de Engenharia são equações de balanço que são usadas para descrever os fenômenos de transporte, sendo classificadas em balanços de energia, momentos, calor e matéria.

Ruzicka (2008) afirma que modelar, geralmente, significa encontrar uma descrição de um pequeno sistema modelo em escala laboratorial por análise dimensional, utilizando os números adimensionais, onde com ele é fácil fazer as

VASCONCELOS, R. S. **Modelagem e Simulação das Correlações de *Scale-Up* Para o Processo de Flotação Por Ar Dissolvido (FAD) Utilizando Análise Dimensional.**

medições e transferir o resultado para um sistema semelhante. Sem semelhança, o modelo e protótipo são descrito por duas relações diferentes:

$$\pi^M = \Phi^M(\pi_i^M) \quad (\text{Modelo}) \quad (19)$$

$$\pi^P = \Phi^P(\pi_i^P) \quad (\text{Protótipo}) \quad (20)$$

Com semelhança, temos:

$$\pi^M = \pi^P \quad (\text{Lei de semelhança para o modelo}) \quad (21)$$

$$\pi_i^M = \pi_i^P \quad \forall_i (\text{Critério de semelhança}) \quad \Phi^M = \Phi^P \quad (22)$$

Em que:

$\pi^M$ - Grupo adimensional;

$\forall_i$ - fator de escala;

$\Phi$ - número adimensional;

M,P- modelo e protótipo.

Truter (2010) afirma que os números adimensionais são úteis na medida em que:

- reduzem o número de variáveis necessárias para a descrição do problema, diminuindo, assim a quantidade de dados experimentais e em fazer correlação;
- simplificam as equações que governam;
- produzem estimativas escalares importantes;

VASCONCELOS, R. S. **Modelagem e Simulação das Correlações de *Scale-Up* Para o Processo de Flotação Por Ar Dissolvido (FAD) Utilizando Análise Dimensional.**

- quando devidamente formados, os números adimensionais têm interpretação física clara e, assim, contribuem para a compreensão do fenômeno em estudo.

Conforme Truter (2010), números adimensionais podem ser dispostos em grupos, sendo eles, geométricos, cinemáticos e dinâmicos. A similaridade geométrica de um modelo está relacionada às correspondentes dimensões no protótipo por um fator de escala constante. A similaridade cinemática ocorre quando as velocidades nos pontos correspondentes do modelo e do protótipo estão na mesma direção e suas magnitudes diferem por um fator de escala constante. A similaridade dinâmica é quando as razões das forças envolvidas no escoamento no modelo e no protótipo estão em uma mesma razão diferindo, apenas, por um fator de escala constante em pontos correspondentes.

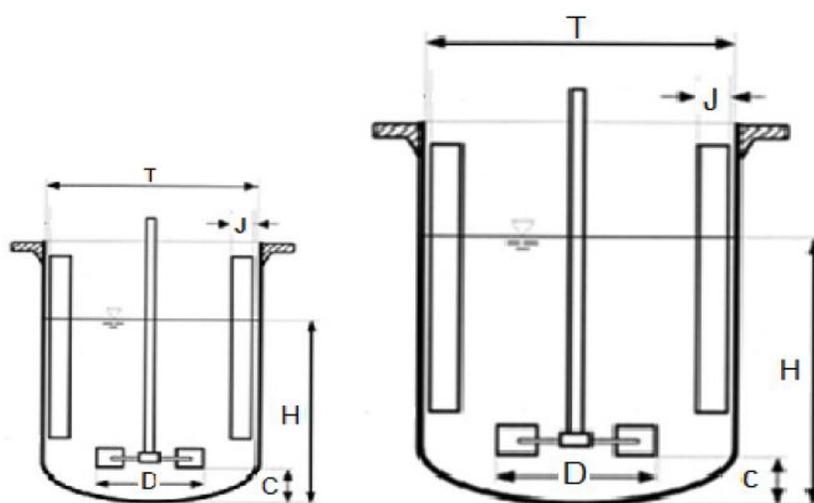
Nos últimos anos, a dinâmica de fluidos computacional tem se mostrado como uma ferramenta eficaz para o estudo da hidrodinâmica e *scale-up* de equipamentos. Estes métodos são muito complicados, sendo necessárias muitas simplificações. No entanto, o desenvolvimento de modelos fundamentais capazes de descrever as características essenciais do sistema é, talvez, o instrumento mais útil para o sucesso do *scale-up* e para a determinação das condições ótimas para a produção em escala (VASCONCELOS et al., 1998; NEDELTCHEV; OOKAWARA; OGAWA, 1999).

### **3.5 Mudança de Escala**

O aumento de escala (*scale-up*) é o processo pelo qual os resultados obtidos em equipamento de pequena porte são utilizados para conceber um equipamento de grandes dimensões (NEWELL; GRANO, 2007; TRIVEDI; SHAH, 2012). Realizar ampliação de escala é um processo difícil e de alto custo, sendo em, alguns casos, praticamente impossível. Alguns autores equivocadamente utilizam somente recursos como a semelhança geométrica entre os equipamentos com mostra a Figura 1, na qual todas as relações entre as dimensões importantes

do tanque menor como o diâmetro do impelidor, altura do nível do líquido, entre outras, são mantidas constantes no tanque maior em relação ao diâmetro do tanque (RAUTZEN; CORPSTEIN; DICKEY, 1976; JOAQUIM Jr. et al., apud SOUSA, 2010).

Figura 1 - Similaridade geométrica entre tanques de diferentes volumes



Fonte: (Adaptada: RAUTZEN; CORPSTEIN; DICKEY apud SOARES, 2010).

### 3.6 Flotação Por Ar Dissolvido - FAD

O processo de flotação é uma técnica de separação que tem por finalidade separar sólidos ou líquidos de uma fase líquida através da introdução no sistema de pequenas bolhas de ar (REALI, 1991). Os agregados formados, segundo Magagnin (2012), apresentam uma densidade aparente menor do que a do meio aquoso e “flutuam” até a superfície de um reator, que é denominado célula de flotação, onde são removidos.

Dentre os métodos de flotação, o que tem maior aplicação no setor de saneamento e tratamento de águas e efluentes é a flotação por ar dissolvido

VASCONCELOS, R. S. **Modelagem e Simulação das Correlações de *Scale-Up* Para o Processo de Flotação Por Ar Dissolvido (FAD) Utilizando Análise Dimensional.**

(FAD) que utiliza bolhas de ar de dimensões micrométricas (30 – 100  $\mu\text{m}$ ), possibilitando a remoção de partículas coloidais e ultrafinas (< 5  $\mu\text{m}$ ). Um dos fatores essenciais que determinam o sucesso de sistemas FAD é o tamanho das microbolhas de ar presentes no flotador. É importante que a “nuvem” de microbolhas de ar produzidas na entrada das unidades FAD seja uniformemente distribuída (REALI, 1991).

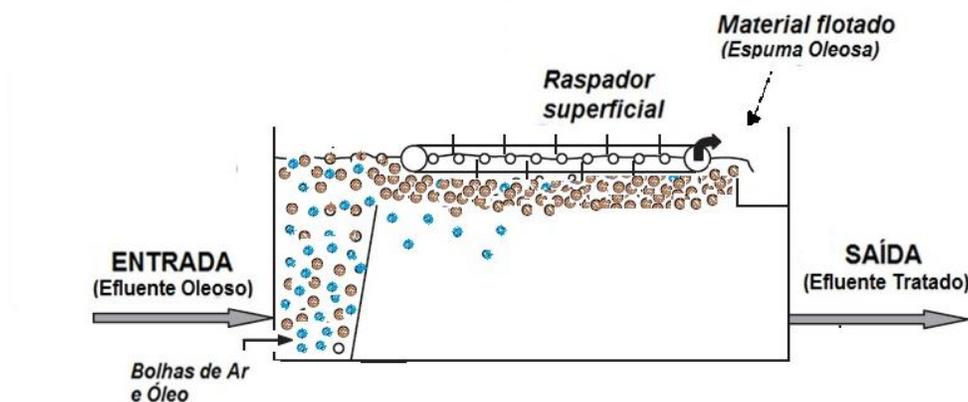
A FAD é amplamente empregada em diversos setores industriais, destacando-se na indústria do papel, indústria de processamento de alimentos, indústria petroquímica, unidades de tratamento de água potável e sistemas de espessamento de lodos industriais e municipais (SOLARI, 1981).

Entre as diversas aplicações destacam-se a remoção de sólidos, íons, precipitados, macromoléculas, micro-organismos, tintas, fibras, óleos e outros materiais da água, redução de DBO e DQO e para espessamento de lodo (RODRIGUES, 2004).

Com o desenvolvimento das pesquisas, os parâmetros para o processo de flotação por ar dissolvido vêm sendo consolidados, tornando esse processo ambientalmente confiável e técnico-economicamente viável, se comparado com outras alternativas de separação de sólidos e líquidos, e largamente empregado em vários campos do tratamento de águas e de efluentes em todo o mundo (COUTINHO, 2007).

Os princípios básicos de funcionamento do processo de flotação por ar dissolvido, embora simples, pois se resumem no contato das partículas sólidas com as bolhas de ar dissolvidas no líquido e no seu conseqüente arraste para a superfície da célula de flotação, como mostra a Figura 2, dependem de um cuidadoso controle dos parâmetros de projeto, determinados em função das características do afluente a ser tratado (EDZWALD, 1993).

Figura 2 - Esquema genérico do sistema de flotação por ar dissolvido (FAD)



Fonte: (Adaptada: BEHIN; BAHRAMI, 2012).

De acordo com Coutinho (2007), dentre esses parâmetros destacam-se a taxa de aplicação superficial de flotação, o tempo de detenção no tanque de flotação, o tamanho das bolhas, a taxa de recirculação do líquido pressurizado com ar, a pressão na câmara de saturação e, a quantidade de ar fornecida em relação à massa de sólidos em suspensão no líquido.

A utilização do sistema de flotação por ar dissolvido se torna uma melhor opção, uma vez que, quando comparado a outros processos de separação apresentam vantagens como, coagulação e sedimentação. Apresentam ainda baixo custo inicial de investimentos em instalações e equipamentos; maior concentração de sólidos nos produtos separados; elevada eficiência na remoção de sólidos; menor área requerida para instalação dos equipamentos; mais eficiência na remoção de DBO (TESSELE; RÚBIO, 2004).

Métodos de *Scale-up* para o projeto de células de flotação foram baseados, principalmente, em semelhança dinâmica e análise dimensional com o uso de números adimensionais, a fim de chegar a condições semelhantes em diferentes escalas (YIANATOS et al., 2010).

### **3.7 *Scale-up* na Flotação**

Tempos atrás, para o *scale-up*, utilizavam-se fatores baseados na proporção de tamanhos, considerando-se máquinas, em diferentes escalas, com similaridade geométrica. Atualmente, os procedimentos para *scale-up* incluem análises de hidrodinâmica, permitindo uma melhor compreensão da influência da potência do equipamento e do nível de mistura. São realizados, ainda, estudos computacionais da fluidodinâmica do processo para validação do arranjo, em alguns casos, antes da máquina ser construída, além de empregarem os modelos para simulação do processo de flotação (LOYOLA, 2006).

Na flotação, é complexo se fazer um *scale-up* devido aos diferentes fatores que afetam as condições de hidrodinâmica (geometria da célula, consumo de energia, dissipação energética), cinética (distribuição de tamanho das bolhas e partículas), condições operacionais (fluxo de ar, nível da polpa, tipo e dosagem de reagentes) e transporte tanto na polpa quanto na zona de espuma (YIANATOS; BERGH; AGUILERA, 2003; YIANATOS; HENRÍQUEZ; OROZ, 2006).

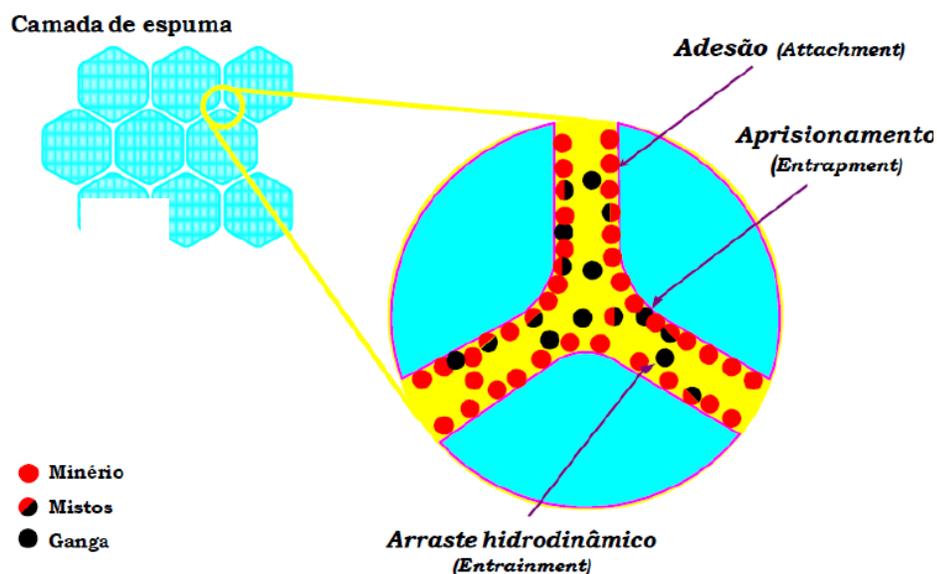
De maneira a estimar o comportamento ideal do processo de flotação, Yianatos; Henríquez apud Loyola (2006) propõem a realização de ensaios em escala de laboratório, uma vez que são mais simples e requerem menos amostra representativa que uma planta contínua. Já Santos et al. (2005) propõem a realização de ensaios em escala de bancada para o estabelecimento dos parâmetros necessários e subsequente operação de uma planta piloto de flotação para obtenção de dados mais acurados para o *scale-up*.

### **3.8 Movimento de Corpos num Fluido**

O fenômeno de arraste hidráulico (*entrainment*) é um importante mecanismo de recuperação na flotação, principalmente para partículas de granulometria inferior. É definido como o transporte ou arraste de partículas para a fase espuma, por meio de uma quantidade de água existente entre as bolhas de

ar, ou nos interstícios dos agregados de partículas com bolhas. Com a diminuição do tamanho e da massa das partículas minerais, o efeito da força gravitacional se torna desprezível, fazendo com que as partículas não se sedimentem e passem a fazer parte da fase líquida. Dessa forma, ficam diretamente relacionadas com o escoamento de água no sistema (SANTOS, 2005) e suscetíveis a sofrerem este arraste hidrodinâmico (SANTANA, 2011).

Figura 3 - Mecanismo de recuperação



Fonte: SANTANA, 2011

Quando partículas e/ou bolhas de ar estão se movendo em relação ao fluido, elas ficam sujeitas a uma determinada força de resistência ao movimento ou de arraste. Tal força é resultante de duas outras componentes (RODRIGUES, 2010): uma componente gerada pela ação do cisalhamento, chamada arraste de parede ou atrito pelicular e outra componente oriunda da pressão do fluido sobre a superfície do corpo, denominada arraste de forma.

VASCONCELOS, R. S. **Modelagem e Simulação das Correlações de *Scale-Up* Para o Processo de Flotação Por Ar Dissolvido (FAD) Utilizando Análise Dimensional.**

O arraste total na superfície de uma partícula é a soma do arraste pelicular e o arraste de forma na direção do escoamento do fluido. Por conseguinte, o mecanismo de transferência de quantidade de movimento ou energia do fluido para partícula apresenta um componente viscoso (fricção pelicular) e outro turbulento (diferença de pressão) (BIRD; STEWART; LIGHTFOOT, 1960; DICKEY; FENIC, 1976; FOUST et al., 1982). A razão entre a quantidade de movimento total transferida à partícula e quantidade do componente turbulento, define-se um número adimensional chamado fator de atrito ou coeficiente de arraste ( $C_D$ ), expresso pela Equação 23 que descreve a transferência de quantidade de movimento numa fronteira sólido-líquido (RODRIGUES, 2010).

$$C_D = \frac{F_D}{\left(\frac{\rho v^2}{2}\right) \cdot A} \quad (23)$$

Em que:

$C_D$  = Coeficiente de arraste;

$F_D$  = força de arraste no corpo;

$\rho$  = densidade do fluido;

$v$  = velocidade na direção do escoamento;

$A$  = área da seção transversal do corpo

VASCONCELOS, R. S. **Modelagem e Simulação das Correlações de *Scale-Up* Para o Processo de Flotação Por Ar Dissolvido (FAD) Utilizando Análise Dimensional.**

#### 4 REFERÊNCIAS

AGARWAL, A.; JERN NG, W.; LIU, Y. Principles and application of microbubble and nanobubble technology for water treatment. **Chemosphere**, v. 84, n. 9, p. 1175 - 1180, 2011.

AGUIRRE, L. A. **Introdução à identificação de sistemas-técnicos lineares e não-lineares aplicados a sistemas reais.** 3ª Ed. Revisada e ampliada. Belo Horizonte, Editora UFMG, 2007, 730 p.

ALBUQUERQUE, C. F., LUNA-FINKLER, C. F., RUFINO, D. R., LUNA, J. M., MENEZES, C. T. B., SANTOS, V. A., SARUBBO, L. A., Evaluation of biosurfactants for removal of heavy metal ions from aqueous effluent using flotation techniques. **International Review of Chemical Engineering** (Testo Stampato), v. 4, n. 2, p. 156 - 161, 2012.

ALVES, H. M. V.; COSTA, H. V. **Números adimensionais na Engenharia Química.** 2011. Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET/MG, Campus VII – Timóteo. 2011.

ATHERTON, M. A.; BATES, R. A.; WYNN, H. P. Dimensional analysis using toric ideals. **Journal of the Franklin Institute**, v. 1, (arxiv:1304.6659), 2013.

BARENBLATT, G. I. **Scaling, self-similarity, and intermediate asymptotics.** 1º Ed, New York, Cambridge University Press, 1996, 386 p.

BASSANEZI, R. Modelagem Matemática. In: **Dynamis**, Blumenau, v. 2, n. 7, p. 55 – 83, 1994.

BATISTA, E.; MOZOLEVSKI, I. **Métodos de Física – Matemática.** Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis/SC, 2010, 226 p.

VASCONCELOS, R. S. **Modelagem e Simulação das Correlações de Scale-Up Para o Processo de Flotação Por Ar Dissolvido (FAD) Utilizando Análise Dimensional.**

BAZZO, W. A.; PEREIRA, L. T. V. **Ensino de Engenharia.** Universidade de Santa Catarina, Florianópolis/SC, editora: UFSC, 2000.

BEHIN, J.; BAHRAMI, S. Modeling an industrial dissolved air flotation tank used for separating oil from wastewater. **Chemical Engineering And Processing: Process Intensification.** v. 59, p. 1 – 8, 2012.

BENNETT, C. O.; MYERS, J. E.; **Fenômenos de Transporte – Quantidade de Movimento, Calor e Massa.** Rio de Janeiro, editora: McGraw-Hill do Brasil Ltda, 1978.

BIRD, R. B.; STEWART, W. E.; LIGHTFOOT, E. N. **Transport Phenomena.** New York, John Wiley & Sons, 1960, 780 p.

BIRD, R. B.; STEWART, W. E.; LIGHTFOOT, E. N. **Transport Phenomena.** 2<sup>nd</sup>, New York, John Wiley & Sons, 2002, 914 p.

BROOKS, A. N.; HUGHES, T. J. R. Streamline upwind petrov-galerkin formulation for convection-dominated flows with particular emphasis on the incompressible Navier-Stokes equations. **Computer Methods in Applied Mechanics Engineering,** v. 32, p. 199 - 259, 1982.

BUCKINGHAM, E. On phisycally similar systems, illustrations of the use of dimensional equations. **Physical Review,** v. 4, n. 4, p. 345 - 376, 1914.

BURAK, D. **Modelagem Matemática: uma metodologia alternativa para o ensino de matemática na 5ª série.** 1987. 186 p. Dissertação (Mestrado em Educação Matemática) – Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 1987.

CARDOSO, E. M.; **Intensificação da ebulição nucleada em espaços confinados.** 2010. 139 p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis/SC. 2010.

VASCONCELOS, R. S. **Modelagem e Simulação das Correlações de *Scale-Up* Para o Processo de Flotação Por Ar Dissolvido (FAD) Utilizando Análise Dimensional.**

CLOSE, C. M.; FREDERICK, D. K.; NEWELL, J. C. **Modeling and analysis of dynamic systems.** 3ª Ed., New York, John Wiley & Sons, 2001.

COELHO, D. B. **Desempenho de um hidrociclone para separação de águas oleosas.** 2011. 52 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Química) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal/RN. 2011.

COSTA-MATOS, H. S. On the modelling of momentum and energy transfer in incompressible mixtures. **International Journal of Non-Linear Mechanics**, v. 30, n. 4, p. 419 – 431, 1995.

COUTINHO, W. **Emprego da flotação a ar dissolvido no tratamento de curso d'água: avaliação de desempenho da estação de tratamento dos Córregos Ressaca e Sarandi afluentes à represa do Pampulha.** 2007. 104 p. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Universidade Federal de Minas Gerais. Minas Gerais, 2007.

CUNHA, J. J. **Projeto em escala reduzida do núcleo de um reator PWR em regime de circulação natural otimizado por exame de partículas.** 2009. 114 p. Tese (Doutorado em Engenharia Nuclear) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.

DECKER, R. K. **Modelagem e simulação tridimensional transiente do escoamento gás-sólido.** 2003. 118 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas/SP. 2003.

DECKER, R. K.; MEIER, H. F.; FRITSCHING, U.; MORI, M. Analysis of particle interaction with coherent structures in a two-phase mixing jet. **Multiphase Science And Technology**, v. 22, p. 1 - 30, 2010.

DICKEY, D. S.; FENIC, J. C. Dimensional analysis for fluid agitation systems. **Chemical Engineering**, v. 83, n. 1, p. 139 – 45, 1976.

VASCONCELOS, R. S. **Modelagem e Simulação das Correlações de *Scale-Up* Para o Processo de Flotação Por Ar Dissolvido (FAD) Utilizando Análise Dimensional.**

EDZWALD, J. K. Algae, bubbles, coagulants, and dissolved air flotation. **Water Science And Technology**, v. 27, n. 10, p. 67 – 81, 1993.

FERRUZZI, E. C. **A Modelagem matemática como estratégia de ensino e aprendizagem do cálculo diferencial e integral nos cursos superiores de tecnologia.** 2003. 154 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Produção e Sistemas) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis/SC, 2003.

FINKLER, T. F. **Desenvolvimento de uma ferramenta para obtenção de modelos empíricos.** 2003. 114 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre/SC, 2003.

FONTES, C. E., SILVA, L. F. L. R., LAGE, P. L. C., RODRIGUES, R. C. **Introdução a Fluidodinâmica Computacional.** Escola Piloto Virtual - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.

FORTUNA, A. de O. **Técnicas computacionais para Dinâmica dos Fluidos.** 2<sup>a</sup> Ed., São Paulo, Editora: Edusp, 2000, 426 p.

FOUST, A. S.; WENZEL, L. A.; CLUMP, C. W.; MAUS, L.; ANDERSEN, L. B. **Princípios das Operações Unitárias.** MACEDO, H. (Org.). 2<sup>a</sup> Ed. Rio de Janeiro, Editora: Guanabara Dois, 1982, 670 p.

GARCIA, C. **Modelagem e simulação de processos industriais e de sistemas eletromecânicos.** 2<sup>a</sup> Ed. revisada e ampliada, São Paulo, Editora: Edusp, 2005, 688 p.

GARCIA-OCHOA, F.; GOMEZ, E. Bioreactor *scale-up* and oxygen transfer rate in microbial processes: an overview. **Biotechnology Advances**, v. 27, p. 153 – 176, 2009.

VASCONCELOS, R. S. **Modelagem e Simulação das Correlações de *Scale-Up* Para o Processo de Flotação Por Ar Dissolvido (FAD) Utilizando Análise Dimensional.**

HILGARD, R. E. **O aparecimento dos modelos matemáticos:** Teoria da Aprendizagem. Ed: São Paulo, p. 461 - 508, 1973.

HOLLWEG, F. R. **Análise numérica sobre a influência de variações de seção transversal de microcanais no escoamento laminar.** 2012. 127p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, 2012.

INCROPERA, F. P.; DEWITT, D. P.; BERGMAN, T. L.; LAVINE, A. S. **Fundamentos de transferência de calor e massa.** QUEIROZ, E. M.; PESSOA; F. L. P.(Orgs.). **Apêndice.** 6<sup>a</sup> Ed., Rio de Janeiro, Editora: LTC, 2008, 643 p.

JÁCOME, C. R. F. **Uso de conhecimento prévio na identificação de modelos polinomiais NARMAX.** 1996. 161 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Minas Gerais. Minas Gerais, 1996.

LIMA, R. M. P. **Desidratação osmótica de melão (*Cucumis melo L.*) em soluções de sacarose e de sorbitol.** 2012. 110 p. Tese (Doutorado em Produção Vegetal) – Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro (UENF), Campos dos Goytacazes, 2012.

LJUNG, L. **System identification: theory for the user.** New Jersey, Editora: Englewood, Prentice-Hall, 1987, 255 p.

LOYOLA, L. M. **Avaliação do desempenho da mini planta-piloto de flotação da CVRD: estudo comparativo com plantas industriais.** 2006. 129 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2006.

MAGAGNIN, D. B. **Avaliação da eficiência da aplicação de flotação por ar dissolvido no tratamento primário de efluentes de um abatedouro de aves.**

VASCONCELOS, R. S. **Modelagem e Simulação das Correlações de *Scale-Up* Para o Processo de Flotação Por Ar Dissolvido (FAD) Utilizando Análise Dimensional.**

2012. 74 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Ambiental) – Universidade do Extremo Sul Catarinense, Criciúma, 2012.

MALISKA, C. R. **Transferência de calor e mecânica dos fluidos computacional - fundamentos e coordenadas generalizadas**, LTC – Livros Técnicos e Científicos. 2ª Ed., Rio de Janeiro, Editora: S. A., 1995. 460 p.

MALISKA, C. R., **Transferência de calor e mecânica dos fluidos computacional**, LTC – Livros Técnicos e Científicos. 2ª Ed., Rio de Janeiro, Editora: S. A., 2004.

MANRIQUE, C. H. E. **Modelos não-lineares, alometria e dinâmica de macromoléculas para analisar o crescimento do Acará Bandeira (*Pterophyllum scalare*)**. 2012. 93 p. Dissertação (Mestrado em Aquicultura) – Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 2012.

MASSI, L.; SOUSA, S. R.; LALUCE, C.; JAFELICCI JUNIOR, M. Fundamentos e aplicação da flotação como técnica de separação de misturas. **Química Nova na Escola**, n. 28, p. 1 - 4, 2008.

MENEZES, C. T. B.; BARROS, E. C.; RUFINO, R. D.; LUNA, J. M.; SARUBBO, L. A. Replacing synthetic with microbial surfactants as collectors in the treatment of aqueous effluent produced by acid mine drainage, using the dissolved air flotation technique. **Applied Biochemistry And Biotechnology**, v. 163, p. 540 - 546, 2010.

NASCIMENTO, J. T. **Uso de CFD na otimização das proporções geométricas de um hidrociclone para a separação de dispersões óleo/água provenientes de refinarias**. 2008. 55 p. Projeto de Final de Curso (Graduação em Engenharia Química) – Universidade Federal do Rio de Janeiro – Escola de Química, 2008.

NEDELTCHEV, S.; OOKAWARA, S.; OGAWA, K. A Fundamental approach to bubble column *scale-up* based on quality of mixedness, **Journal Chemical**

VASCONCELOS, R. S. **Modelagem e Simulação das Correlações de *Scale-Up* Para o Processo de Flotação Por Ar Dissolvido (FAD) Utilizando Análise Dimensional.**

**Engineering Jpn**, v. 32, n. 4, p. 431 – 439, 1999.

NEWELL, R.; GRANO, S. Hydrodynamics and *scale-up* in rushton turbine flotation cells: part 1 – cell hydrodynamics. **International Journal of Mineral Processing**, n. 81. p. 224 – 236, 2007.

OLIVEIRA, A. G.; SILVA, G. P.; PETROBRAS, W. G.; ROPELATO, K. O crescimento do uso de fluidodinâmica computacional (CFD) nas tecnologias de destilação, FCC e coqueamento retardado na energia básica de abastecimento da petrobras. **Petro & Química**, n. 343, p. 22 – 26, 2010.

OLIVEIRA, M. L. M.; AQUINO, J. A. Aspectos relevantes das colunas de flotação. **Holos**, Ano 22, p. 44 - 52, 2006.

PACHECO, F.; CAVALCANTE, C. C. P.; MENDES, J. R. P.; BANNWART, A. C.; SERAPIÃO, A. B. S. Identificação de padrões de escoamento multifásico e determinação da perda de carga com auxílio de redes neurais. **In: 4º PDPETRO – CONGRESSO BRASILEIRO DE P & D EM PETRÓLEO E GÁS**, 2007, Campinas/SP. **Resumos...** São Paulo: Pesquisa & Desenvolvimento em Petróleo e Gás, 2007.

PALADINO, E. E. **Estudo do escoamento multifásico em medidores de vazão do tipo pressão diferencial.** 2005. 263 p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis/ SC, 2005.

PIAIA, J. C. Z. **Secagem da linguixa calabresa: experimentação e modelagem 3D aplicadas a fornos industriais.** 2009. 127 p. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis. 2009.

RAMIREZ, M. V. **Simulação da perda de carga e da eficiência da coleta em ciclones através da fluidodinâmica computacional (CFD).** 2009. Dissertação

VASCONCELOS, R. S. **Modelagem e Simulação das Correlações de *Scale-Up* Para o Processo de Flotação Por Ar Dissolvido (FAD) Utilizando Análise Dimensional.**

(Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos/ SP, p.15-16, 2009.

REALI, M. A. P. **Concepção e avaliação de um sistema compacto para tratamento de águas de abastecimento utilizando o processo de flotação por ar dissolvido e filtração com taxa declinante.** 1991. 133 p. 2 v. Tese (Doutorado em Hidráulica e Saneamento) – Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo. São Paulo, 1991.

REHFELDT, M. J. H. **A aplicação de modelos matemáticos em situações-problema empresariais com uso do software *lindo*.** 2009. 206 p. Tese (Doutorado em Informática) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre/ RS, 2009.

RIBEIRO, J, A. **Contribuição ao estudo experimental e em CFD da fluidodinâmica de colunas de bolhas com aplicação na separação de misturas oleosas e processamento mineral por ar dissolvido.** 2012. 243p. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia/ MG, 2012.

RODRIGUES, R. T. **Desenvolvimento da técnica LTM-BSizer para a caracterização de bolhas e avaliação de parâmetros no processo de flotação.** 2004. 133 p. Tese (Doutorado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre/ RS, 2004.

RODRIGUES, W. J. **Mecanismo de flotação de partículas grossas em células mecânicas: influência das variáveis hidrodinâmicas e suas implicações cinéticas.** 2010. 131 p. Tese (Doutorado em Engenharia Mineral) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo. 2010.

RUZICKA, M. C. On dimensionless numbers. **Chemical Engineering Research And Design**, v. 86, p. 835 – 868, 2008.

VASCONCELOS, R. S. **Modelagem e Simulação das Correlações de *Scale-Up* Para o Processo de Flotação Por Ar Dissolvido (FAD) Utilizando Análise Dimensional.**

SANT'ANNA, M. C. S. **Otimização de um misturador estático para a produção de biodiesel.** 2012. 101 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão/ SE, 2012.

SANTANA, R. C. **Efeito da altura da coluna na flotação de minério fosfático em diferentes granulometrias.** 2011. 169 p. Tese (Doutorado em Engenharia Química) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2011.

SANTOS, A. R. **Estudo do comportamento dinâmico de colunas de flotação utilizando técnicas nucleares.** 2005. 134 p. Dissertação (Mestrado em ciência e tecnologia das radiações, minerais e materiais) - Comissão Nacional de Energia Nuclear/Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear (PPG/CDTN), Belo Horizonte/ MG, 2005.

SANTOS, N. A.; GONÇALVES, K. L. C.; ANDRADE, V. L. L.; WYSLOUZU, H.; DÂVILA, G. obtaining metallurgical data from drill core samples using a mini pilot plant. In: **The 19<sup>th</sup> International Mining Congress and Fair of Turkey - IMCET.** Izmir, Turkey. p. 195 - 206, 2005.

SARUBBO, L. A., LUNA, J. M., RUFINO, R. D., FARIAS, C. B. B., SANTOS, V. A. Production of Biosurfactants for application in the removal of hydrophobic contaminants originated by the petroleum industry In: **CHEMICAL ENGINEERING TRANSACTIONS**, Milan. 5<sup>th</sup> International Conference on Safety and Environmental in Process & Power Industry. Milan: The Italian Association of Chemical Engineering, v. 27, 2012a.

SARUBBO, L. A., RUFINO, R. D., LUNA, J. M., FARIAS, C. B. B., SANTOS, V. A. Produção de biossurfactantes para aplicação na remoção de contaminantes ambientais gerados na indústria de petróleo In: **RIO OIL & GAS EXPO AND CONFERENCE**, 2012, Rio de Janeiro. RIO OIL & GAS 30 YEARS. **Resumos...** RIO DE JANEIRO: IBP, 2012b.

VASCONCELOS, R. S. **Modelagem e Simulação das Correlações de *Scale-Up* Para o Processo de Flotação Por Ar Dissolvido (FAD) Utilizando Análise Dimensional.**

SILVA, G. P. **Otimização via fluidodinâmica computacional da configuração de um misturador estático a ser aplicado na produção de biodiesel.** 2010. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Química) – Universidade Federal de Sergipe. São Cristóvão/ SE, 2010.

SILVA, J. F. **Análise experimental e simulação do processo de bioadsorção de metais pesados (Pb, Zn e Ni) através da alga marinha *Sargassum sp.*** 2006. 157 p. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas. 2006.

SOARES, A. A. **Otimização da separação de leveduras da fermentação alcoólica em hidrociclones.** 2010. 39 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Química) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia/ MG, 2010.

SODRÉ, U. **Modelos matemáticos.**– Universidade Estadual de Londrina (UEL), Londrina, 27 p. 2007.

SOKOLICHIN, A.; EIGENBERGER, G. Applicability of the standard k- $\epsilon$  turbulence model to the dynamic simulation of bubble columns: part i. detailed numerical simulations. **Chemical Engineering Science**, v. 54, n. 13 – 14, p. 2273 – 2284, 1999.

SOKOLOWSKI, J. A.; BANKS, C. M. **modeling and simulation fundamentals – theoretical under pinnings and practical domains.** New Jersey, Editora: John Wiley & Sons, 2010.

SOLARI, J. A. **Avanços recentes no tratamento de efluentes por flotação a ar dissolvido.** Engenharia Sanitária, Rio de Janeiro, v. 20, n. 3, p. 332 – 335, 1981.

SOUSA, J. F. A.; OLIVEIRA, L. R.; AZEVEDO, J. L. L.; SOARES, I. D.; MATA, M. M. Uma revisão sobre a turbulência e suas modelagens. **Revista Brasileira Geofísica**, v. 29, n. 1, p. 21 – 41, 2011.

VASCONCELOS, R. S. **Modelagem e Simulação das Correlações de *Scale-Up* Para o Processo de Flotação Por Ar Dissolvido (FAD) Utilizando Análise Dimensional.**

SOUSA, P. R. M. **Escalonamento de tanques condicionadores utilizados no flotação de apatita.** 2010. 134 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.

SOUZA, J. N. M. **Modelagem e simulação de escoamento multifásico em dutos de produção de óleo e gás natural.** 2010. 265 p. Tese (Doutorado em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos) – Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2010.

SOUZA, R. G. S. **Escalonamento bifásico líquido-gás: previsão de gradientes de pressão com a correlação de Lockhart & Martinelli e fluidodinâmica computacional.** 2009. 74 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Química) – Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2009.

TESSELE, F.; RUBIO, J. **Tratamento de efluentes líquidos no setor minero-metalúrgico: Tratamento de Minérios.** Araújo, A.; Valadão, G. (Eds.), Editora da Universidade Federal de Minas Gerais. Minas Gerais, 2004.

THORNLEY, J. H. M.; FRANCE, J. **Mathematical models in agriculture: quantitative methods for the plant, animal and ecological sciences,** 2<sup>a</sup> ed., Wallingford: CABI, 2007, 906 p.

TRIVEDI, B.; SHAH, B. H. Scale-up of API. **International Journal of Scientific Engineering And Technology**, v. 1, n. 2, p. 190 – 196, 2012.

TRUSHIN, A. N.; DMITRIEV, E. A.; AKIMOV, V. V., Mechanism of formation of the microbubbles in gas dispersion through the pores of microfiltration membranes. **Theoretical Foundation of Chemical Engineering**, v. 45, p. 26 - 32, 2011.

VASCONCELOS, R. S. **Modelagem e Simulação das Correlações de *Scale-Up* Para o Processo de Flotação Por Ar Dissolvido (FAD) Utilizando Análise Dimensional.**

TRUTER, M. ***Scale-up of mechanically agitated flotation processes based on the principles of dimensional similitud.*** 2010. 178 p. Tese (Doutorado em Ciências da Engenharia) – Universidade de Stellenbosch. Stellenbosch, 2010.

TU, J.; YEOH, G. H.; CHAOQUN, L. Computational fluid dynamics. **Elsevier**, 2008, 470 p.

VASCONCELOS, J. M. T.; ALVES, S. S.; BUJALSKI, W.; NIENOW, A. W. *Scale-up of mixing in gassed multi-turbine agitate vessels.* **The Canadian Journal of Chemical Engineering**, v. 76, n. 3, p. 398 – 404, 1998.

WHITE, F. M. **Mecânica dos fluidos.** 6ª Ed., Editora: McGraw-Hill, New York, 880p., 2010. ISBN: 9788563308214.

YIANATOS, J.; COUTRERAS, F.; MORALES, P.; CODDOU, F.; ELGUETA, H.; ORTÍZ, J. A novel *scale-up* approach for mechanical flotation cells. **Minerals Engineering**, v. 23, p. 877 – 884, 2010.

YIANATOS, J. B.; BERGH, L. G.; AGUILERA, J. Flotation “*scale Up*”: use of separability curves. **Minerals Engineering**, v. 16, p. 347 - 352, 2003.

YIANATOS, J. B.; HENRÍQUEZ, F. H.; OROZ, A. G. Characterization of large size flotation cells. **Minerals Engineering**, v. 19, p. 531 - 538, 2006.

YUMUS, A. C.; CIMBALA, J. M. **Fluid mechanics: fundamentals and applications.** 1ª Ed., Editora: McGraw-Hill, New York, 930p., 2006. ISBN: 0-07-247236-7.

ZLOKARNIK, V. M. **Dimensional analysis and scale-up in Chemical Engineering**, 2nd, Berlim, Editora: Wiley, 2006, 296 p.

ZLOKARNIK, Von M. Problems in the application of dimensional analysis and *scale-up* of mixing operations. **Chemical Engineering Science**, v. 53, n. 17, p. 3023 - 3030, 1998.

VASCONCELOS, R. S. **Modelagem e Simulação das Correlações de *Scale-Up* Para o Processo de Flotação Por Ar Dissolvido (FAD) Utilizando Análise Dimensional.**

# CAPÍTULO 2

**ARTIGO SUBMETIDO PARA PUBLICAÇÃO NA REVISTA  
CHEMICAL ENGINEERING & TECHNOLOGY**

**Estratégia Para Correlações de *Scale-up* em Câmara de  
Flotação Por Ar Dissolvido**

VASCONCELOS, R. S. **Modelagem e Simulação das Correlações de *Scale-Up* Para o Processo de Flotação Por Ar Dissolvido (FAD) Utilizando Análise Dimensional.**

## **ESTRATÉGIA PARA CORRELAÇÕES DE *SCALE-UP* EM CÂMARA DE FLOTAÇÃO POR AR DISSOLVIDO**

**R. S. Vasconcelos<sup>1,4</sup>, R. C. S. Henauth<sup>1,4</sup>, A. E. Moura<sup>2,4</sup>, L. A. Sarubbo<sup>3,4</sup>, V. A. Santos<sup>3,4</sup>**

<sup>1</sup> *Mestrando em Desenvolvimento de Processos Ambientais, Universidade Católica de Pernambuco, Rua do Príncipe n. 526 Boa Vista, CEP: 50050-900, Recife, Pernambuco, Brasil*

<sup>2</sup> *Centro de Tecnologia e Geociências, Universidade Federal de Pernambuco, Av. Professor Moraes do Rego, n. 1235, Cidade Universitária, CEP: 50670-901, Recife, Pernambuco, Brasil*

<sup>3</sup> *Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Católica de Pernambuco, Rua do Príncipe n. 526 Boa Vista, CEP: 50050-900, Recife, Pernambuco, Brasil*

<sup>4</sup> *Centro de Gestão de Tecnologia e Inovação - CGTI, Rua da Praia, n. 11, São José, CEP: 50000-000, Recife, Pernambuco, Brasil*

Versão encurtada do título: *Correlações de Scale-up*

*Endereço de correspondência para Leonie Asfora Sarubbo, Centro de Ciências e Tecnologia Universidade Católica de Pernambuco, Rua do Príncipe n. 526 Boa Vista, CEP: 50050-900, Recife, Pernambuco, Brasil. Tel.: (81)21194084; fax.: (81)21194043. E-mail: [leonie@unicap.br](mailto:leonie@unicap.br)*

VASCONCELOS, R. S. **Modelagem e Simulação das Correlações de *Scale-Up* Para o Processo de Flotação Por Ar Dissolvido (FAD) Utilizando Análise Dimensional.**

## **Resumo**

**Com base na análise de correlações de semelhança dinâmica, envolvendo grandezas predominantes em uma câmara de flotação por ar dissolvido (FAD), foi obtida uma correlação de *scale-up* como base para o projeto de uma unidade piloto, à partir de um modelo físico em escala de laboratório. Os custos com a implantação de unidades piloto requerem estratégias especiais, em função da falta de correlações desse tipo, uma vez que novas técnicas de flotação têm sido tratadas com um caráter estritamente comercial. Com auxílio da fluidodinâmica computacional e de vídeos dos fluxos de microbolhas e flocos, as forças de inércia e de gravidade foram identificadas como as grandezas predominantes em uma câmara de FAD. A estratégia mostrou-se simples e diminuiu a probabilidade de riscos futuros em um investimento de *scale-up*.**

**Palavras-chave:** FAD; Semelhança; Análise Dimensional; Unidade Piloto; CFD.

## **1. Introdução**

As relações entre diferentes forças podem ser expressas como grupos adimensionais (Kunes, 2012). Estes grupos podem ser utilizados para compreender a influência dessas forças durante determinados processos. Força como a gravidade faz com que haja uma separação de fluidos de acordo com as diferenças de densidades. Por outro lado, a viscosidade do fluido, tensões interfaciais, molhabilidade e geometria, podem afetar diretamente o processo (Grattoni et al., 2001). Desenvolvimentos históricos nos campos da Mecânica e da Dinâmica dos Fluidos apontam para números adimensionais como um meio adequado de comparação (Trivedi and Babadagli, 2008).

VASCONCELOS, R. S. **Modelagem e Simulação das Correlações de *Scale-Up* Para o Processo de Flotação Por Ar Dissolvido (FAD) Utilizando Análise Dimensional.**

A análise dimensional determina o número mínimo e a forma de dimensionamento dos grupos com base nas dimensões primárias de qualquer sistema físico (Fox and McDonald, 1998). Os grupos adimensionais não irão prever o comportamento físico do sistema, mas estes grupos podem ser ligados em conjunto para serem interpretados fisicamente (Trivedi et al., 2008).

Tratamentos mecânicos, físico-químicos e biológicos são os métodos convencionalmente utilizados para a recuperação de água residuárias, em particular água-óleo ou produzida (Ahmadun et al., 2009; Hladik et al., 2014). Separação gravitacional, centrifugação, coagulação, flotação, filtração e adsorção combinado com tratamento biológico são os métodos convencionais mais utilizados para a remoção de óleo livre, emulsionado e suspenso (Bayati et al., 2012).

Métodos de *scale-up* para o projeto de células de flotação têm sido baseados, principalmente, em semelhança geométrica e análise dimensional com o uso de números adimensionais (número do fluxo de ar, número de potência, número de Reynolds), a fim de se chegar à suspensão de material disperso em condições de mistura semelhantes em diferentes escalas (Gorain, 2007). Esses números adimensionais são úteis por várias razões (Kunes, 2012), dentre as quais permitem reduzir o número de variáveis necessárias para a descrição do problema. Podendo, com isso, serem utilizados para minimizar a quantidade de dados experimentais e originar correlações, em outras palavras, eles simplificam as equações que regem (Ruzicka, 2008).

O *scale-up* é o processo pelo qual os resultados obtidos em equipamento de pequena escala (Hague et al., 2001) são utilizados para conceber um equipamento de grandes dimensões (Kostoglou et al., 2007). Com a adoção de um protótipo em escala piloto para a metodologia de flotação por ar dissolvido (FAD) na separação e recuperação de águas oleosas, existe a necessidade de se elaborar e validar um modelo de previsão de *scale-up* para promover a mudança

de escala necessária (Zlokarnick, 2006).

No laboratório ou em escala piloto tem-se realizado um esforço significativo para descrever e modelar o processo de flotação a partir de um ponto de vista fundamental (Evans et al., 2008). A maioria desses modelos têm um grande número de parâmetros e eles não são diretamente aplicáveis para fins de scale-up (Kostoglou et al., 2007). Os processos de transporte de massa que ocorrem na zona de interação das células de flotação industriais têm sido modelados por CFD (Liu and Schmarz, 2009), a fim de se alcançar uma descrição mais compreensível, apesar de envolver processos complexos como dispersão de gás, efeitos de espuma e processos de coleta de partícula-bolha (Yanatos et al., 2010). Ruzicka (2008) afirma que modelar, geralmente significa encontrar uma descrição de um pequeno sistema em escala laboratorial, utilizando os números adimensionais e com eles fazer as medições e transferir o resultado para um sistema semelhante.

O presente trabalho utilizou como estratégia de scale-up a determinação das grandezas fluidodinâmicas predominantes em uma câmara de FAD, e propôs correlações de semelhança para o dimensionamento de uma unidade em escala piloto.

## **2. Material e Métodos**

### **2.1. Material**

O estudo realizado no presente trabalho utilizou uma unidade de FAD, em escala de laboratório (Da Rocha e Silva, 2013), utilizada em testes de separação água-óleo (Figura 1). Para a realização desses testes foram elaborados sistemas de recirculação de água tratada para produção de água oleosa e de controle e automação para manutenção do sistema de flotação em estado estacionário.

VASCONCELOS, R. S. **Modelagem e Simulação das Correlações de *Scale-Up* Para o Processo de Flotação Por Ar Dissolvido (FAD) Utilizando Análise Dimensional.**

Para garantir igualdade entre as vazões de água que sai e que chega ao modelo de laboratório de FAD foi necessária a implantação de um sistema de controle conforme ilustra o esquema mostrado pela Figura 2. Foi instalado um sensor de nível na câmara de água tratada (Figura 3). Neste compartimento um sensor de nível monitora valores máximo e mínimo da água tratada. Quando o nível deste compartimento chegava ao mínimo programado, a bomba de recirculação era desligada. Quando o nível de água tratada atingia o máximo previsto, a bomba de alimentação das câmaras de flotação era o componente do sistema a ser desligado.

Para se chegar a uma correlação de scale-up sem dados experimentais obtidos em diferentes escalas, é necessário que uma correlação proposta, entre modelo e protótipo, esteja baseada em grandezas predominantes. Para isso existe a necessidade de se investigar a fluidodinâmica dos fenômenos envolvidos (Kunes, 2012; Formosa; Fréchette, 2013).

Na altura de 7cm, partindo da base da a célula de flotação do modelo de laboratório foi posicionada uma câmera fotográfica/filmadora marca SONY, modelo DSC-TF1 (com foco ajustado), que tem um modo de gravação de alta velocidade com a capacidade de gerar vídeos em condições subaquáticas. Foram feitas marcações visíveis no campo de visão da máquina, com trechos de dimensões conhecidas e de cor preta, como forma de se medir o tempo percorrido nessa distância por microbolhas de ar e flocos compostos por gotas de óleo e microbolhas. Dessa forma, foram realizados vídeos sobre o fluxo de microbolhas e de flocos, formados pelas interações das microbolhas de ar e das gotas de óleo dispersas no meio. Imagens instantâneas desses vídeos geraram fotografias ou quadros que auxiliavam a medir a velocidade de microbolhas e flocos (Figura 4).

## 2.2. Métodos

Foram tratados os vídeos obtidos pela câmera filmadora utilizando o software *VirtualDub Versão 1.10.4*. Este software possibilitou a passagem da filmagem quadro a quadro e a identificação de movimentos característicos de microbolhas e flocos, favorecendo a aferição do tempo gasto pelas microbolhas e flocos. Dessa forma, de posse do tempo e da distância, foi permitida a realização de cálculos para estimativas de velocidades de ascensão de microbolhas e floco no interior da câmara de flotação do modelo de laboratório.

A construção da geometria do modelo físico de FAD foi realizada com auxílio do módulo *Designer Modeler* do software *ANSYS Workbench 15.0*. O dimensionamento da geometria foi baseada nas dimensões contidas no projeto do próprio protótipo. As malhas não estruturadas foram geradas através do módulo *CFX-Mesh* do *ANSYS Workbench 15.0* e foram testadas no *ANSYS-CFX -Solver* e *CFX-Post*. Após a realização dos testes de malha e a conclusão sobre a melhor configuração, foram geradas as geometrias e malhas das variações geométricas do arranjo experimental de laboratório (Figura 5).

Para otimizar o refino de malhas, essas foram geradas de 1000 até 5000 interações, estas últimas correspondentes a um tempo de simulação de aproximadamente 12 dias. A validação do modelo matemático foi realizada por comparação do perfil de densidade das fases entre as simulações e as fotografias obtidas da distribuição de microbolhas, com a máquina fotográfica externa ao protótipo.

### 3. Resultados e Discussão

#### 3.1. Grandezas fluidodinâmicas predominantes

Um cenário adequado para filmagem da distribuição de microbolhas e de densidades dos fluidos, em escoamento, foi conseguido com o revestimento de um dos lados das câmaras de FAD do modelo físico com papel de cor preta (fosco) e iluminação com lâmpada de led (fria), imersa na parte superior da referida câmara, para melhorar o contraste entre a água, microbolhas e flocos. A Figura 6 ilustra uma imagem obtida da distribuição de microbolhas na primeira câmara, com pouca iluminação no ambiente externo ao modelo de laboratório. A simulação realizada com auxílio de CFD é apresentada pela Figura 7. Observa-se nesse plano longitudinal partido do arranjo experimental de FAD uma grande semelhança com o perfil de distribuição de densidades de água e microbolhas mostrados pela Figura 6. A comparação entre as referidas figuras foi utilizada como um dos critérios para validação de importantes conceitos acerca dos fenômenos fluidodinâmicas predominantes na câmara de flotação. Entre esses fenômenos encontra-se o predomínio de forças gravitacionais e inerciais no interior da câmara de flotação. Em relação às forças inerciais foram ainda consultados os diagramas de linhas de corrente em cada uma das câmaras, recurso também disponível na biblioteca do software CFX (Bondelind et al., 2010; Behin; Bahrami, 2012).

Através de gráficos do tipo *Box plot*, foi possível avaliar a distribuição dos dados experimentais de medidas de velocidades de microbolhas e flocos. Com esse tipo de gráfico pôde-se observar como os valores de velocidade de ascensão das microbolhas estão distribuídos. Valores de tendência central (mediana), valores máximos e mínimos e valores atípicos (*outliers*) se existirem. A Figura 8 mostra o comportamento da caixa mediana com uma distribuição homogênea, no que diz respeito às velocidades das microbolhas. A distribuição dos dados apresenta-se simétrica, visto que o ponto que representa a mediana está

localizado no centro da caixa, não existindo *outliers*, ou seja, valores discrepantes para mais ou para menos. Uma distribuição normal dos valores medidos, dentro de um intervalo de confiança de 95 % forneceu um valor de velocidade média de ascensão para as microbolhas em torno de  $8.73 \cdot 10^{-7}$  m/s, com previsões de velocidades que vão de  $8.51 \cdot 10^{-7}$  m/s a  $8.95 \cdot 10^{-7}$  m/s.

O gráfico que ilustra a análise estatística dos valores de velocidade de ascensão dos flocos é apresentado na Figura 8. Novamente obteve-se dados com uma distribuição simétrica, onde não existe previsão para *outliers*. A velocidade média computada para um intervalo de confiança de 95 % ficou em torno de  $1.175 \cdot 10^{-5}$  m/s, com valores mínimos e máximos que vão de  $1.132 \cdot 10^{-5}$  m/s a  $1.216 \cdot 10^{-5}$  m/s, respectivamente.

Observa-se nas Figuras 8 e 9 uma nítida diferença entre as velocidades médias das microbolhas e dos flocos, sendo a primeira da ordem de 13 vezes. Observa-se ainda que os valores máximos e mínimos de ambas as faixas de velocidades encontram-se em regiões de valores bastante diferenciados. Isto reforça que após a formação de um floco, aglomeração de microbolhas em uma gota de óleo, com a estrutura final de dimensões bem maiores que a de uma microbolhas. Uma maior dimensão para o diâmetro de um floco, associada aos efeitos de arrasto da fase contínua (aquosa) contribuem para esse aumento de velocidade. A observação dos vídeos gerou a Tabela 1, onde foram relacionadas as características identificadas nos comportamentos de microbolhas e flocos. Um resumo das observações contidas na Tabela 1 é a predominância de grandezas como forças de inércia e gravitacionais nas câmaras de flotação do modelo de FAD.

### 3.2. Correlações de scale-up propostas

Supondo que as grandezas de inércia e gravidade são as mais influentes no comportamento do sistema (FAD), pode-se concluir que:

$$\frac{Q_m}{Q_p} = \frac{L_m^3/T_m}{L_p^3/T_p} = \frac{L_r^3}{T_r^3} \quad (1)$$

Em que:

Q - Vazão volumétrica, m<sup>3</sup>/s

L - dimensão de comprimento, m

T - dimensão de tempo, s

m, p, r - modelo, protótipo e razão entre as escalas, respectivamente

A relação envolvendo os tempos na Equação (1) deve ser estabelecida para mostrar como ela influencia no escoamento. Dessa forma, descrevendo expressão para a relação entre as forças de gravidade para modelo e protótipo:

$$\frac{F_m}{F_p} = \frac{w_m}{w_p} = \frac{\gamma_m \cdot L_m^3}{\gamma_p \cdot L_p^3} = \gamma_r \cdot L_r^3 \quad (2)$$

Para análise da inércia:

VASCONCELOS, R. S. **Modelagem e Simulação das Correlações de *Scale-Up* Para o Processo de Flotação Por Ar Dissolvido (FAD) Utilizando Análise Dimensional.**

$$\frac{F_m}{F_p} = \frac{M_m a_m}{M_p a_p} = \frac{\rho_m}{\rho_p} \frac{L_m^3}{L_p^3} \frac{L_r}{T_r^2} = \rho_r L_r^3 \frac{L_r}{T_r^2} \quad (3)$$

Igualando as relações de forças:

$$\gamma_r \cdot L_r^3 = \rho_r L_r^3 \cdot \frac{L_r}{T_r^2} \quad (4)$$

a qual solucionada para  $T_r$ , fica:

$$T_r^2 = L_r \frac{\rho_r}{\gamma_r} = \frac{L_r}{g_r} \quad (5)$$

Reconhecendo que o valor de  $g_r$  é unitário e substituindo na Equação (1):

$$Q_r = \frac{Q_m}{Q_p} = \frac{L_r^3}{L_r^{1/2}} = L_r^{5/2} \quad (6)$$

Para ilustrar a aplicação da Equação (6) representa-se uma possível estrutura piloto por p e o protótipo de bancada existente por m. A câmara de flotação em escala de modelo tem volume de 1,5 m<sup>3</sup> (Câmara dupla) e as vazões combinadas de microbolhas e efluente a ser tratado somam 2 m<sup>3</sup>/h. Neste caso o

VASCONCELOS, R. S. **Modelagem e Simulação das Correlações de *Scale-Up* Para o Processo de Flotação Por Ar Dissolvido (FAD) Utilizando Análise Dimensional.**

tempo de residência médio no modelo é de:

$$\tau_p = \frac{V_m}{Q_m} = \frac{1.5}{2} = 0.75 \text{ h}$$

Admitindo-se que o modelo tenha sido construído em escala de 1:5, o tempo de residência médio previsto para o protótipo piloto será deduzido de:

$$Q_r = L_r^3 \frac{T_p}{T_m} = L_r^{5/2} \quad (7)$$

Ou seja,

$$T_p = \frac{L_r^{5/2}}{L_r^3} \cdot T_m = \frac{T_m}{L_r^{1/2}} = 0.75 \cdot \sqrt{5} = 1.68 \text{ h} \quad (8)$$

#### 4. Conclusão

A estratégia de *scale-up* apresentada neste trabalho caracterizou-se como uma ferramenta de *scale-up* simples, adequada para o projeto de uma instalação piloto de FAD. É uma técnica que requer material de custo relativamente baixo, uma vez que pode reduzir os riscos de investimentos futuro em unidades piloto, as quais podem tomar proporções relativamente grandes, de acordo com a demanda das instalações comerciais.

VASCONCELOS, R. S. **Modelagem e Simulação das Correlações de *Scale-Up* Para o Processo de Flotação Por Ar Dissolvido (FAD) Utilizando Análise Dimensional.**

Como sugestão de etapas futuras apresenta-se a validação dessa técnica com a utilização dos dados gerados pela instalação piloto proposta por este trabalho.

## **AGRADECIMENTOS**

Este estudo foi financiado pela Fundação de Amparo à Ciência e Tecnologia do Estado de Pernambuco (FACEPE), o Programa de Pesquisa e Desenvolvimento da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), o Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Ensino Superior (CAPES). Os autores agradecem aos laboratórios do Centro de Ciências e Tecnologia da Universidade Católica de Pernambuco e ao Centro de Gestão de Tecnologia e Inovação (CGTI), Brasil.

## **REFERÊNCIAS**

AHMADUN, F-R.; PENDASHTEH, A.; ABDULLAH, L.C.; BIAK, D. R. A.; MADAENI, S. S.; ABDIN, Z. Z. Review of technologies for oil and gas produced water treatment. **J. Hazard. Mater.** 170: 530-551, 2009. Doi: 10.1016/j.jhazmat.2009.05.044.

BARENBLANTT, G. I. **Scaling, self-similarity, and intermediate asymptotic.** 1<sup>o</sup> Ed – New York, Cambridge University Press. ISBN 0521435226, 1996.

BAYATI, F.; SHAYEGAN, J.; NOORJAHAN, A. Treatment of oilfield produced water by dissolved air precipitation/solvent sublation. **J. Pet. Sci. Eng.** 80: 26-31, 2012.

VASCONCELOS, R. S. **Modelagem e Simulação das Correlações de Scale-Up Para o Processo de Flotação Por Ar Dissolvido (FAD) Utilizando Análise Dimensional.**

BEHIN, J.; BAHRAMI, S. Modeling and industrial dissolved and flotation tank used for separating oil from wastewater. **Chem. Eng. Process.** 59: 1-8, 2012.

BONDELIND, M.; SASIC, S.; KOSTOGLU, M.; BERGDAHL, L.; PETTERSSON, T. J. R. Single and two-phase numerical models of dissolved air flotation: comparison of 2D and 3D simulations. **Colloids Surf., A.** 365: 137-144, 2010.

CARDOSO, E. M. **Intensificação da ebulição nucleada em espaços confinados.** 2010. 139p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2010.

DA ROCHA E SILVA, F. C. P. **Estudo teórico experimental da preparação gravitacional de emulsões compostas por água do mar, derivados de petróleo e biossurfactantes.** 2013. 105p. Dissertação de Mestrado, Universidade Católica de Pernambuco, 2013.

EVANS, G. M.; DOROODCHI, E.; LANE, G. L.; KOH, P. T. L.; SCHWARZ, M. P. Mixing and gas dispersion in mineral flotation cells. **Chem. Eng. Res. Des.** 86: 1350-1362, 2008.

FORMOSA, F.; FRECHETTE, L. G. Scaling laws for free piston stirling engine design: benefits and challenges of miniaturization. **Energy.** 57: 796-808, 2013.

FOX, R. W.; MCDONALD, A. T.; PRITCHARD, P. J. **Introduction to fluid mechanics.** 5th ed.: John Wiley & Sons Canada, Ltd., 1998.

GORAIN, B. K. **Design, operating principles, and optimization of mechanical flotation cells.** In: Fuerstenau, JAMESON, M.C.; YOON, G.R. H. (Eds.), Froth Flotation: A Century of Innovation. SME Inc., USA, 637-656, 2007.

GRATTONI, C. A.; JING, X. D.; DAWE, R. A. Dimensionless groups for three-phase gravity drainage flow in porous media. **J. Pet. Sci. Eng.** 29: 53- 65, 2001.

HAGUE, J.; TA, C. T.; BIGGS, M. J.; SATTARY, J. A. Small scala model for CFD validation in DAF application. **Water Sci. & Technol.** 43:8: 167-173, 2001.

VASCONCELOS, R. S. **Modelagem e Simulação das Correlações de Scale-Up Para o Processo de Flotação Por Ar Dissolvido (FAD) Utilizando Análise Dimensional.**

HLADIK, M. L.; FOCAZIO, M. J.; ENGLE, M. Discharges of produced waters from oil and gas extraction via wastewater treatment plants are sources of disinfection by-products to receiving streams. **Sci. Total Environ.** 466-467, 1085-1093, 2014.

KOH, P. T. L.; SCHWARZ, M. P. CFD modeling of bubble-particle attachments in flotation cells. **Miner. Eng.** 19:6-8: 619- 626, 2006.

KOSTOGLU, M.; KARAPANTSIOS, T. D.; MATIS, K. A. CFD model for the design of large scale flotation tanks for water and wastewater treatment. **Ind. Eng. Chem. Res.** 46:20: 6590-6599, 2007.

KUNES, J. Similarity and modeling in science and engineering. Cambridge International Science Publishing – **Springer**. ISBN:978-1-907343-77-3; 978-1-907343-78-0, 2012.

LIU, T. Y.; SCHMARZ, M. P. CFD based multiscale modeling of bubble-particle collision efficiency in a turbulent flotation cell. **Chem. Eng. Sci.** 64:24: 5287- 5301, 2009.

NEDELTCHEV, S., OOKAWARA, S., OGAWA, K. A. Fundamental approach to bubble column scale-up based on quality of mixedness. **J. Chem. Eng. JPN.** 32: 431-439, 1999.

NEWELL, R.; GRANO, S. Hydrodynamics and scale-up in rushton turbine flotation cells: Part 1 – cell hydrodynamics. **Int. J. Miner. Process.**, 81: 224-236, 2007.

OLIVEIRA, M. L. M.; AQUINO, J. A. Aspectos relevantes das colunas de flotação. **Holos.** 22: 44-52, 2006.

RUZICKA, M. C. On dimensionless numbers. **Chem. Eng. Res. Des.** 86: 835-868, 2008.

TRIVEDI, J.; BABADAGLI, T. Scaling miscible displacement in fractured porous media using dimensionless groups. **J. Pet. Sci. Eng.** 61: 58-66, 2008.

VASCONCELOS, R. S. **Modelagem e Simulação das Correlações de *Scale-Up* Para o Processo de Flotação Por Ar Dissolvido (FAD) Utilizando Análise Dimensional.**

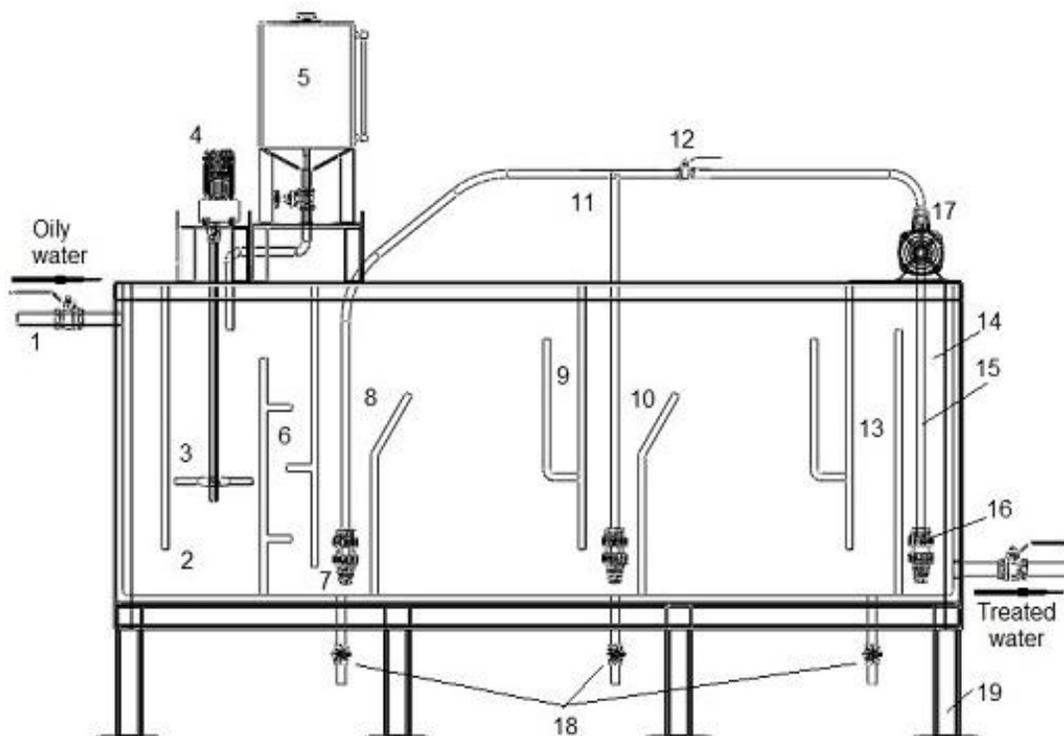
VASCONCELOS, J. M. T.; ALVES, S. S.; BUJALSKI, W.; NIENOW, A. W. Scale-up of mixing in gassed multi-turbine agitate vessels. **Can. J. Chem. Eng.** 76: 398-404, 1998.

WHITE, F. M. **Mecânica dos fluidos.** New York, McGraw-Hill, 6ª Ed. ISBN. 978-85-8055-009-2, 2011.

YIANATOS, J.; CONTRERAS, F.; MORALES, P.; CODDOU, F.; ELGUETA, H.; ORTÍZ, J.. A novel scale-up approach for mechanical flotation cells. **Miner. Eng.** 23: 877-884, 2010.

ZLOKARNIK, V. M. **Dimensional analysis and scale-up in chemical engineering.** Berlim: Wiley, 296p, 2006.

VASCONCELOS, R. S. **Modelagem e Simulação das Correlações de *Scale-Up* Para o Processo de Flotação Por Ar Dissolvido (FAD) Utilizando Análise Dimensional.**



1 - Entrance; 2 - Mixing chamber inlet; 3 - Stirrer; 4 - Agitator motor; 5 - Surfactant tank; 6 - Static mixer; 7 - Microbubbles diffuser; 8 - Flotation chamber 1; 9 - Collector oily foam; 10 - Flotation chamber 2; 11 - Microbubbles tubes; 12 - Flow control valve; 13 - Treated water separator; 14 - Treated water chamber; 15 - Suction pipe; 16 - Check valve; 17 - Microbubbles pump; 18 - Drain valves; 19 - metal structure.

Figura 1. Arranjo experimental da FAD usada para os testes em laboratório

VASCONCELOS, R. S. **Modelagem e Simulação das Correlações de *Scale-Up* Para o Processo de Flotação Por Ar Dissolvido (FAD) Utilizando Análise Dimensional.**

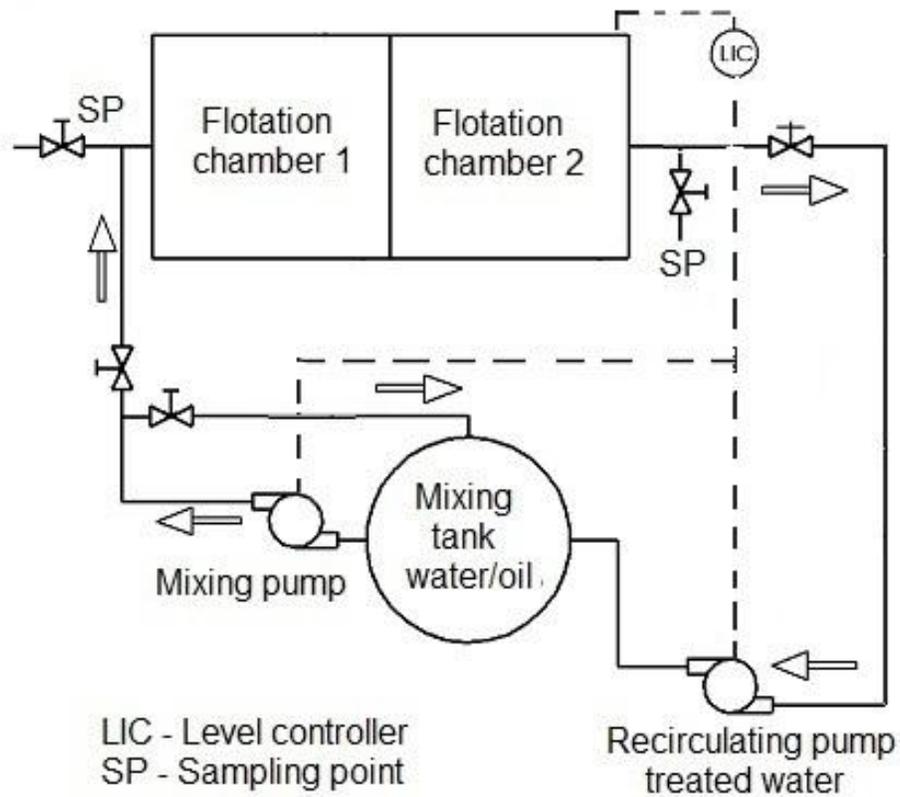


Figura 2. Fluxograma de componentes utilizados para controlar o nível de água tratada. Adaptado de: Da Rocha e Silva, 2013

VASCONCELOS, R. S. **Modelagem e Simulação das Correlações de *Scale-Up* Para o Processo de Flotação Por Ar Dissolvido (FAD) Utilizando Análise Dimensional.**

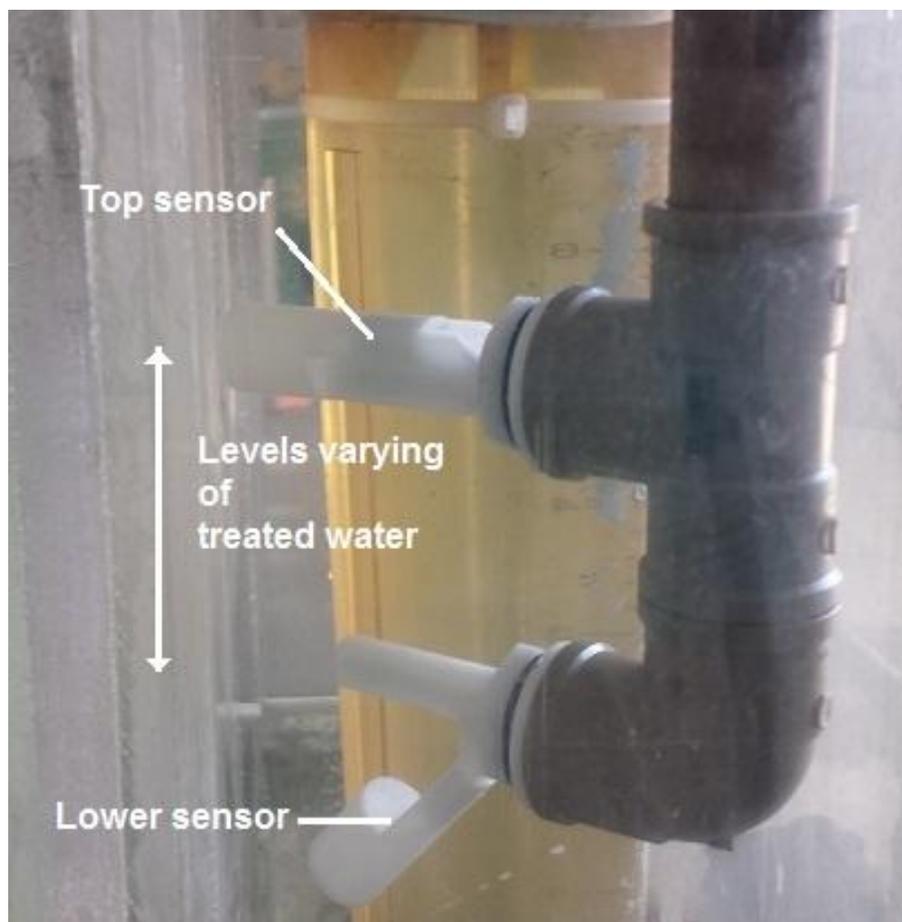
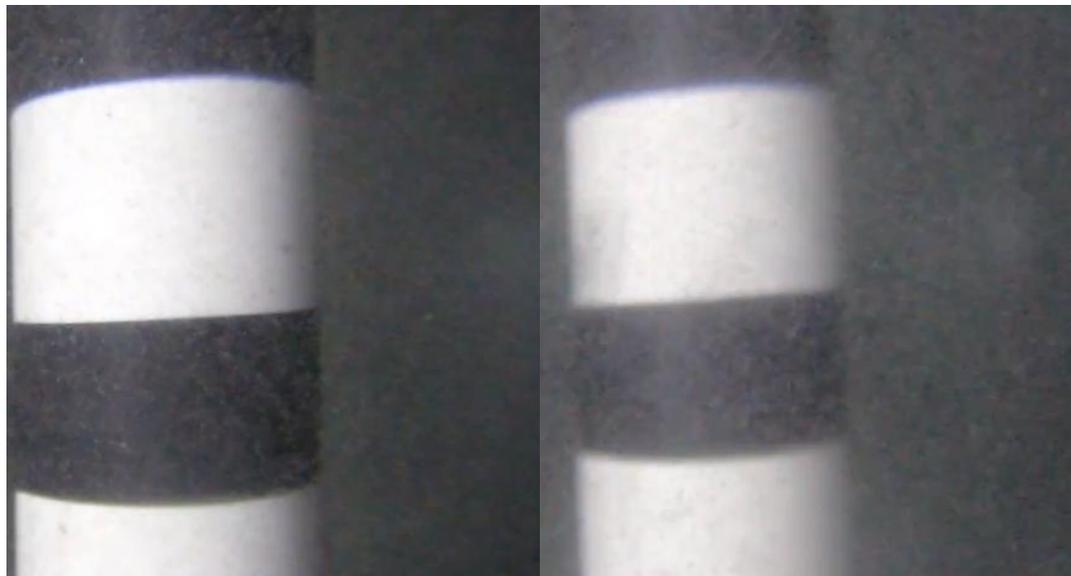


Figura 3. Estratégia de controle de nível para a obtenção de estado estacionário em modelo físico de FAD

VASCONCELOS, R. S. **Modelagem e Simulação das Correlações de *Scale-Up* Para o Processo de Flotação Por Ar Dissolvido (FAD) Utilizando Análise Dimensional.**



(a)

(b)

Figura 4. Fotografia: (a) microbolhas; (b) flocos

VASCONCELOS, R. S. **Modelagem e Simulação das Correlações de *Scale-Up* Para o Processo de Flotação Por Ar Dissolvido (FAD) Utilizando Análise Dimensional.**

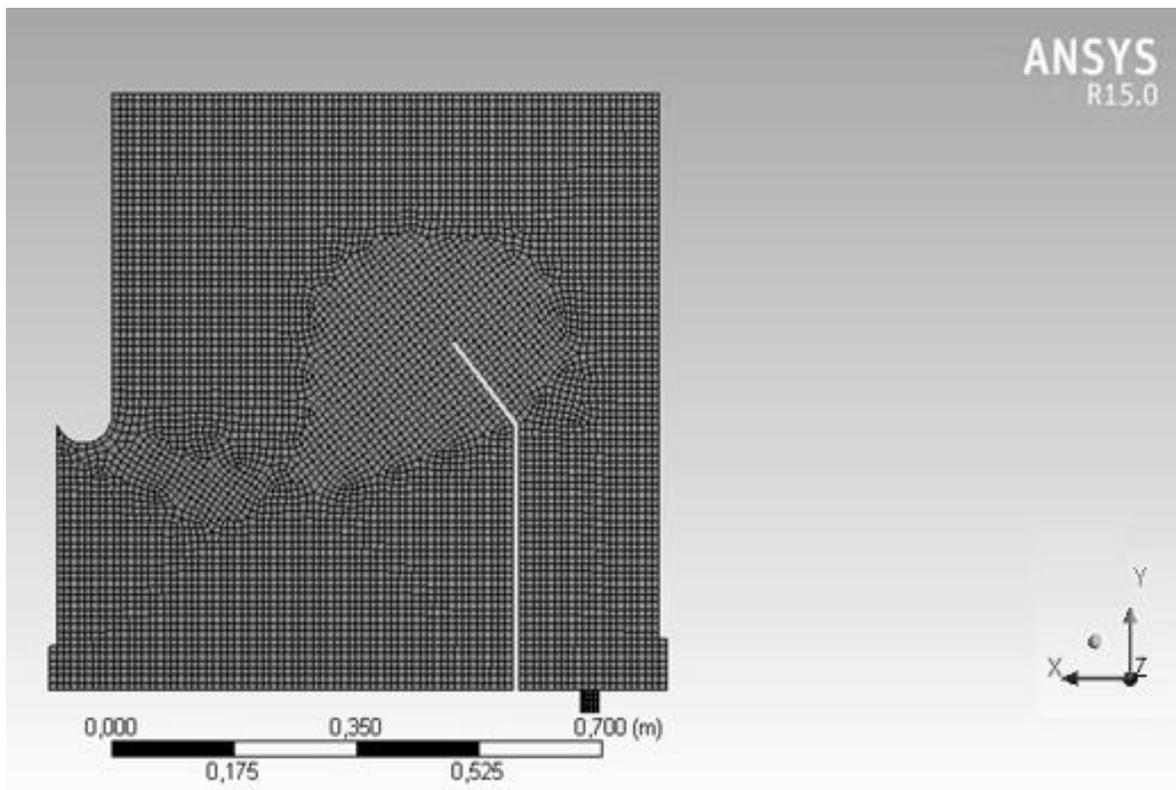


Figura 5. Malha não-estruturada em corte no plano da câmara de flotação do protótipo

VASCONCELOS, R. S. **Modelagem e Simulação das Correlações de *Scale-Up* Para o Processo de Flotação Por Ar Dissolvido (FAD) Utilizando Análise Dimensional.**



Figura 6. Visualização externa das microbolhas do perfil da camara de flotação do protótipo

VASCONCELOS, R. S. **Modelagem e Simulação das Correlações de *Scale-Up* Para o Processo de Flotação Por Ar Dissolvido (FAD) Utilizando Análise Dimensional.**

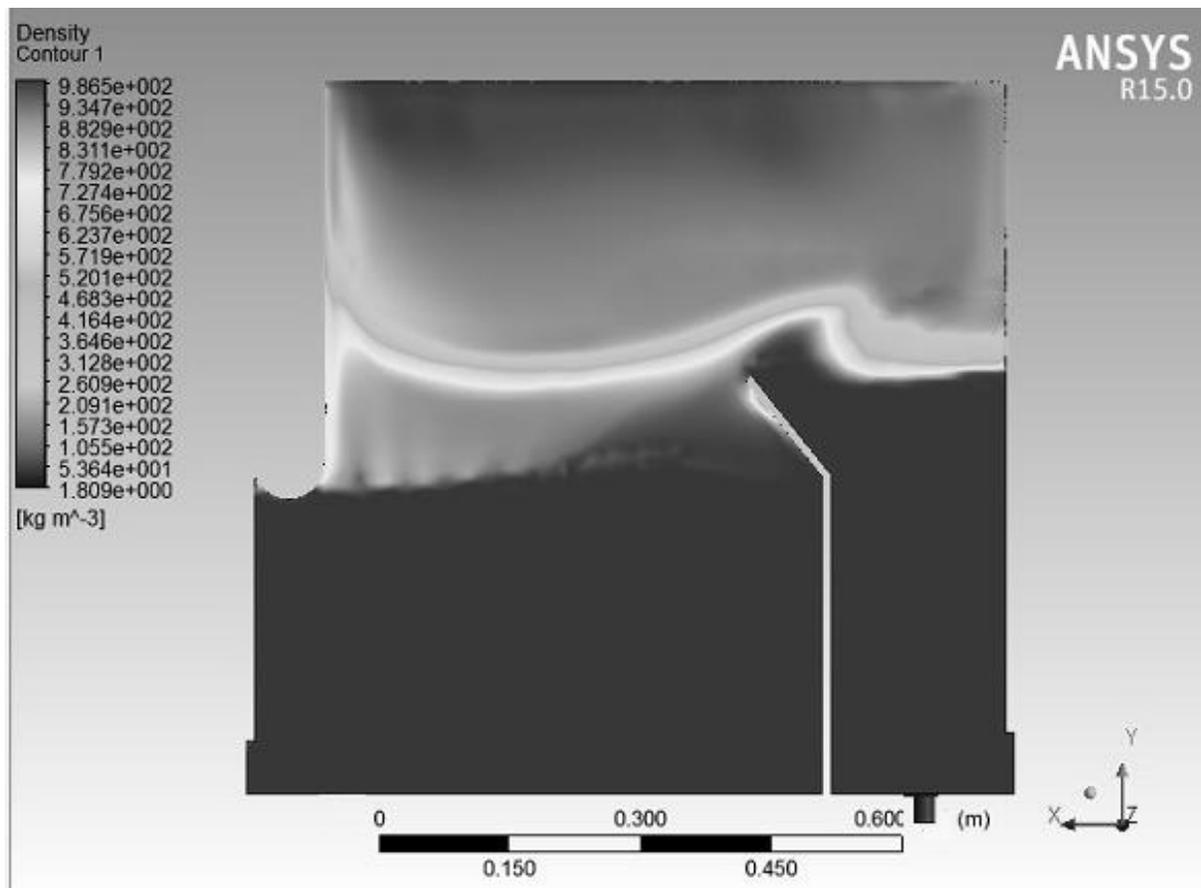


Figura 7. Corte no plano da câmara de flotação mostrando os perfis de densidade das fase

VASCONCELOS, R. S. **Modelagem e Simulação das Correlações de *Scale-Up* Para o Processo de Flotação Por Ar Dissolvido (FAD) Utilizando Análise Dimensional.**

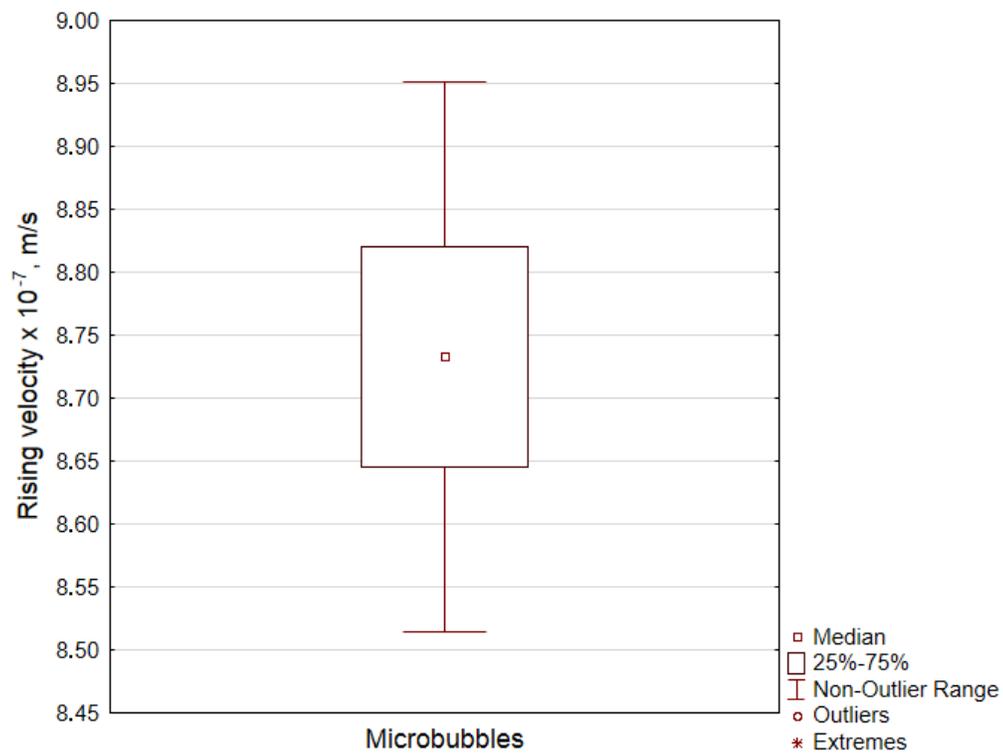


Figura 8. Gráfico *Box Plot* utilizado para avaliar a velocidade média de microbolhas

VASCONCELOS, R. S. **Modelagem e Simulação das Correlações de *Scale-Up* Para o Processo de Flotação Por Ar Dissolvido (FAD) Utilizando Análise Dimensional.**

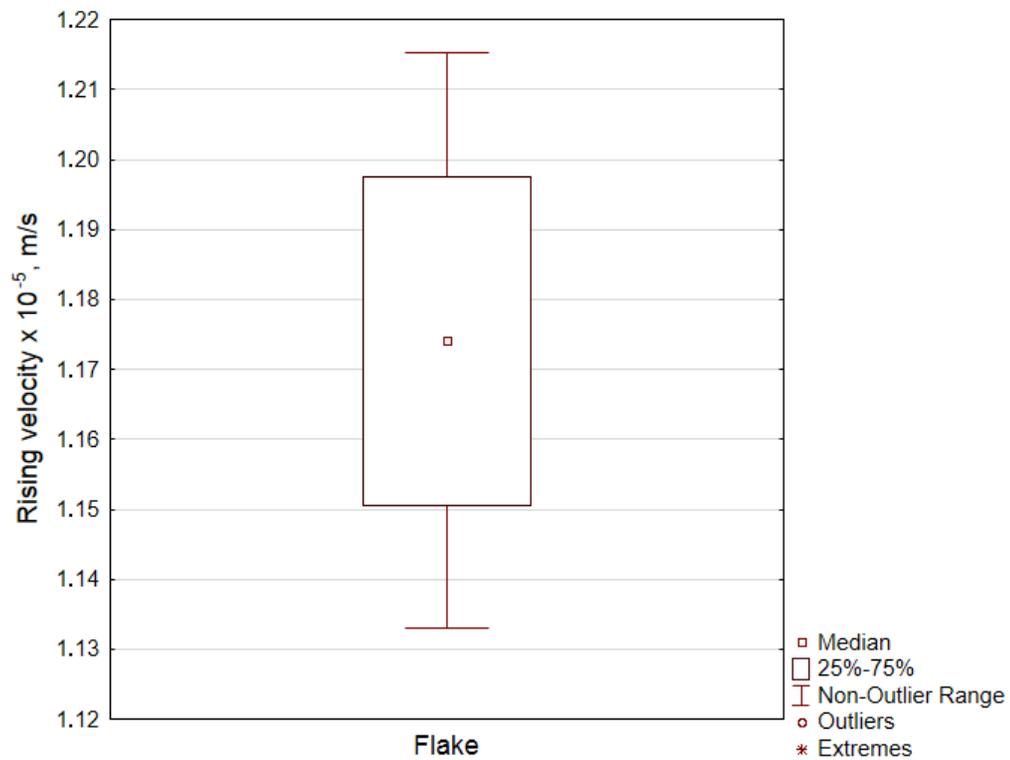


Figura 9. Gráfico *Box Plot* utilizado para avaliar a velocidade média para os flocos

VASCONCELOS, R. S. **Modelagem e Simulação das Correlações de *Scale-Up* Para o Processo de Flotação Por Ar Dissolvido (FAD) Utilizando Análise Dimensional.**

TABELA 1

Características das microbolhas e dos flocos

| Características              | Microbolhas             | Flocos                            |
|------------------------------|-------------------------|-----------------------------------|
| Aparência                    | Névoa esbranquiçada     | Névoa amarelada                   |
| Movimento                    | Caótico                 | Ascendente ou na direção do fluxo |
| Coalescência                 | Formação de Aglomerados | Gotículas de óleo-água            |
| Velocidade de ascensão (m/s) | $8.7 \cdot 10^{-7}$     | $1.18 \cdot 10^{-5}$              |

VASCONCELOS, R. S. **Modelagem e Simulação das Correlações de *Scale-Up* Para o Processo de Flotação Por Ar Dissolvido (FAD) Utilizando Análise Dimensional.**

# CAPÍTULO 3

## CONCLUSÕES GERAIS

Os resultados obtidos nesse trabalho permitiram alcançar as seguintes conclusões:

- Estudos de correlações entre a escala laboratorial e a industrial são de grande importância para o sucesso dos projetos de unidades pilotos.
- O modelo de previsão de *scale-up* para promover a mudança de escala necessária em uma câmara de FAD foi validado.
- A análise de correlações de semelhança dinâmica na câmara de FAD foi realizada com sucesso.
- A fluidodinâmica computacional e os vídeos dos fluxos de microbolhas e flocos permitiram identificar as grandezas predominantes em uma câmara de FAD.
- A metodologia de trabalho empregada permitiu o desenvolvimento de uma técnica simples e de baixo custo, diminuindo a probabilidade de riscos futuros em um investimento de *scale-up*.
- A validação desta técnica pode ser realizada em estudos futuros com os dados gerados a partir do sistema de piloto proposto.

VASCONCELOS, R. S. **Modelagem e Simulação das Correlações de *Scale-Up* Para o Processo de Flotação Por Ar Dissolvido (FAD) Utilizando Análise Dimensional.**

# ANEXOS

VASCONCELOS, R. S. **Modelagem e Simulação das Correlações de *Scale-Up* Para o Processo de Flotação Por Ar Dissolvido (FAD) Utilizando Análise Dimensional.**

## **Strategy for a Scale-up Correlation in a Dissolved Air Flotation Chamber**

**Robson de Souza Vasconcelos<sup>1,4</sup>, Rosangela Cristine da Silva Henauth<sup>1,4</sup>, Alex Elton de Moura<sup>2,4</sup>, Valdemir Alexandre dos Santos<sup>3,4</sup>, Leonie Asfora Sarubbo<sup>3,4</sup>**

<sup>1</sup>Post-Graduate Program in Development of Environmental Processes, Catholic University of Pernambuco, Recife, Pernambuco, Brazil

<sup>2</sup>Centre of Technology and Geoscience, Federal University of Pernambuco, Recife, Pernambuco, Brazil

<sup>3</sup>Centre of Science and Technology, Catholic University of Pernambuco, Recife, Pernambuco, Brazil

<sup>4</sup>Centre for Management of Technology and Innovation, Recife, Pernambuco, Brazil

**Correspondence:** Leonie Asfora Sarubbo (leonie@unicap.br), Centre of Science and Technology, Catholic University of Pernambuco, Rua do Príncipe, n. 526, Boa Vista, CEP: 50050-900, Recife, Pernambuco, Brazil.

VASCONCELOS, R. S. **Modelagem e Simulação das Correlações de *Scale-Up* Para o Processo de Flotação Por Ar Dissolvido (FAD) Utilizando Análise Dimensional.**

## **Abstract**

Beginning with a laboratory scale physical model, a scale-up correlation for a pilot unit project was determined based on the analysis of dynamic similarity correlations involving the predominant phenomena of a dissolved air flotation (DAF) chamber. The implantation costs of pilot units require special strategies due to the lack of correlations of this type, as novel flotation methods have been considered strictly from an economic standpoint. With the aid of computational fluid dynamics and videos of microbubble and floc flow, inertia and gravity were identified as the predominant phenomena in a DAF chamber. The strategy described herein is simple and reduces the likelihood of future risks in scale-up investments.

**Keywords:** DAF, Similarity, Dimensional analysis, Pilot unit, CFD

## **1 Introduction**

The relationships among different phenomena can be expressed as dimensionless groups, which can be used to understand the influence of these phenomena in particular processes. The force of gravity causes the separation of fluids due to differences in density. However, viscosity, interfacial tension, wettability and geometry exert a direct influence on this process [1]. Developments in the fields of mechanics and fluid dynamics demonstrate that dimensionless numbers are an adequate means of comparison [2]. Dimensional analysis determines the minimum number and dimensioning form of groups based on the primary dimensions of any physical system [3]. Dimensionless groups do not allow

VASCONCELOS, R. S. **Modelagem e Simulação das Correlações de *Scale-Up* Para o Processo de Flotação Por Ar Dissolvido (FAD) Utilizando Análise Dimensional.**

predicting the physical behaviour of the system, but can be linked together to be interpreted physically [2].

Mechanical, physiochemical and biological treatments are conventional methods used for the recovery of wastewater, especially oily water [4, 5]. Gravitational separation, centrifugation, coagulation, flotation, filtration and adsorption are the most widely employed methods for the removal of free-floating oil from water as well as the removal of suspended oil droplets in an emulsion [6].

Scale-up methods for a flotation cell project have mainly been based on geometric similarity and dimensional analysis with the use of dimensionless numbers (air flow, power and Reynolds numbers) to achieve similar blend conditions of material dispersed in a suspension on different scales [7]. Dimensionless numbers are useful for a number of reasons, such as allowing a reduction in the number of variables needed to describe a given problem, thereby minimizing the amount of experimental data, simplifying equations and allowing the determination of correlations [8, 9].

In a scale-up process, the results achieved using small-scale equipment [10] are used to design large equipment [11]. For example, a pilot scale prototype for a dissolved air flotation (DAF) method for the separation of oily water requires a scale-up prediction model for the determination of the changes necessary in the design of large-scale equipment [12]. In the laboratory or pilot scale, substantial effort goes into describing and modelling the flotation process from a fundamental standpoint [13]. Most such models have a large number of variables that are not directly applicable for scale-up purposes [11]. The mass transport processes that occur in the interaction zone of industrial flotation cells have been modelled using computational fluid dynamics (CFD) [14] to establish a more

VASCONCELOS, R. S. **Modelagem e Simulação das Correlações de *Scale-Up* Para o Processo de Flotação Por Ar Dissolvido (FAD) Utilizando Análise Dimensional.**

comprehensible description, despite involving complex processes, such as gas dispersion, the foam/froth effect and particle-bubble collection [15]. According to Ruzicka [9], modelling generally involves the description of a small laboratory-scale system employing dimensionless numbers, which are used to make measurements and transfer the results to a similar, larger system.

This paper describes a scale-up strategy involving the determination of the predominant fluid dynamics in a DAF chamber and proposes similarity correlations for scaling up a pilot project.

## **2 Experimental**

### **2.1 Lab-scale DAF unit**

In the present study, a lab-scale DAF unit [16] was used in water-oil separation tests (Fig. 1). For such, a treated water re-circulation system was designed for the production of oily water as well as the control and automation to maintain the flotation system in a steady state.

(Figure 1)

A control system was needed to ensure equal volumes of water entering and exiting the laboratory DAF model, as illustrated in Fig. 2. Level sensors were installed in the treated water chamber to monitor the maximum and minimum levels of treated water (Fig.

3). When the water reached the programmed minimum level, the re-circulation pump was switched off. When the treated water reached the programmed maximum level, the flotation chamber feed pump was switched off.

(Figure 2/Figure 3)

To arrive at a scale-up correlation without experimental data obtained on different scales, it is necessary for the proposed correlation between the model and prototype to be based on the predominant phenomena. Thus, the fluid dynamics of these phenomena need to be investigated [8, 17]. A camera (Sony, model DSC-TF1) with adjusted focus and a high-speed recording mode that can generate video recordings underwater was positioned 7 cm above the flotation cell of the laboratory model. Black marks separated by a known distance were made within the field of view of the camera to allow measuring the flow of air microbubbles and flocs composed of oil droplets and microbubbles. Instantaneous images of the videos generated frames that assisted in the measurement of microbubble and floc flow velocity (Fig. 4).

(Figure 4)

## 2.2 Experimental

The videos were evaluated using the *VirtualDub* program, version 1.10.4, which enables frame-by-frame analysis and the measurement of microbubble and floc rising

VASCONCELOS, R. S. **Modelagem e Simulação das Correlações de *Scale-Up* Para o Processo de Flotação Por Ar Dissolvido (FAD) Utilizando Análise Dimensional.**

velocity in the flotation chamber of the laboratory model. The geometry of the physical DAF model was calculated with the aid of the *Designer Modeler* of the ANSYS Workbench 15.0 program. The dimensioning of the geometry was based on the dimensions of the prototype project. Non-structured meshes were generated using the *CFX-Mesh* module of the ANSYS Workbench 15.0 and were tested using *ANSYS-CFX-Solver* and *CFX-Post*. After the determination of the best configuration, geometries and meshes of the geometric variations of the experimental set-up were generated (Fig. 5).

(Figure 5)

One thousand to 5,000 interactions were generated to optimize the mesh refinement. The 5,000 interactions corresponded to a simulation time of approximately 12 days. Validation of the mathematical model was achieved by comparing the density profile of the phases among the simulations and photos of microbubble distribution using a camera positioned outside the prototype.

### **3 Results and Discussion**

#### **3.1 Predominant fluid dynamics**

To achieve an adequate setting for the filming of the microbubble distribution and density of the flowing fluids, one outer side of the DAF chamber was covered with black paper and illumination was performed with a LED light immersed in the upper portion of

VASCONCELOS, R. S. **Modelagem e Simulação das Correlações de *Scale-Up* Para o Processo de Flotação Por Ar Dissolvido (FAD) Utilizando Análise Dimensional.**

the chamber to enhance the contrast among the water, microbubbles and flocs. Fig. 6 displays an image of microbubble distribution in the first chamber with little illumination on the external environment of the laboratory model. Fig. 7 shows the simulation performed with the aid of CFD. This longitudinal plane of the experimental DAF set-up bears considerable resemblance to the distribution of water and microbubble densities displayed in Fig. 6. The comparison of these figures was used as one of the criteria for the validation of important concepts regarding the predominant fluid dynamics in the flotation chamber, such as gravitational and inertial forces. Streamline diagrams available in the CFX library were consulted with regard to inertial forces in each of the chambers [18, 19].

(Figure 6/Figure 7)

Box plots were used to evaluate the distribution of the experimental data on microbubble and floc rising velocities. Central tendency (median), maximum and minimum values as well as outliers were determined. Fig. 8 displays the box plot of median microbubble rising velocity. Symmetric distribution was observed, as the median point was located at the center of the box and no outliers were found. Normal distribution of values within a 95 % confidence interval gave a median microbubble rising velocity of  $8.73 \cdot 10^{-7} \text{ m s}^{-1}$ , with predicted velocity ranging from  $8.51 \cdot 10^{-7} \text{ m s}^{-1}$  to  $8.95 \cdot 10^{-7} \text{ m s}^{-1}$ .

(Figure 8)

VASCONCELOS, R. S. **Modelagem e Simulação das Correlações de *Scale-Up* Para o Processo de Flotação Por Ar Dissolvido (FAD) Utilizando Análise Dimensional.**

Fig. 9 displays the box plot of mean floc rising velocity. Once again, symmetric distribution was observed and no outliers were found. Normal distribution of values within a 95 % confidence interval gave a median floc rising velocity of  $1.175 \cdot 10^{-5} \text{ m s}^{-1}$ , with minimum and maximum values of  $1.132 \cdot 10^{-5} \text{ m s}^{-1}$  and  $1.216 \cdot 10^{-5} \text{ m s}^{-1}$ , respectively.

(Figure 9)

Figs. 8 and 9 show a clear difference between median microbubble and floc flow velocities. Moreover, the minimum and maximum values of both velocity ranges are in quite different regions. This demonstrates that the formation of a floc through the attachment of a microbubble to an oil droplet has a much larger structure than a microbubble alone. The larger size of the floc and the effects of drag in the aqueous phase contribute to the increase in velocity. Tab. 1 displays the characteristics of the microbubbles and flocs and demonstrates the predominance of inertial and gravitational forces in the flotation chambers of the DAF model.

(Table 1)

### 3.2 Proposed scale-up correlations

Taking inertia and gravitation as the most influential aspects of the DAF system, one may conclude that:

VASCONCELOS, R. S. **Modelagem e Simulação das Correlações de *Scale-Up* Para o Processo de Flotação Por Ar Dissolvido (FAD) Utilizando Análise Dimensional.**

$$\frac{Q_m}{Q_p} = \frac{L_m^3 / T_m}{L_p^3 / T_p} = \frac{L_r^3}{T_r} \quad (1)$$

in which  $Q$  = volumetric flow rate ( $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ ),  $L$  = length in meters,  $T$  = time in seconds and  $m$ ,  $p$ ,  $r$  = model, prototype and ratio between scales, respectively.

The relationship involving the times in Eq. (1) must be established to show the influence on flow. Thus, the expression for the description of the relationships between gravitational forces for the model and prototype is as follows:

$$\frac{F_m}{F_p} = \frac{w_m}{w_p} = \frac{\gamma_m \cdot L_m^3}{\gamma_p \cdot L_p^3} = \gamma_r \cdot L_r^3 \quad (2)$$

For the analysis of inertia:

$$\frac{F_m}{F_p} = \frac{M_m a_m}{M_p a_p} = \frac{\rho_m}{\rho_p} \frac{L_m^3}{L_p^3} \frac{L_r}{T_r^2} = \rho_r L_r^3 \frac{L_r}{T_r^2} \quad (3)$$

Equating the relationship of forces:

VASCONCELOS, R. S. **Modelagem e Simulação das Correlações de *Scale-Up* Para o Processo de Flotação Por Ar Dissolvido (FAD) Utilizando Análise Dimensional.**

$$\gamma_r \cdot L_r^3 = \rho_r L_r^3 \cdot \frac{L_r}{T_r^2} \quad (4)$$

Solved for  $T_r$  :

$$T_r^2 = L_r \frac{\rho_r}{\gamma_r} = \frac{L_r}{g_r} \quad (5)$$

Recognizing that  $g_r$  is a unit and replacing Eq. (1):

$$Q_r = \frac{Q_m}{Q_p} = \frac{L_r^3}{L_r^{1/2}} = L_r^{5/2} \quad (6)$$

To illustrate the application of Eq. (6), a possible pilot structure is represented by p and an existing prototype set-up is represented by m. The flotation chamber on a model scales has a volume of 1.5 m<sup>3</sup> (dual chambers) and the combined flow of microbubbles and effluent to be treated total 2 m<sup>3</sup> h<sup>-1</sup>. In this case, mean residence time in the model is as follows:

VASCONCELOS, R. S. **Modelagem e Simulação das Correlações de *Scale-Up* Para o Processo de Flotação Por Ar Dissolvido (FAD) Utilizando Análise Dimensional.**

$$\tau_p = \frac{V_m}{Q_m} = \frac{1.5}{2} = 0.75 \text{ h space-time}$$

Assuming the model was constructed on a 1:5 scale, the mean residence time predicted for the pilot prototype would be deduced as follows:

$$Q_r = L_r^3 \frac{T_p}{T_m} = L_r^{5/2} \quad (7)$$

In other words,

$$T_p = \frac{L_r^{5/2}}{L_r^3} \cdot T_m = \frac{T_m}{L_r^{1/2}} = 0.75 \cdot \sqrt{5} = 1.68 \text{ h} \quad (8)$$

#### 4 Conclusions

The scale-up strategy presented in this paper is a simple tool that is adequate for the design of a pilot DAF based on the laboratory model. This system requires relatively inexpensive material, which reduces the risks of future investments in pilot units that may have relatively large proportions based on the demands of commercial facilities. The validation of this technique should be performed in future studies with data generated from the pilot system proposed herein.

*The authors have declared no conflict of interest.*

### **Symbols used**

$Q$  [ $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ ] volumetric flow rate

$L$  [m] length

$T$  [s] time

$F$  [N] Force

$M$  [kg] mass

$a$  [ $\text{m s}^{-2}$ ] acceleration

$w$  [N] weight

$g$  [ $\text{m s}^{-2}$ ] gravity

$m$  [-] model

$p$  [-] prototype

$r$  [-] ratio

### ***Greek symbols***

$\gamma$  [ $\text{N m}^{-3}$ ] specific weight

$\rho$  [ $\text{kg m}^{-3}$ ] specific mass

$\tau$  [h] spatial-time

### ***Abbreviations***

DAF dissolved air flotation

CFD computational fluid dynami

VASCONCELOS, R. S. **Modelagem e Simulação das Correlações de *Scale-Up* Para o Processo de Flotação Por Ar Dissolvido (FAD) Utilizando Análise Dimensional.**

### **Acknowledgment**

Funding for this study was provided by the State of Pernambuco Foundation for the Assistance to Science and Technology (FACEPE), the Research and Development Program of the Brazilian National Electrical Energy Agency (ANEEL), the National Council for Scientific and Technological Development (CNPq) and the Federal Agency for the Support and Evaluation of Graduate Education (CAPES). The authors are grateful to the laboratories of the Centre for Science and Technology of the Catholic University of Pernambuco and the Centre for Technology and Innovation Management (CGTI), Brazil.

### **References**

- [1] C. A. Grattoni, X. D. Jing, R. A. Dawe, *J. Pet. Sci. Eng.*, **2001**, 29 (1), 53-65. DOI: 35400009490310.0050
- [2] J. Trivedi, T. Babadagli, *J. Pet. Sci. Eng.*, **2008**, 61 (2-4), 58-66. DOI: dx.doi.org/10.1016%2fj.petrol.2008.03.001
- [3] R. W. Fox, A. T. McDonald, *Introduction to fluid mechanics* (Eds: P. J. Pritchard, J. C. Leylegian), 8th ed., John Wiley & Sons Inc., USA., **2011**, 290-320. ISBN: 978-0-470-54755-7

VASCONCELOS, R. S. **Modelagem e Simulação das Correlações de *Scale-Up* Para o Processo de Flotação Por Ar Dissolvido (FAD) Utilizando Análise Dimensional.**

- [4] F-R. Ahmadun, A. Pendashteh, L. C. Abdullah, D. R. A. Biak, S. S. Madaeni, Z. Z. Abdin, *J. Hazard. Mater.*, **2009**, 170 (2-3), 530-551. DOI: [dx.doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.05.044](https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.05.044)
- [5] M. L. Hladik, M. J. Focazio, M. Engle, *Sci. Total Environ.*, **2014**, 466-467 (1), 1085-1093. DOI: [dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.08.008](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.08.008)
- [6] F. Bayati, J. Shayegan, A. Noorjahan, *J. Pet. Sci. Eng.*, **2012**, 80 (1), 26-31. DOI: [dx.doi.org/10.1016/j.petrol.2011.10.001](https://doi.org/10.1016/j.petrol.2011.10.001)
- [7] J. A. Finch, J. E. Nisset, C. Acuña, *Min. Eng.*, **2008**, 21 (12-14), 949-957. DOI: [dx.doi.org/10.1016/j.mineng.2008.04.006](https://doi.org/10.1016/j.mineng.2008.04.006)
- [8] J. Kunes, *Similarity and Modeling in Science and Engineering*, International Science Publishing Springer, Cambridge **2012**, 30-166. DOI: [dx.doi.org/10.1007/978-1-907343-78-0](https://doi.org/10.1007/978-1-907343-78-0). ISBN: 978-1-907343-77-3
- [9] M. C. Ruzicka, R. Bunganic, J. Drahos, *Chem. Eng. Res. Des.*, **2008**, 87 (10), 1349-1356. DOI: [dx.doi.org/10.1016/j.cherd.2009.03.001](https://doi.org/10.1016/j.cherd.2009.03.001)
- [10] P.T.L. Koh, M.P. Schwarz, *Miner. Eng.*, **2006**, 19 (6-8), 619-626. DOI: [dx.doi.org/10.1016/j.mineng.2005.09.013](https://doi.org/10.1016/j.mineng.2005.09.013)
- [11] M. Kostoglou, T. D. Karapantsios, K. A. Matis, *Ind. Eng. Chem. Res.*, **2007**, 46 (20), 6590-6599. DOI: [dx.doi.org/10.1021/ie0703989](https://doi.org/10.1021/ie0703989)
- [12] V. M. Zlokarnik, *Scale-up in Chemical Engineering* Wiley, Germany **2006**, 133-139. ISBN: 3-527-60056-6

VASCONCELOS, R. S. **Modelagem e Simulação das Correlações de Scale-Up Para o Processo de Flotação Por Ar Dissolvido (FAD) Utilizando Análise Dimensional.**

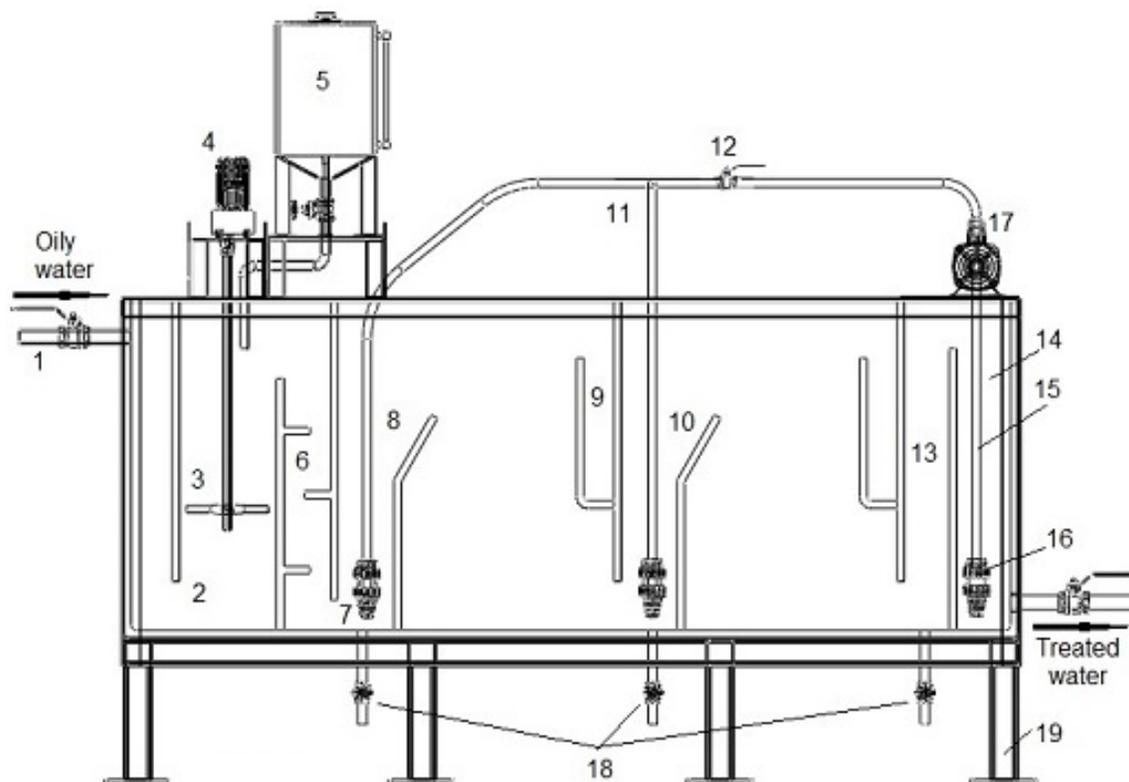
- [13] G. M. Evans, E. Doroodchi, G. L. Lane, P. T. L. Koh, M. P. Schwarz, *Chem. Eng. Res. Des.*, **2008**, 86 (12), 1350-1362. DOI: [dx.doi.org/10.1016/j.cherd.2008.07.006](http://dx.doi.org/10.1016/j.cherd.2008.07.006)
- [14] T. Y. Liu, M. P. Schmarz, *Chem. Eng. Sci.*, **2009**, 64 (24), 5287-5301. DOI: [dx.doi.org/10.1016/j.ces.2009.09.014](http://dx.doi.org/10.1016/j.ces.2009.09.014)
- [15] J. Yianatos, F. Contreras, P. Morales, F. Coddou, H. Elgueta, J. Ortíz, *Miner. Eng.*, **2010**, 23 (11), 877-884. DOI: [dx.doi.org/10.1016/j.mineng.2010.05.004](http://dx.doi.org/10.1016/j.mineng.2010.05.004)
- [16] F. C. P. R. Silva, N. M. P. R. Silva, A. E. Moura, R. G. Almeida, J. M. Luna, R. D. Rufino, V. A. Santos, L. A. Sarubbo, *Sep. Sci. Technol.*, **2014**, in press. DOI: [10.1080/01496395.2014.957319](http://dx.doi.org/10.1080/01496395.2014.957319)
- [17] Formosa, L. G. Frechette, *Energy*, 2013, 57 (Complete), 796-808. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016%2Fj.energy.2013.05.009>
- [18] M. Bondelind, S. Sasic, M. Kostoglou, L. Bergdahl, T.J.R. Pettersson, *Colloids Surf., A* **2010**, 365 (1-3), 137-144. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016%2Fj.colsurfa.2010.02.035>
- [19] J. Behin, S. Bahrami, *Chem. Eng. Process.*, **2012**, 59 (Complete), 1-8. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016%2Fj.cep.2012.05.004>

VASCONCELOS, R. S. **Modelagem e Simulação das Correlações de *Scale-Up* Para o Processo de Flotação Por Ar Dissolvido (FAD) Utilizando Análise Dimensional.**

**Table 1.** Characteristics of microbubbles and flocs

| <b>Characteristics</b>                | <b>Microbubbles</b> | <b>Flocs</b>                       |
|---------------------------------------|---------------------|------------------------------------|
| Appearance                            | Whitish mist        | Yellowish mist                     |
| Movement                              | Chaotic             | Ascending or in the flow direction |
| Coalescence                           | Cluster formation   | Oil droplet-water                  |
| Rising velocity ( $\text{m s}^{-1}$ ) | $8.7 \cdot 10^{-7}$ | $1.18 \cdot 10^{-5}$               |

VASCONCELOS, R. S. **Modelagem e Simulação das Correlações de *Scale-Up* Para o Processo de Flotação Por Ar Dissolvido (FAD) Utilizando Análise Dimensional.**



1 - Entrance; 2 - Mixing chamber inlet; 3 - Stirrer; 4 - Agitator motor; 5 - Surfactant tank; 6 - Static mixer; 7 - Microbubble diffuser; 8 - Flotation chamber 1; 9 - Oily foam collector; 10 - Flotation chamber 2; 11 - Microbubble tubes; 12 - Flow control valve; 13 - Treated water separator; 14 - Treated water chamber; 15 - Suction pipe; 16 - Check valve; 17 - Microbubble pump; 18 - Drain valves; 19 - Metal structure

Figure 1: Experimental setup of the DAF used for laboratory testing

VASCONCELOS, R. S. Modelagem e Simulação das Correlações de *Scale-Up* Para o Processo de Flotação Por Ar Dissolvido (FAD) Utilizando Análise Dimensional.

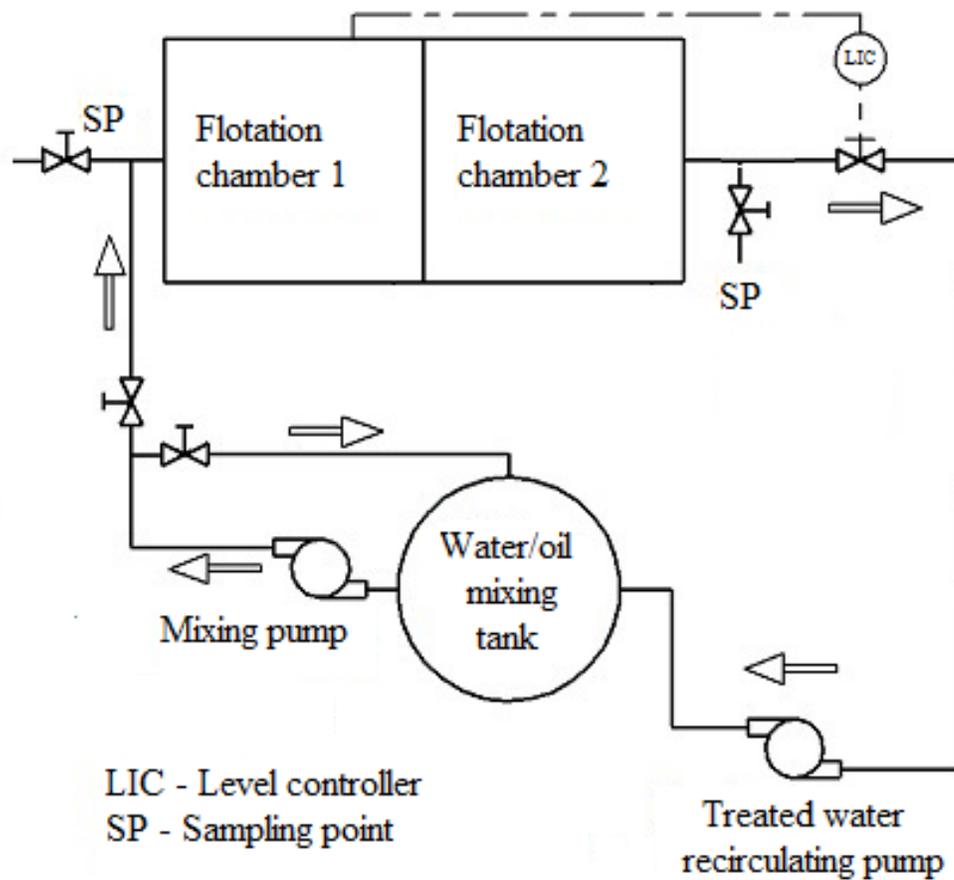


Figure 2: Flowchart of components used to control treated water level  
(adapted from Silva et al., 2013)

VASCONCELOS, R. S. **Modelagem e Simulação das Correlações de *Scale-Up* Para o Processo de Flotação Por Ar Dissolvido (FAD) Utilizando Análise Dimensional.**

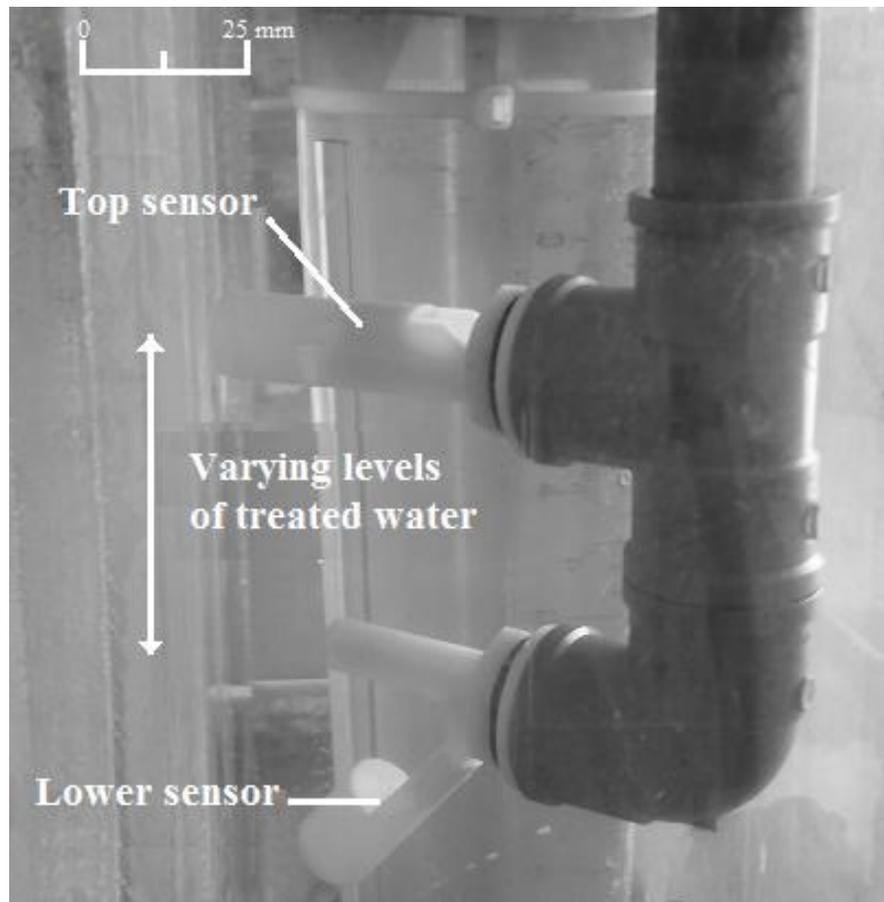
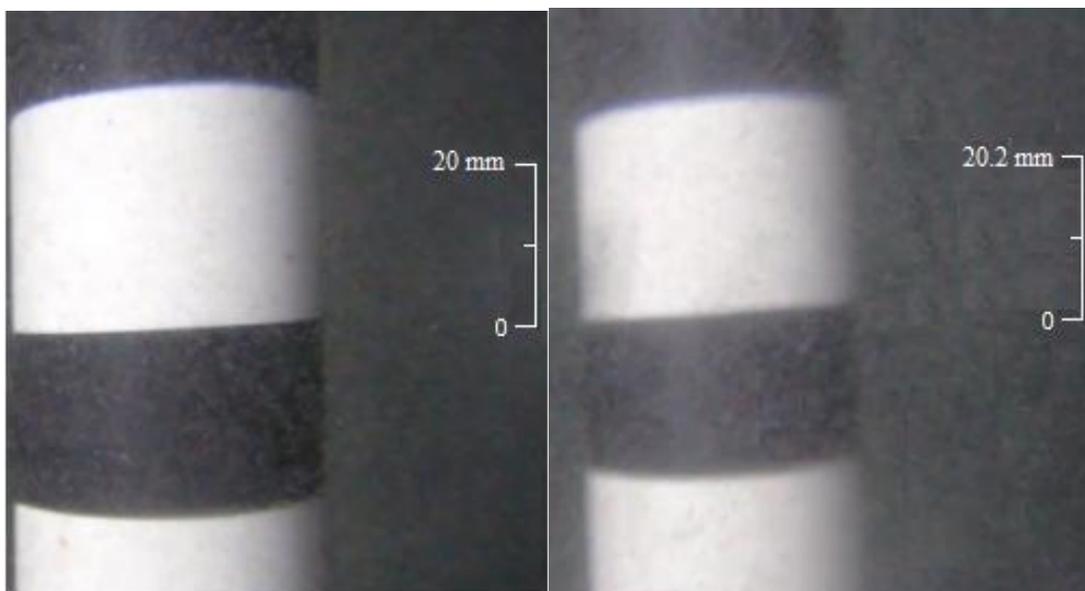


Figure 3: Level control strategy for obtaining steady-state physical DAF model

VASCONCELOS, R. S. **Modelagem e Simulação das Correlações de *Scale-Up* Para o Processo de Flotação Por Ar Dissolvido (FAD) Utilizando Análise Dimensional.**



(a)

(b)

Figure 4: (a) microbubbles; (b) flocs

VASCONCELOS, R. S. **Modelagem e Simulação das Correlações de *Scale-Up* Para o Processo de Flotação Por Ar Dissolvido (FAD) Utilizando Análise Dimensional.**

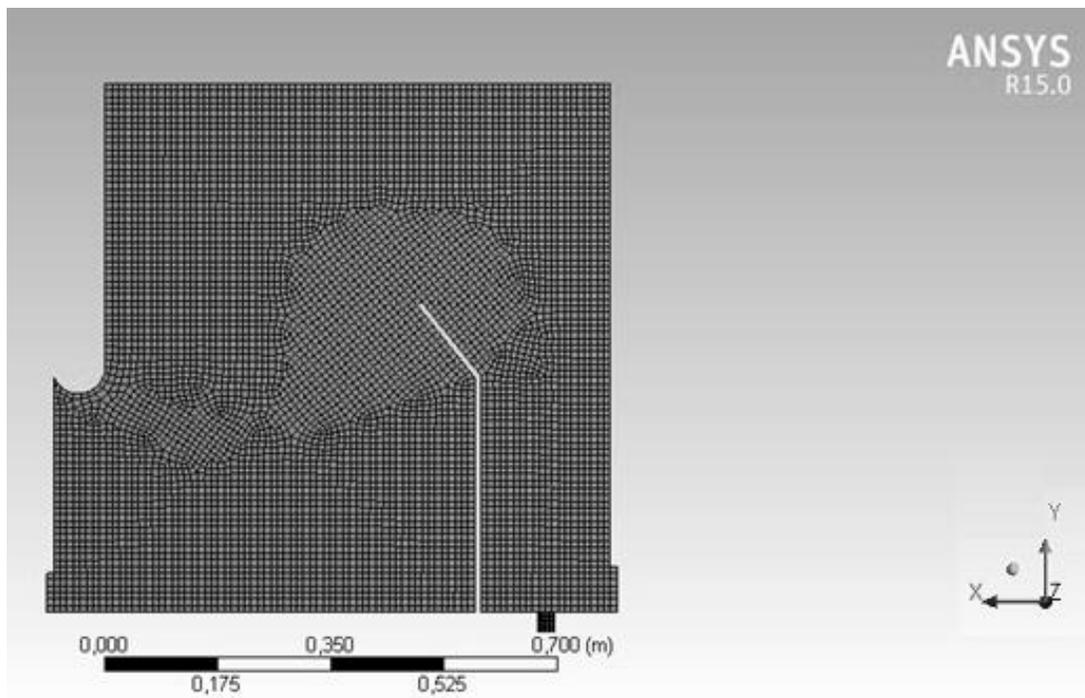


Figure 5: Unstructured mesh of cutting plane of prototype flotation chamber

VASCONCELOS, R. S. **Modelagem e Simulação das Correlações de *Scale-Up* Para o Processo de Flotação Por Ar Dissolvido (FAD) Utilizando Análise Dimensional.**



Figure 6: External view of microbubbles distribution in prototype flotation chamber

VASCONCELOS, R. S. **Modelagem e Simulação das Correlações de *Scale-Up* Para o Processo de Flotação Por Ar Dissolvido (FAD) Utilizando Análise Dimensional.**

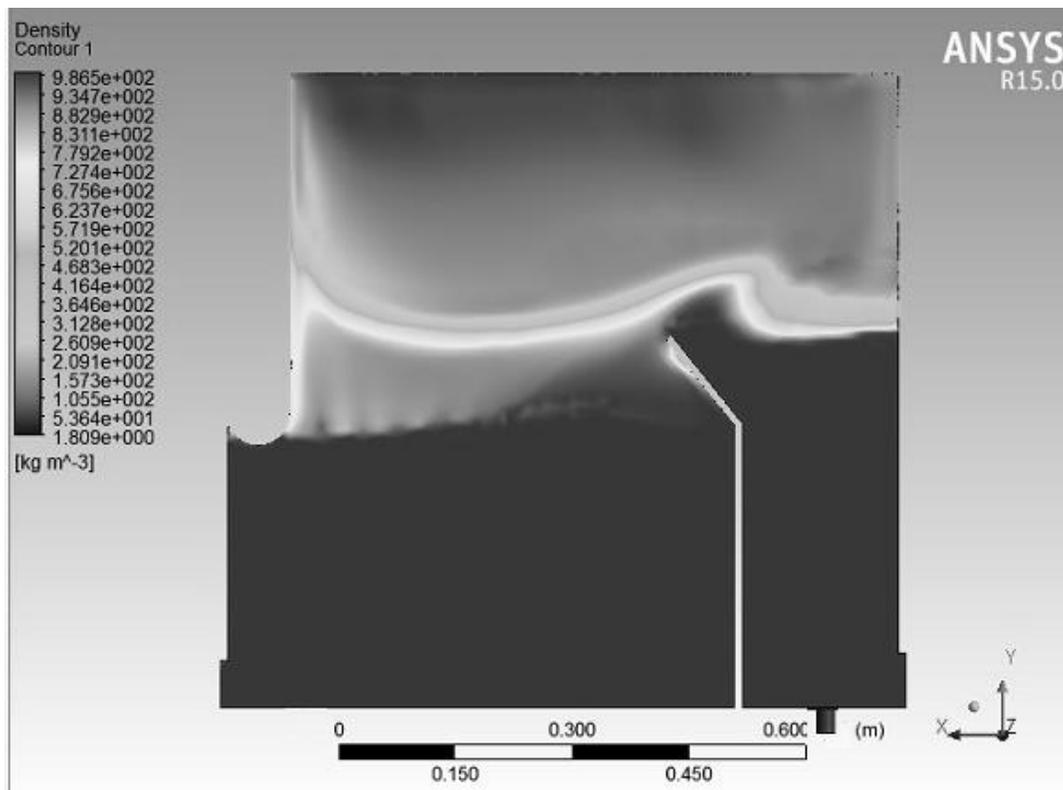


Figure 7: Cutting plane of flotation chamber showing phase density profiles

VASCONCELOS, R. S. **Modelagem e Simulação das Correlações de *Scale-Up* Para o Processo de Flotação Por Ar Dissolvido (FAD) Utilizando Análise Dimensional.**

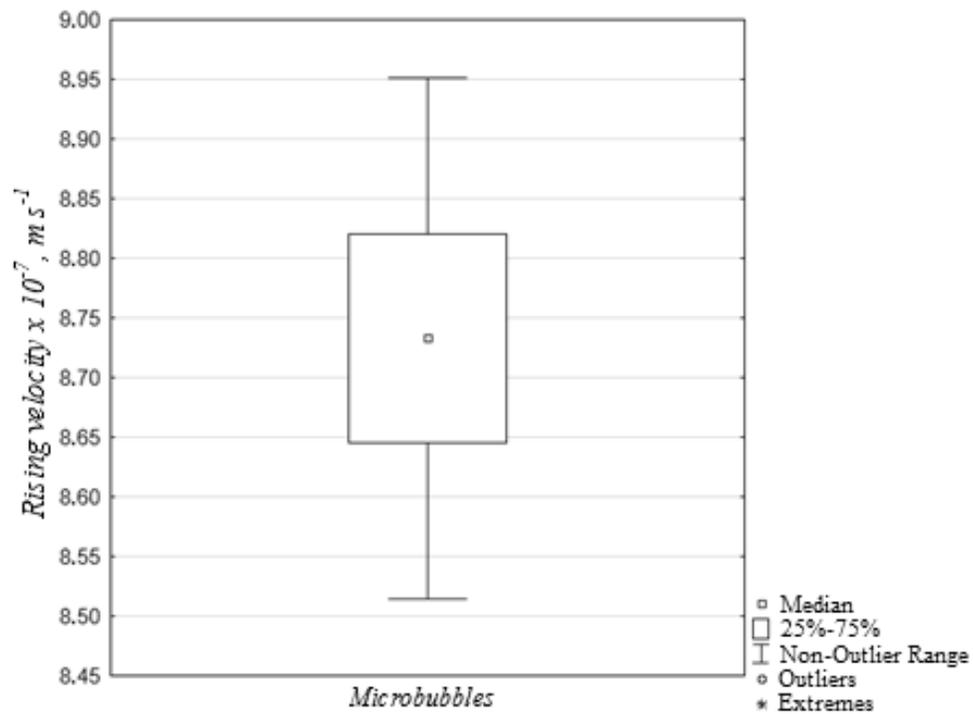


Figure 8: Box plot of mean microbubble rising velocity

VASCONCELOS, R. S. **Modelagem e Simulação das Correlações de *Scale-Up* Para o Processo de Flotação Por Ar Dissolvido (FAD) Utilizando Análise Dimensional.**

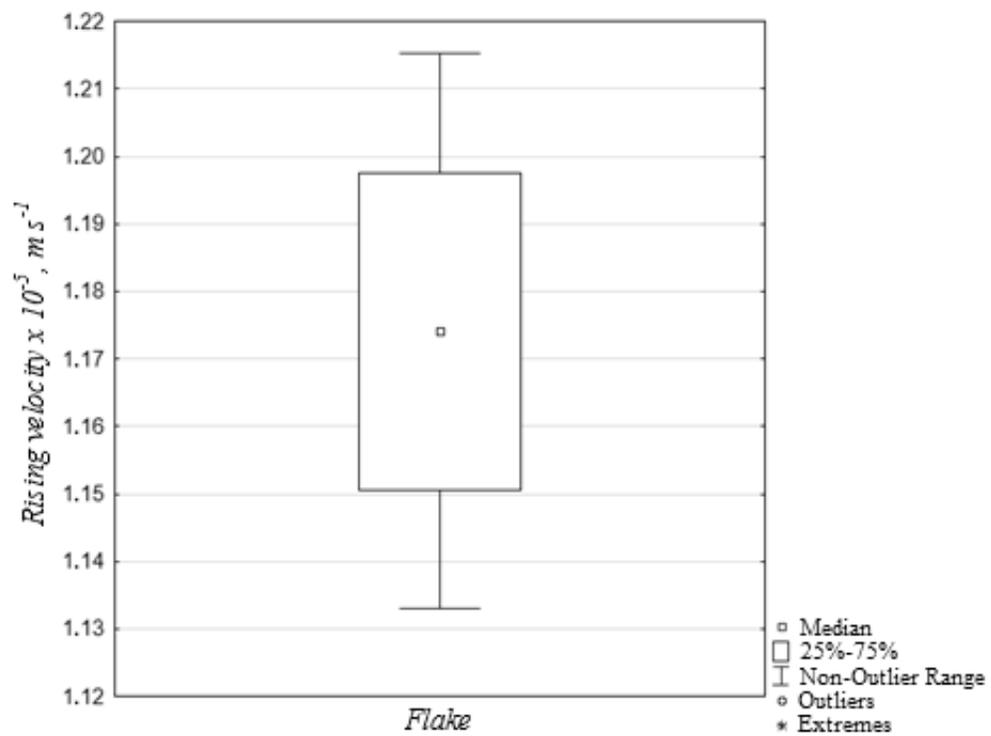


Figure 9: Box plot of mean flake rising velocity

VASCONCELOS, R. S. **Modelagem e Simulação das Correlações de *Scale-Up* Para o Processo de Flotação Por Ar Dissolvido (FAD) Utilizando Análise Dimensional.**

## TABLE LEGENDS

**Table 1.** Characteristics of microbubbles and flocs.

## FIGURE LEGENDS

**Figure 1.** Experimental setup of the DAF used for laboratory testing.

**Figure 2.** Flowchart of components used to control treated water level (adapted from Silva et al. [16]).

**Figure 3.** Level control strategy for obtaining steady-state physical DAF model.

**Figure 4.** (a) microbubbles; (b) flocs.

**Figure 5.** Unstructured mesh of cutting plane of prototype flotation chamber.

**Figure 6.** External view of microbubbles distribution in prototype flotation chamber.

**Figure 7.** Cutting plane of flotation chamber showing phase density profiles.

**Figure 8.** Box plot of mean microbubble rising velocity.

**Figure 9.** Box plot of mean flake rising velocity.

VASCONCELOS, R. S. **Modelagem e Simulação das Correlações de *Scale-Up* Para o Processo de Flotação Por Ar Dissolvido (FAD) Utilizando Análise Dimensional.**

**SHORT TEXT FOR THE TABLE OF CONTENTS SECTION**

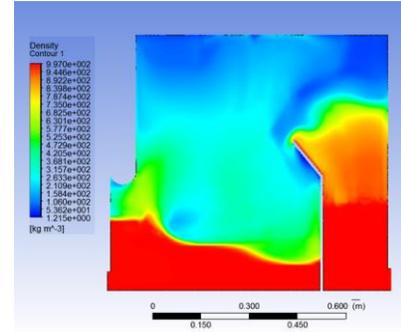
**Research Article:** This work describes a simple strategy to reduce future risks in scale-up investments by using similarity correlations based on the most important gravitational and inertial forces in a dissolved air flotation (DAF) chamber in a laboratory scale model.

**Strategy for a Scale-up Correlation in a Dissolved Air Flotation Chamber**

R. S. Vasconcelos, R. C. S. Henauth, A. E. Moura, V. A. Santos, L. A. Sarubbo\*

*Chem. Eng. Technol.* **20XX**, XX (X),

**XXXX...XXXX**



VASCONCELOS, R. S. **Modelagem e Simulação das Correlações de *Scale-Up* Para o Processo de Flotação Por Ar Dissolvido (FAD) Utilizando Análise Dimensional.**

----- Mensagem encaminhada -----

De: [cet@wiley-vch.de](mailto:cet@wiley-vch.de)

Para: [leonie@unicap.br](mailto:leonie@unicap.br)

Enviadas: Quinta-feira, 6 de novembro de 2014 19:01:10

Assunto: Chemical Engineering & Technology - Manuscript number ceat.201400665

06-Nov-2014

Dear Dr. Sarubbo,

Your manuscript entitled "Strategy for a Scale-up Correlation in a Dissolved Air Flotation Chamber" has been successfully submitted online and is presently being given full consideration for publication in Chemical Engineering & Technology.

Your manuscript number is ceat.201400665. Please mention this number in all future correspondence regarding this submission.

You can view the status of your manuscript at any time by checking your Author Center after logging into

<https://mc.manuscriptcentral.com/cet>

Please note: The status displayed will be "In process" until a decision has been made. "In process" covers checking of the manuscript by the editorial office and reviewing. If you have difficulty using this site, please click the 'Get Help Now' link at the top right corner of the site.

Thank you for submitting your manuscript to Chemical Engineering & Technology.

Yours sincerely,

Editorial Office

Dr. Barbara Boeck  
Chemical Engineering & Technology  
Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA  
Boschstraße 12  
D-69469 Weinheim, Germany

Tel.: +49 (0) 6201 - 606 - 520

Fax: +49 (0) 6201 - 606 - 203

E-mail: [cet@wiley.com](mailto:cet@wiley.com)

Homepage: [www.cet-journal.com](http://www.cet-journal.com)

Register now for the free Wiley-VCH Alerting Service!

<http://www.wiley-vch.de/home/pas>

Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA – A company of John Wiley & Sons, Inc. - Location of the Company: Weinheim - Trade Register: Mannheim, HRB 432833.  
Chairman of the Supervisory Board: Stephen Michael Smith. General Partner: John Wiley & Sons GmbH, Location: Weinheim – Trade Register Mannheim, HRB 432296 –  
Managing Directors: Prof. Dr. Peter Gregory, Dr. Jon Walmsley.

VASCONCELOS, R. S. **Modelagem e Simulação das Correlações de *Scale-Up* Para o Processo de Flotação Por Ar Dissolvido (FAD) Utilizando Análise Dimensional.**

**Suggestions of possible reviewers:**

Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Minerva Villanueva Rodríguez  
Universidad Autónoma de Nuevo León (UANL)  
Facultad de Ciências Químicas, Av. Universidad S/N, Ciudad Universitaria, San  
Nicolás de Los Garza, C.p. 66451, Nuevo León, Mexico  
E-mail: [minuevardr@uanl.edu.mx](mailto:minuevardr@uanl.edu.mx)

Prof<sup>o</sup> Dr<sup>o</sup> Peter H. Dimberg  
Department of Earth Sciences  
Uppsala University, Villav. 16, 752 36 Uppsala – Sweden  
E-mail: [peter.dimberg@geo.uu.se](mailto:peter.dimberg@geo.uu.se)

VASCONCELOS, R. S. *Modelagem e Simulação das Correlações de Scale-Up Para o Processo de Flotação Por Ar Dissolvido (FAD) Utilizando Análise Dimensional.*

## Normas Para Submissão em Periódico Internacional

# Chemical Engineering & Technology

### INSTRUCTIONS FOR AUTHORS

This guideline consists of two parts. The first part covers all aspects regarding the manuscript preparation while the second refers to the submission process. To avoid any delay and time-consuming restructuring, we ask and encourage our authors to read the guidelines **before** writing the manuscript. Please note our checklist which will help you to avoid the most common mistakes.

#### PART I

#### 1 GENERAL

*Chemical Engineering & Technology* is a peer-reviewed journal that covers all aspects of chemical engineering, process engineering, biotechnology, and design of apparatus. The ethical guidelines for publication issued by the [Committee on Publication Ethics](#) (COPE) are followed and applied by Chemical Engineering & Technology. Additionally, Chemical Engineering & Technology ensures compliance by using plagiarism detection software. Authors should declare any conflict of interest in their cover letter. **Manuscripts which do not follow the “Instructions for Authors” will not be further processed.**

VASCONCELOS, R. S. **Modelagem e Simulação das Correlações de *Scale-Up* Para o Processo de Flotação Por Ar Dissolvido (FAD) Utilizando Análise Dimensional.**

We encourage our authors to visit our webpage [“Tips for Writing Better Science Papers”](#) published by Wiley-VCH. Furthermore, we refer to the recent January issue of Chem. Eng. Technol.. This issue is accessible free of charge and should help authors to get an impression of the final layout.

## 2 TYPES OF CONTRIBUTIONS

**Review Articles** give a general overview of a particular field providing the reader with an appreciation of the importance of the work. Rather than an assemblage of information with a complete literature survey, a critically selection of the material is desired. Review Articles should not exceed 45 000 characters (incl. blanks). Up to 15 main figures – comprising a total of max. 23 subfigures – may be included.

**Research Articles** report details of studies that have not been published previously, except in the form of a preliminary note. Research Articles have to be limited to 28 000 characters (incl. blanks). Up to 10 figures – comprising a total of max. 15 subfigures – may be included.

**Communications** are short reports on experimental or theoretical studies in all areas covered by *Chemical Engineering & Technology*. The results must be of general interest or at least contribute to the development of an important area of research.

Communications should be limited to 18 000 characters (incl. blanks). Up to 6 figures – comprising a total of max. 9 subfigures – may be included.

## 3 LANGUAGE

Papers must be written in English. Use American spelling. Please use a simple, clear style, and avoid jargon. Manuscripts should be checked by a native English speaker prior to submission. Please inform us in the cover letter if your manuscript

VASCONCELOS, R. S. **Modelagem e Simulação das Correlações de *Scale-Up* Para o Processo de Flotação Por Ar Dissolvido (FAD) Utilizando Análise Dimensional.**

has been professionally edited before submission, such as by [Wiley English Language Editing Services](#).

## 4 ORGANIZATION OF MANUSCRIPT / FORMAT

The sequence of the parts of the main document should be:

Title of the article – Authors – Abstract – Keywords – Text of the contribution – Acknowledgment – Appendix – Symbols used – References – Tables with headings – Figure legends – Short text for the table of contents section

Manuscripts should be divided into sections and subsections by headings and subheadings. Footnotes to the text are to be avoided.

Please submit your paper as a MS Word file. Manuscripts written in a TEX-format, even if they are submitted as a PDF, have to be converted. **Please do not** use any word template or try to arrange your text, figures, tables according the final layout of a published article, e.g., two columns, scale-down of figures etc.

In case you are not willing to pay for color reproduction in the printed and online version of your article, please do not refer to any color in your figures within the text, figure legends etc.

### 4.1 Title

The title of the paper should be given with as many meaningful terms as possible, but limited to about twelve words or 100 characters. Avoid abbreviations and terms like “Contributions to the Development of...”, “Study of...”, “Novel”, “New” etc.

VASCONCELOS, R. S. **Modelagem e Simulação das Correlações de *Scale-Up* Para o Processo de Flotação Por Ar Dissolvido (FAD) Utilizando Análise Dimensional.**

## 4.2 Authors

Give the names of all authors with at least one forename spelled out for every author. Please provide the full address of each author. The author, to whom the correspondence shall be addressed, has to be indicated. If requested, *Chem. Eng. Technol.* marks authors who have contributed equally to the manuscript.

## 4.3 Abstract

Each article comprises an abstract (600–800 characters,). The abstract should be as informative as possible but the presentation of experimental details should be avoided. This is, however, **not** the section where detailed values should be provided. The abstract should contain several keywords to aid finding the paper online. The abstract should contain neither hints to graphical elements or tables in the paper nor to references, as the abstract will be found independently, e.g., in databases. Please do not copy sentences of the introductory part. The style guide mentioned in Sect. 4.5 has also to be followed in this section.

## 4.4 Keyword

Some meaningful keywords (max. 5) should be provided in alphabetical order. Avoid abbreviations. One keyword is limited to three words. Try to identify keywords a reader would be looking for.

## 4.5 Main Part

As mentioned earlier, *Chem. Eng. Technol.* uses American spelling, e.g., behavior, optimization, modeling, etc. Manuscripts should be divided into sections and subsections by headings and subheadings. Footnotes to the text are to be avoided. Furthermore, please avoid phrases like “we believe“, “we feel“, “we conduct“, “we can see“, as well as personal opinions. Authors are only allowed to use the first person when it helps to compare results, e.g., “Jones reported ..., but our results”.

VASCONCELOS, R. S. **Modelagem e Simulação das Correlações de *Scale-Up* Para o Processo de Flotação Por Ar Dissolvido (FAD) Utilizando Análise Dimensional.**

Please create subordinated clauses whenever appropriate instead of an excessive use of parentheses and dashes. Parentheses are allowed within the text when mentioning suppliers of chemicals and equipment and purity of chemicals, e.g., acetone (99+%, Sigma Aldrich).

Tables and figures are not shown in the main part. Please denote the position of the table/figure after the first occurrence in the main text by adding the note “((Figure x/Table y))” after the passage. In the text, sections, tables, figures and equations are to be referred as abbreviated Sect. x, Tab. x, Fig. x, and Eq. (x), respectively.

#### 4.5.1 Symbols, Units, Abbreviations

Please use italic symbols for variables and constants (e.g.,  $p$ ,  $V$ ,  $n$ ,  $R$ ,  $T$ ,  $Re$ ), bold latin symbols for vectors and matrices, and roman type for mathematical expressions (e.g.,  $\log$ ,  $\ln$ ,  $\tan$ ,  $\exp$ ). Please do not use one variable for different definitions.

Symbols used to represent variables, constants, quantities, properties, etc. must be defined in the text at their first occurrence. Please use exponents and not slashes within units, e.g.,  $g\ L^{-1}h^{-1}$ . Only SI quantities and units are to be used (SI = *Système International d'Unités*). If data with non-SI units have to be reported, they should be put in parentheses behind the corresponding data with SI units. In addition, a list of all symbols and abbreviations used must be compiled at the end of the text under the heading “Symbols used”, see Sect. 4.7.

Abbreviations are always written base type.

VASCONCELOS, R. S. **Modelagem e Simulação das Correlações de *Scale-Up* Para o Processo de Flotação Por Ar Dissolvido (FAD) Utilizando Análise Dimensional.**

Sub- and superscripts to variables are edited as mentioned above. Symbols for physical quantities are written in italics while abbreviations are written in base type, e.g.,  $V_a$  **but**  $V_{max}$ .

#### 4.5.2 Structural Diagrams and Mathematical Equations

Structural diagrams of molecules as well as mathematical equations should be drawn or written in the manuscript at the places in which they belong. They should always stand alone, i.e., occupy extra line, and have to be numerated in ascending order with Arabic numerals in parentheses. Important: *Chem. Eng. Technol.* does not distinguish between mathematical equations and reaction schemes.

Use the equation editor (Microsoft Equation Editor 3.0 or Mathtype 6.0) for equations. **Do not** import special symbols and characters as graphics/formula in the running text. Please use either the Symbol font or the “insert special symbol” option provided in most word processing programs.  
Do not import equations as images.

If applicable, please use the template for structure drawings in ChemDraw. The template can be downloaded [here](#). In case another software is used, please use reasonable fonts and bond lengths/widths.

Please ensure the correct use of symbols within chemical reactions, e.g.,  $\rightarrow$ ,  $\Leftrightarrow$ ,  $\leftrightarrow$ , etc. In case reaction schemes are not written using the equations editors, e.g.,  $A + B \Leftrightarrow C + C$ , the most common arrows can be found within the font Lucida Sans Unicode.

VASCONCELOS, R. S. **Modelagem e Simulação das Correlações de *Scale-Up* Para o Processo de Flotação Por Ar Dissolvido (FAD) Utilizando Análise Dimensional.**

#### **4.6 Acknowledgment**

Acknowledgments of financial support, advice, or other kinds of assistance should be made at the end of the paper under the heading “Acknowledgment”. Please do not use any abbreviation!

#### **4.7 Symbols used**

All symbols and abbreviations used in the manuscript have to be listed. Please divide this list in “Symbols”, “Greek symbols”, “Sub- and Superscripts”, and “Abbreviations”.

Please compile symbol, unit in squared brackets and meaning, e.g.,  
 $R_p$  [g L<sup>-1</sup>h<sup>-1</sup>] volumetric productivity

#### **4.8 References**

The responsibility for the accuracy of references rests with the authors. Please ensure that references are formatted correctly, also in view of italics, bold letters, blanks, commas, DOI, etc.

References have to be numbered sequentially in the order in which they are cited in the text. The numbers should be enclosed in square brackets, e.g., “...as was shown by Brown [1], Johnson [2, 3], and Smith [4–7]”.

The footnote and endnote options provided by many text programs should not be used or have to be deactivated before submission. Additionally, in case professional reference software like EndNote, Refworks, etc. is used, please delete all field-functions before submission.

All journal abbreviations have to follow the recommendations published by [CASSI](#).

VASCONCELOS, R. S. **Modelagem e Simulação das Correlações de *Scale-Up* Para o Processo de Flotação Por Ar Dissolvido (FAD) Utilizando Análise Dimensional.**

We encourage our authors to check DOIs by using [CrossRef](#).

In citing the literature, the formats below should be followed:

• **Journal Article**

[no.]<tab>A. B. Author1, C. D. Author2, E. F. Author3, *Abbrev. Journal Title* **Year**, *Volume (Issue)*, first page–last page. DOI:

[1] K. Liebeton, J. Eck, *Eng. Life Sci.* **2004**, 4 (6), 557–562. DOI: 10.1002/elsc.200402156

• **Book**

[no.]<tab>A. B. Author1, C. D. Author2, *Title of Book*, Edition, Publisher, Location **Year**.

[2] R. McWeeny, *Coulson's Valence*, 3rd ed., Oxford University Press, Oxford **1979**.

For towns in the USA specify the state (except for very well known ones such as New York); use the two-letter postal abbreviation. If the town is not well known, add the country, e.g., Dordrecht, The Netherlands. Only one location should be given.

• **Book Published in a Series**

[no.]<tab>A. B. Author1, C. D. Author2, *Title of Book*, Edition, Series Title, Vol. no. (in series), Publisher, Location **Year**.

[3] L. B. Schein, *Electrophotography and Development Physics*, 2nd ed., Springer Series in Electrophysics, Vol. 14, Springer, Berlin **1992**.

Note that the series editors are **not** listed.

• **Multi-authored (Edited) Book**

VASCONCELOS, R. S. **Modelagem e Simulação das Correlações de *Scale-Up* Para o Processo de Flotação Por Ar Dissolvido (FAD) Utilizando Análise Dimensional.**

#### a) Whole (or one or more volumes)

[no.]<tab>*Title of Book*, Edition (Eds: E. F. Editor1, G. H. Editor2, I. J. Editor3), Publisher, Location **Year**.

[4] *Handbook of Heterogeneous Catalysis* (Eds: G. Ertl, H. Knözinger, J. Weitkamp), Wiley-VCH, Weinheim **1997**.

#### b) Chapter

[no.]<tab>A. B. Author1, C. D. Author2, in *Title of Book*, Edition (Eds: E. F. Editor1, G. H. Editor2, I. J. Editor3), Publisher, Location **Year**, Ch. no.

[5] T. Kodas, in *The Chemistry of Metal CVD* (Eds: T. Kodas, M. Hampden-Smith), VCH, Weinheim **1994**.

The chapter number at the end (e.g., Ch. 5) is optional. A page number is sometimes given instead of a chapter number, e.g., 312. The first and last pages may also be given, e.g., 312–345.

#### • Proceedings Volume

##### a) Whole volume

[no.]<tab>*Abbrev. Proc. Title* (Eds: A. B. Editor1, C. D. Editor2), Publisher, Location **Year of publication**.

[6] *Proc. of the 4th Int. Conf. on Rheology* (Eds: E. H. Lee, A. L. Copley), Interscience, New York **1965**.

Note that in the proceedings title only words such as Conference (Conf.), International (Int.), or Symposium (Symp.) are abbreviated. The subject of the meeting itself is not abbreviated. The year is the year of publication, which is not necessarily the year the conference was held.

VASCONCELOS, R. S. **Modelagem e Simulação das Correlações de *Scale-Up* Para o Processo de Flotação Por Ar Dissolvido (FAD) Utilizando Análise Dimensional.**

## **b) Paper**

[no.]<tab>A. B. Author1, C. D. Author2, E. F. Author3, G. H. Author4, in *Abbrev. Proc. Title* (Eds: I. J. Editor1, K. L. Editor2), Publisher, Location **Year of publication**, p. no.

[7] A. Katschalsky, A. Oplatka, in *Proc. of the 4th Int. Conf. on Rheology* (Eds: E. H. Lee, A. L. Copley), Interscience, New York **1965**.

The page number is optional.

### **• Presentation at a Conference (Proceedings not Published)**

[no.]<tab>A. B. Author1, *Abbrev. Conf. Title*, Location of conference, Month and **Year of conference**.

[8] A. Katschalsky, *4th Int. Conf. on Rheology*, San Diego, CA, September **1964**.

### **• Thesis**

[no.]<tab>A. B. Author, *Degree Thesis*, University((Location)) **Year**.

[9] T. Bieringer, *Ph.D. Thesis*, Universität Bayreuth **1996**.

Note that the degree (Diploma, M.Sc., Ph.D., etc.) should be specified. The location needs only to be given if it is not obvious from the name of the university.

### **• Patent**

[no.]<tab>A. B. Author1, A. B. Author2 (Company), *Country Patent Number*, **Year**.

[10] R. Koksang, *US Patent 5 487 959*, **1996**.

VASCONCELOS, R. S. **Modelagem e Simulação das Correlações de *Scale-Up* Para o Processo de Flotação Por Ar Dissolvido (FAD) Utilizando Análise Dimensional.**

If a patent is consigned to a company, the company name may be included in brackets after the names of the authors. Rather than a country, the patent may be a world patent or a European (EU) patent.

#### • **Work Accepted for Publication**

[no.]<tab>A. B. Author1, C. D. Author2, E. F. Author3, *Abbrev. Journal Title*, in press. DOI:

[11] C. Wang, Y. Zhang, *Adv. Mater.*, in press. DOI: 10.1002/adma.200400418

#### **4.9 Tables**

Every table must be referred to in the text, e.g., “(see Tab. 3)”.

Tables have to be numbered with Arabic numerals in the sequence in which they occur. They are to be typed at the end of the manuscript. The table caption must explain in detail the contents of the table. As the table itself, it must be written so that it can be read and understood without reference to the text.

Every column and every line of a table must be labeled unambiguously and indicate units wherever data are reported.

Footnotes in tables are denoted a), b), c), etc.

Tables **must not** be submitted as images. Use the table function provided by MS Word instead.

#### **4.10 Figure Legends**

Figure legends have to be self-explanatory. In case of subfigures, annotations like (a), (b), (c), etc. have to be used instead of bottom, left, right etc. In case a

VASCONCELOS, R. S. **Modelagem e Simulação das Correlações de *Scale-Up* Para o Processo de Flotação Por Ar Dissolvido (FAD) Utilizando Análise Dimensional.**

complete setup is shown, the list of components has to be listed in the figure legend, not in the figure itself (see also Sect. 5).

Particular care should be taken to ensure that figures reporting data are unambiguously labeled with regards to units and, in their legends, provide adequate information about the condition under which the data were obtained.

#### **4.11 Table of Contents: Graphical Abstracts**

A short text for the Table of Contents (300–400 characters) must be included as the last page of the main document of every manuscript formulated to encourage readers to read the article. Repetition or a paraphrase of the title and presentation of experimental details should be avoided. In this section, colored graphics are generally advantageous. Authors are invited to submit a colored figure free of charge for the ToC. This figure will be used for further advertising. Please do not refer to this figure within the article. A template can be downloaded [here](#).

## **5 FIGURES AND DIAGRAMS**

As mentioned in Sect. 2, the number of figures is limited by the type of contribution. The number of subfigures is the total limit for the whole manuscript. **One main figure may consist of max. four subfigures.** Please note that one subfigure may draw on 1/8 of the final printed page. One main figure must not draw on more than ½ of the final printed page. Please use the Supporting Information (Sect. 6) to present figures and diagrams of long term experiments.

Figures should be sent as TIF, JPG, or EPS files with highest resolution possible (at least 300 dpi). Please do not implement the figures in MS Word or Powerpoint files (except figures for Supporting Information)

VASCONCELOS, R. S. **Modelagem e Simulação das Correlações de *Scale-Up* Para o Processo de Flotação Por Ar Dissolvido (FAD) Utilizando Análise Dimensional.**

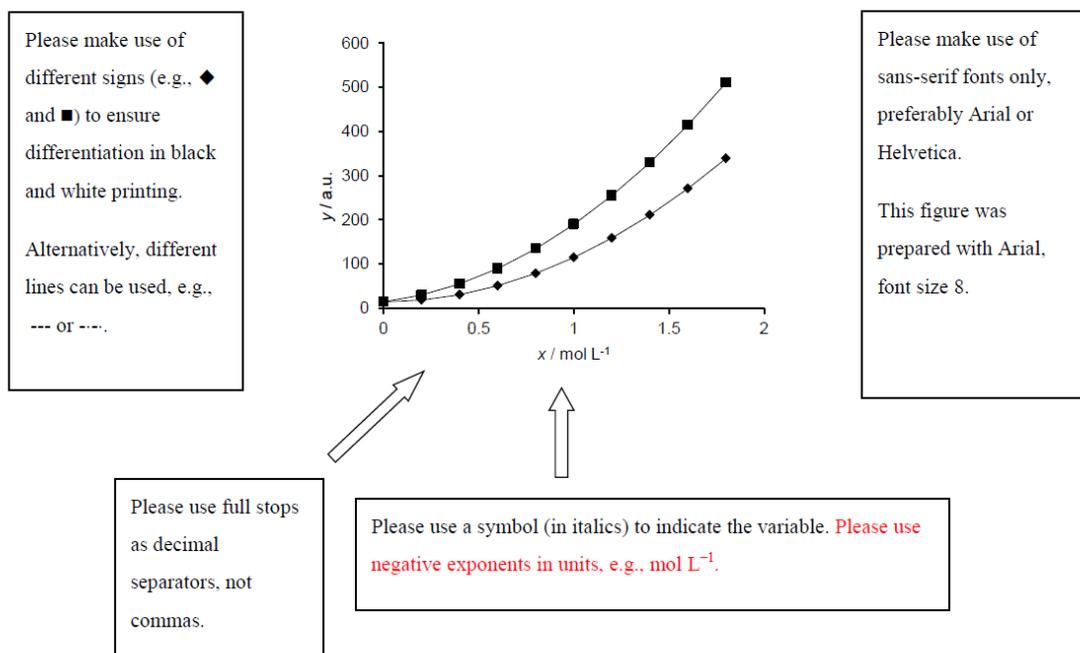
Analytical spectra (NMR, IR, GC, GC-MS, UV-VIS, Fluorescence, ESR, etc.) have to be submitted as Supporting Information (Sect. 6) and only the relevant areas of the spectra should be inserted in the main text.

Figures will be printed in grayscale. Color artwork can be reproduced. The extra costs associated with this are expected to be met, in part, by the author. The current price list can be downloaded from our homepage. The manuscript will neither be edited nor published without [cost confirmation](#) for color figures.

Colored figures which are to be printed in grayscale have to be converted by the author before manuscript submission and peer review. Please ensure the visibility and differentiation of details. Please notice that the online article is generated from the printed version, therefore only those figures that appear in color in print will be reproduced in color online.

The quality of the figures must be such that they can be reproduced directly after reduction. Numbers, letters, and symbols inscribed must be large enough to be still 2 mm high after the figure has been reduced to the printing format. Thus make sure that the size of the writing is big enough. Ideally, please use font size 8 for an image with 85 mm width.

VASCONCELOS, R. S. **Modelagem e Simulação das Correlações de *Scale-Up* Para o Processo de Flotação Por Ar Dissolvido (FAD) Utilizando Análise Dimensional.**



Every figure must be referred to in the text. All figures are to be numbered with Arabic numerals in the sequence in which they appear.

Subfigures have to be numbered with “a)”, “b)” etc. Subfigures **must not** be referred as, e.g., “Fig. 2, bottom right”.

In case you are not willing to pay for color reproduction in the printed and online version of your article, please do not refer to any color in your figures within the text, figure legends etc.

The figure legend (beginning with, e.g., “Figure 5...”) must explain in detail the contents of the figure and – as the figure itself – must be comprehensible without reference to the text.

Legends are not to be typed under the figures, but should be collected at the end of the article.

VASCONCELOS, R. S. **Modelagem e Simulação das Correlações de *Scale-Up* Para o Processo de Flotação Por Ar Dissolvido (FAD) Utilizando Análise Dimensional.**

The responsibility for providing permissions to reprint Figures and Tables and any associated costs rests entirely with the autho.

## **6 SUPPORTING INFORMATION**

Experimental procedures, spectroscopic data, graphics, etc. that are essential for understanding the main points of the publication but could be considered supplementary or cannot be included in the actual publication for space reasons or because of technical limitations, e.g., animated multimedia applications and movies, should be provided online as Supporting Information. This material is available free of charge to authors and readers, and appears simultaneously with the publication of the article. In the relevant sections of the article, reference should be made to the Supporting Information. The scientific quality of the Supporting Information and the preparation of the text and graphics should be of the same standard as that in the actual publication. The Supporting Information should start with a Table of Contents, and the relationships between the sections of the main article and the Supporting Information should be apparent. To submit multimedia files, please contact the editorial office. The Supporting Information has to be submitted as a MS Word file including all figures.

## **7 GALLEY PROOFS**

Galley proofs and a reprint order will be sent electronically to the correspondence author mentioned in the article. Please correct your proof using the electronic annotation tools as instructed in the "Using E-annotation Tools" guidelines that can be found attached to the email which delivers the proofs. The corrections have to be submitted within five days after receiving the galley proof. Please also inform the editorial office if no corrections are needed.

VASCONCELOS, R. S. **Modelagem e Simulação das Correlações de *Scale-Up* Para o Processo de Flotação Por Ar Dissolvido (FAD) Utilizando Análise Dimensional.**

## 8 AUTHOR COPIES

Copies of the printed issue can be ordered with a discount. Reprints and PDF-files are only available upon order. Conditions can be seen from the order form which is sent together with the galley proofs.

## 9 OPEN ACCESS/ONLINE OPEN

If authors have to or want to make their publications freely available at the moment they are published (open access), *Chemical Engineering & Technology* offers such a service. Under the keyword [Online Open](#) you can find all the information about this subject on our homepage. An open access form is attached to the letter of acceptance.

## 10 COPYRIGHT TRANSFER AGREEMENT

Please download and confirm the Copyright Transfer Agreement (CTA). Please send us the CTA as soon as you receive the letter of acceptance. Manuscripts will neither be edited nor typeset without a valid CTA.

## Part II

### 11 Submission of Manuscripts

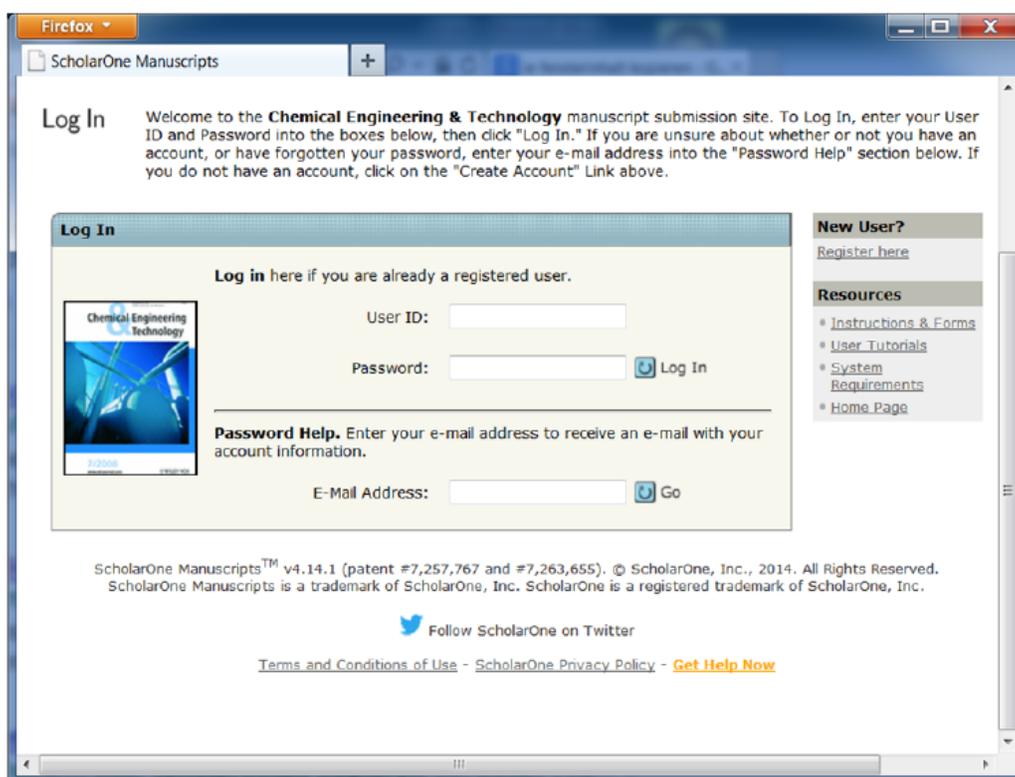
Go to <http://mc.manuscriptcentral.com/cet> or access via our home page <http://www.cet-journal.com> (Left hand side: For Contributors ⇒ Submit an Article). This homepage must also be used to upload the revised and final versions of all manuscripts submitted to *Chemical Engineering & Technology*.

**Please read our Checklist before starting the submission process to avoid any unnecessary delays.**

If you use the system for the first time, you need to click on the “Register here” link. If you have been an author or referee for *Chemical Engineering & Technology*

VASCONCELOS, R. S. **Modelagem e Simulação das Correlações de *Scale-Up* Para o Processo de Flotação Por Ar Dissolvido (FAD) Utilizando Análise Dimensional.**

recently, you do have an account and your e-mail address will already be in the database. In case you forgot your password, enter your e-mail address under “Password Help” on the Log In screen. You will receive an automatically generated e-mail, providing you with the details to access your personal homepage (login and password).



**Figure 1.** Starting page for the submission

Once logged in, please click on “Author Center” and let the system guide you through the submission process. **Please follow the instructions given on top of the pages during the submission process.** Online help is available at all times. It will be possible to exit and reenter the system without losing any information at any stage of the submission process. All submissions are kept strictly confidential.

VASCONCELOS, R. S. **Modelagem e Simulação das Correlações de *Scale-Up* Para o Processo de Flotação Por Ar Dissolvido (FAD) Utilizando Análise Dimensional.**

### **Step 1**

Please choose the type of contribution you want to submit, see Part I/Sect. 2.

Please enter the title in base type – never capital letters exclusively – (see Part I/Sect. 4.1) and add the original abstract of your manuscript (see. Part I/Sect. 4.3).

Please choose whether you are an author or a submitting agent. Submitting agents are not mentioned in the list of authors at all.

If applicable, click yes if asked whether you submit to a topical issue. The title of the topical issue is specified during step 5 of the submitting process.

### **Step 2**

Please enter at least three meaningful keywords, max five (see Part I/Sect. 4.4). You can either select keywords from the list provided (preferred) or choose some of your own. Submit keywords a reader would be looking for.

### **Step 3**

Please enter all authors who contributed to this manuscript. Please ensure the correct spelling/assignment of the first and family names and avoid capital letters to denote the family names. As requested, please denote the formal corresponding author as mentioned in the manuscript. Please mention the main research affiliation and not affiliations/e-mail addresses of short-term assignments. However, short-term assignments may be mentioned in the manuscript.

### **Step 4**

Nominate at least three reasonable potential reviewers from three different nations and different institutions - and none of them should be from your own institution, university or country. Give complete name, e-mail address and institution plus

VASCONCELOS, R. S. **Modelagem e Simulação das Correlações de *Scale-Up* Para o Processo de Flotação Por Ar Dissolvido (FAD) Utilizando Análise Dimensional.**

country. Please ensure that the e-mail-address is still valid. Authors are not allowed to contact potential reviewers and to ask for their approval.

## **Step 5**

Cover Letter: Please explain the topic of your contribution, why it is important, what is new about it, and why you think it deserves publication. Highlight the breakthrough you report in your article and give the take-home message of your contribution in the cover letter. Explain the significance in a way that is accessible to non-specialists. **Please, do not repeat the abstract!**

Manuscript Details: Please give us a short overview of the size of your manuscript. The total number of figures includes also the colored figures. Please note that we ask our authors to contribute towards the extra cost incurred for the reproduction of color. Therefore, only mention the sum of figures for which you are willing to pay for. As mentioned in Part I/Sect. 5, all figures which are to be printed in grayscale have to be converted to grayscale before the submission – even for the review process. Colored figures which are to be printed exclusively in the graphical abstract are free of charge.

Policy Responses: Please confirm that you have read and understood our policies concerning color charges and the Copyright Transfer Agreement, which has to be signed and submitted as soon as your manuscript has been accepted. All forms can be downloaded [here](#).

Submission Information: Please confirm that the manuscript has been submitted solely to this journal and is not published, in press, or submitted elsewhere. *Chem Eng. Technol.* follows the ethical guidelines for publication issued by the Committee on Publication Ethics and any violation of this confirmation will be punished.

VASCONCELOS, R. S. **Modelagem e Simulação das Correlações de *Scale-Up* Para o Processo de Flotação Por Ar Dissolvido (FAD) Utilizando Análise Dimensional.**

Conflict of Interest: Any conflict of interest has to be announced. A note whether or not a conflict has been declared will be published in the article.

Color Charges: Please confirm whether or not you are willing to pay for colored figures. As soon as the manuscript has been accepted, the color confirmation has to be signed and sent to the editorial office.

Special Issue Information: In case you have stated (step 1) that this article is to be published within a special issue, please choose the topical issue by copy-paste the corresponding topic from the list mentioned on the top of the page.

### **Step 6**

Please remove the figures from the text and upload your manuscript and your figures separately (Part I/Sect. 5).

We need separate files for the text only and each figure.

Please submit the Supporting Information as MS Word file (Part I/Sect. 6).

Due to the file size, the upload may take some time. Please do not close the window while the upload is running.

### **Step 7**

Please review your submission and confirm the submission. You will receive a confirmation letter after successful submission informing you about your manuscript number.

VASCONCELOS, R. S. **Modelagem e Simulação das Correlações de *Scale-Up* Para o Processo de Flotação Por Ar Dissolvido (FAD) Utilizando Análise Dimensional.**

**End of submission!**

In case of any questions which cannot be answered by these guidelines, please contact the editorial office:

*Chemical Engineering & Technology*  
Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA  
Boschstraße 12  
69469 Weinheim  
Germany  
Tel. +(49) 6201 606-520  
Fax +(49) 6201 606-203  
Email: [cet@wiley.com](mailto:cet@wiley.com)

VASCONCELOS, R. S. **Modelagem e Simulação das Correlações de Scale-Up Para o Processo de Flotação Por Ar Dissolvido (FAD) Utilizando Análise Dimensional.**

## Depósito de Patente

< Uso exclusivo do INPI >



INSTITUTO NACIONAL DA PROPRIEDADE INDUSTRIAL  
 AUGUSTOL 018140013677  
 22/07/2014 12:29 DESP  
 BR 10 2014 017962 3

Espaço reservado para o protocolo      Espaço reservado para o código QR

---



**INPI** INSTITUTO NACIONAL DA PROPRIEDADE INDUSTRIAL  
**Sistema de Gestão da Qualidade**  
 Diretoria de Patentes

|  |   |                                     |                       |
|--|---|-------------------------------------|-----------------------|
| <b>DIRPA</b>   | Tipo de Documento:<br><b>Formulário</b> | <b>DIRPA</b>                        | Página:<br><b>1/3</b> |
| Título do Documento:<br><b>Depósito de Pedido de Patente</b> |   | Código:<br><b>FQ001</b>             | Versão:<br><b>2</b>   |
|  |   | Procedimento:<br><b>DIRPA-PQ006</b> |                       |

**Ao Instituto Nacional da Propriedade Industrial:**

O requerente solicita a concessão de um privilégio na natureza e nas condições abaixo indicadas:

**1. Depositante (71):**

- 1.1 Nome: Centro de Gestão de Tecnologia e Inovação - CGTI  
 1.2 Qualificação: Pesquisa e desenvolvimento experimental  
 1.3 CNPJ/CPF: 06062204/0002-14  
 1.4 Endereço Completo: Rua Padre Roma, 120 Sala 1501 - 1502 Tamarineira Recife PE  
 1.5 CEP: 52050-150  
 1.6 Telefone: (81) 3031-8283      1.7 Fax: (81) 3031-8283  
 1.8 E-mail: guilherme@buenomak.com.br

continua em folha anexa

- 2. Natureza:**  Invenção       Modelo de Utilidade       Certificado de Adição

**3. Título da Invenção ou Modelo de Utilidade (54):**

Processo de produção de microbolhas de ar para tratamento de efluente por flotação.

continua em folha anexa

- 4. Pedido de Divisão: do pedido N°**      **Data de Depósito:**

- 5. Prioridade:**       Interna (66)       Unionista (30)

O depositante reivindica a(s) seguinte(s):

| País ou Organização do depósito | Número do depósito (se disponível) | Data de depósito |
|---------------------------------|------------------------------------|------------------|
|                                 |                                    |                  |
|                                 |                                    |                  |
|                                 |                                    |                  |

continua em folha anexa