

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
INSTITUTO DE PESQUISAS HIDRÁULICAS

MODELAGEM FÍSICA DE UM DIGESTOR ANAERÓBIO DE  
FLUXO ASCENDENTE (DAFA) E ESTUDO DA ESTABILIDADE  
HIDRODINÂMICA DO SEU CAMPO LONGÍNQUO

Eng<sup>o</sup> Civil  
Sandro Concli Nassr

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento  
Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul como requisito parcial para a  
obtenção do título de Mestre em Engenharia

Porto Alegre, dezembro de 2000

Muitas pessoas contribuíram para concretização deste trabalho. Agradeço a todas estas pessoas e em especial:

Ao meu orientador pelo apoio, compreensão e paciência

Ao professor Rogério Dornelles Maestri e à professora Ana Luiza de Oliveira Borges, pelo conhecimento e incentivo desde o início.

Ao colega e amigo Juliano Rodrigues Gimenez, pelo companheirismo, dedicação e amizade.

A todos os demais professores do setor de Hidráulica: Nara, Beatriz, Luiz Emílio, Alejandro, Marcelo e Endres.

Aos demais colegas e amigos do Pavilhão Fluvial: Jaime, Paulo, Alexandre, Humberto, Sérgio, Plindes e Dagoberto.

Ao curso de Pós-Graduação, ao Instituto de Pesquisas Hidráulicas e à Universidade Federal do Rio Grande do Sul, pela oportunidade.

*Aos meus pais e em especial  
a minha amada esposa,  
Cristiane*

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
INSTITUTO DE PESQUISAS HIDRÁULICAS

MODELAGEM FÍSICA DE UM DIGESTOR ANAERÓBIO DE  
FLUXO ASCENDENTE (DAFA) E ESTUDO DA ESTABILIDADE  
HIDRODINÂMICA DO SEU CAMPO LONGÍNQUO

Sandro Concli Nassr

*Autor*

Paulo Kroeff de Souza

*Orientador*

Rogério Dornelles Maestri

*Colaborador*

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento  
Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul como requisito parcial para a  
obtenção do título de Mestre em Engenharia

Porto Alegre, dezembro de 2000

## RESUMO

A utilização de Digestores Anaeróbios de Fluxo Ascendente (DAFAs) para tratamento de efluentes domésticos em regiões carentes e em desenvolvimento, como muitas do Brasil, é muito atraente, principalmente, no que tange aos baixos custos de implantação e operação. Existem muitos estudos, principalmente sobre seus processos químicos e biológicos os quais geram parâmetros de projeto que atendem a estas observações. Neste trabalho, são analisados aspectos hidrodinâmicos do escoamento que ocorre em estruturas deste tipo, e a partir da dificuldade analítica para a sua análise opta-se pela modelação física para se realizar as primeiras observações. Foi construído um modelo físico de um DAFA existente e em operação, analisaram-se em campo (no protótipo) as propriedades físicas de seu fluido (lodo) e seu comportamento frente a oscilações de vazão. A partir destes dados procedeu-se a modelagem física propriamente dita e realizaram-se observações sobre seu escoamento, como por exemplo a influência da estratificação de massa específica gerada pelo acúmulo de lodo (banco de lodos) sobre a estabilidade do escoamento.

## ABSTRACT

"The use of Upflow Anaerobic Sludge Blanket Reactor (UASB) for waste water treatment in developing areas, such as many places in Brazil, is very attractive, mainly due to the low acquisition and operational costs. Many studies exist, mainly on chemical and biological processes, which provide design parameters that cover these aspects. Hydrodynamic aspects of the flow in these structures are analyzed in this work, and in view of the analytical difficulty of their study, physical modeling was the option chosen for these initial observations. A physical model of an existing operational UASB was built and the physical properties and behavior of its fluid (sludge) were analyzed in the field (in the prototype) under flow oscillations. From these data, the physical modelling was undertaken and observations on the flow characteristics were made, such as the influence on the flow stability, of the density stratification generated by the sludge accumulation (sludge bank)."

## SUMÁRIO DE CAPÍTULOS

RESUMO .....	IV
ABSTRACT .....	V
SUMÁRIO DE CAPÍTULOS .....	VI
SUMÁRIO DE TABELAS.....	VIII
LISTA DE SÍMBOLOS .....	IX
LISTA DE FIGURAS .....	XI
<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
1.1 JUSTIFICATIVA .....	1
1.2 OBJETIVOS.....	1
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>3</b>
2.1 DAFA .....	3
2.2 MODELOS FÍSICOS.....	5
2.3 MÉTODOS EXPERIMENTAIS DE VISUALIZAÇÃO .....	7
<b>3. MÉTODOS DE ABORDAGEM DO PROBLEMA .....</b>	<b>9</b>
3.1 DESCRIÇÃO DO PROBLEMA.....	9
3.2 EQUAÇÕES QUE REGEM O MOVIMENTO .....	11
3.2.1 <i>As aproximações de Boussinesq</i> .....	11
3.2.2 <i>Equação da continuidade</i> .....	12
3.2.3 <i>Equação de Navier-Stokes</i> .....	12
3.3 EFEITOS DA ESTRATIFICAÇÃO NO FUNCIONAMENTO DO DAFA.....	13
3.4 DIFICULDADE DO ESTUDO ANALÍTICO .....	14
3.5 MODELAGEM FÍSICA .....	15
3.6 SIMPLIFICAÇÕES E LIMITAÇÕES DA SIMULAÇÃO.....	16
3.7 ANÁLISE DIMENSIONAL.....	17
<b>4. METODOLOGIAS DE EXPLORAÇÃO DO PROTÓTIPO E DO MODELO .....</b>	<b>20</b>
4.1 INTRODUÇÃO .....	20
4.2 DESCRIÇÃO DO PROTÓTIPO .....	21
4.3 PARÂMETROS MEDIDOS NO PROTÓTIPO .....	23
4.3.1 <i>Sistemática de coleta</i> .....	23
4.3.2 <i>Massa específica</i> .....	24
4.3.3 <i>Viscosidade</i> .....	25

4.3.4	<i>Tensão superficial</i> .....	26
4.3.5	<i>Sólidos</i> .....	27
4.3.6	<i>Temperatura</i> .....	27
4.3.7	<i>Vazão</i> .....	28
4.4	OBJETIVOS NA EXPLORAÇÃO DO MODELO.....	28
4.5	DESCRIÇÃO DO MODELO.....	28
4.6	ESCALAS DO MODELO.....	29
4.7	SIMULAÇÃO DA ESTRATIFICAÇÃO NO MODELO.....	32
4.7.1	<i>Simulação com gradientes de temperatura</i> .....	32
4.7.2	<i>Simulação com solução salina</i> .....	33
4.8	PARÂMETROS MEDIDOS NO MODELO.....	35
4.8.1	<i>Massa específica ou condutividade</i> .....	35
4.8.2	<i>Vazão</i> .....	38
4.8.3	<i>Campos de velocidade</i> .....	38
4.9	ANÁLISE DE ERROS.....	39
<b>5.</b>	<b>ENSAIOS</b> .....	<b>41</b>
5.1	DESCRIÇÃO DOS ENSAIOS.....	41
5.2	AQUISIÇÃO E TRATAMENTO DOS DADOS.....	44
<b>6.</b>	<b>RESULTADOS</b> .....	<b>48</b>
6.1	RESULTADOS DAS MEDIÇÕES NO PROTÓTIPO.....	48
6.1.1	<i>Massa específica (densidade)</i> .....	49
6.1.2	<i>Viscosidade</i> .....	50
6.1.3	<i>Tensão superficial</i> .....	50
6.1.4	<i>Sólidos</i> .....	51
6.1.5	<i>Temperatura</i> .....	52
6.2	RESULTADOS DOS ENSAIOS NO MODELO REDUZIDO.....	53
6.2.1	<i>Perfis de massa específica gerados nos ensaios</i> .....	53
6.2.2	<i>Sequências dos ensaios</i> .....	54
<b>7.</b>	<b>CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES</b> .....	<b>64</b>
<b>8.</b>	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	<b>67</b>

## SUMÁRIO DE TABELAS

TABELA 4.1 – RELAÇÕES DE ESCALAS DO MODELO	30
TABELA 4.2 – FAIXA DE OPERAÇÃO Nº1	35
TABELA 4.3 – FAIXA DE OPERAÇÃO Nº2	35
TABELA 5.1 – RESUMO DOS ENSAIOS	43

## LISTA DE SÍMBOLOS

$V_a$  = Velocidade Ascensional [ $LT^{-1}$ ]

$\nu$  = viscosidade cinemática [ $L^2T^{-1}$ ]

$\alpha_c = \Delta\rho / \rho$   $C$  = Coeficiente de transformação de concentração em massa específica

$g$  = Gravidade [ $LT^{-2}$ ]

$\nabla^2$  = Laplaciano

$\rho$  = Massa específica [ $ML^{-3}$ ]

$\vec{F}_c$  = representa as forças de campo

$Q$  = Vazão [ $LT^{-3}$ ]

$h$  = Altura [L]

$\alpha$  = coeficiente de expansão térmica.

$C$  = concentração [ $ML^{-3}$ ]

$\frac{\partial}{\partial t}$  = Derivadas parciais de determinada propriedade em relação ao tempo

$\lambda_{\Delta\rho}$  = escala de variação de massa específica

$\lambda_Q$  = escala de vazões

$\lambda_v$  = escala de velocidades

$\lambda_l$  = escala geométrica

$N^2$  = Frequência de Brunt-Väisälä

$\nabla \equiv$  Operador gradiente de determinada propriedade em relação a outra

$L_1$  = Largura [L]

$L_2$  = Comprimento [L]

$\rho_0(\vec{x})$  = Massa específica de referência em um determinado ponto [ $ML^{-3}$ ]

$\rho(\vec{x}, t)$  = Massa específica em um ponto em determinado instante [ $ML^{-3}$ ]

$Fr$  = Número de Froude

$Gr$  = Número de Grashof

$P_e$  = Número de Peclet

$Pr$  = Número de Prandtl

$R_a$  = Número de Rayleigh

$R_e$  = Número de Reynolds

$R_i$  = Número de Richardson

$W$  = Número de Weber

$p_o(\vec{x})$  = Pressão de referência em determinado ponto  $[ML^{-3}]$

$p(\vec{x}, t)$  = Pressão em um ponto em determinado instante  $[ML^{-3}]$

$Q_a$  = vazão média do afluente  $[LT^{-3}]$

$T_o(\vec{x})$  = Temperatura de referência em determinado ponto  $[\Theta]$

$T(\vec{x}, t)$  = Temperatura em um ponto em determinado instante  $[\Theta]$

$t$  = Tempo  $[T]$

$\sigma$  = Tensão Superficial  $[ML^{-1}T^{-2}]$

$T_P$  = tempo de permanência do líquido  $[T]$

$T_{rh}$  = Tempo de retenção hidráulica  $[T]$

$\vec{V}$  = Componentes de velocidade  $[LT^{-1}]$

$\Delta$  = Variação

$\rho'(\vec{x}, t)$  = Variação de massa específica em um ponto em determinado instante

$p'(\vec{x}, t)$  = Variação de pressão em um ponto em determinado instante

$T'(\vec{x}, t)$  = Variação de temperatura em um ponto em determinado instante

$V_r$  = volume do Reator  $[L^3]$

## LISTA DE FIGURAS

- Figura 4.1 – Representação esquemática do protótipo
- Figura 4.2 - Foto da estação de tratamento ( protótipo)
- Figura 4.3 - Amostrador de lodos
- Figura 4.4 – Recipientes utilizados para a coleta do lodo
- Figura 4.5 – Densímetro e proveta utilizados na medição indireta
- Figura 4.6 – Picnômetros e balança utilizados na medição direta
- Figura 4.7 – Viscosímetro e demais periféricos utilizados na medição da viscosidade do lodo
- Figura 4.8 – Tensiômetro utilizado na medição da tensão superficial do lodo
- Figura 4.9 – Modelo reduzido construído em acrílico
- Figura 4.10 – “Banco salino” originado nas simulações pela introdução de solução salina
- Figura 4.11 – Sondas de condutividade e instrumentação de controle
- Figura 4.12 - Esquema do circuito utilizado nas sondas condutivímetras
- Figura 5.1 – Sistema de distribuição nº 1
- Figura 5.2 – Sistema de distribuição nº 2
- Figura 6.1 – Gráfico resumo dos perfis de densidades e/ou massa específica
- Figura 6.2 – Variabilidade da viscosidade com a tensão aplicada
- Figura 6.3 – Perfis de concentração de sólidos
- Figura 6.4 – Temperaturas: entrada ( ); meio (---); saída (---)
- Figura 6.5 – Perfis de massa específica gerados nos ensaios E3 e E5
- Figura 6.6 – Perfis de massa específica gerados nos ensaios E6 e E8
- Figura 6.7 – Perfis de massa específica gerados nos ensaios E12 e E14
- Figura 6.8 – Sequência frontal do ensaio E16
- Figura 6.9 – Sequência frontal do ensaio E19
- Figura 6.10 – Sequência frontal e lateral do ensaio E6
- Figura 6.11 – Sequência frontal e lateral do ensaio E8
- Figura 6.12 – Sequência frontal e lateral do ensaio E12

Figura 6.13 – Sequência frontal e lateral do ensaio E14

Figura 6.14 – Sequência frontal do ensaio E3

Figura 6.15 – Sequência lateral do ensaio E3

Figura 6.16 – Sequência frontal do ensaio E5

Figura 6.17 – Sequência lateral do ensaio E5

## **1. INTRODUÇÃO**

### **1.1 Justificativa**

Atualmente áreas diversificadas de pesquisas têm sido unidas para solucionar novos problemas. Este trabalho é um exemplo disto, pois une conhecimentos de Saneamento e de Mecânica dos Flúidos para melhoria de uma tecnologia de tratamento de efluentes.

Inserido no Programa Nacional de Saneamento Básico (PROSAB I), Tema2 (Tratamento Anaeróbico de Esgotos), este trabalho faz parte do estudo conjunto dos setores de Saneamento e de Hidráulica Aplicada do Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (IPH/UFRGS). Tem por objetivo a modelagem física de um Digestor Anaeróbico de Fluxo Ascendente (DAFA) (ver Maestri, 1998), a partir da construção de um modelo físico reduzido de um protótipo existente na cidade de Cachoeirinha (região metropolitana de Porto Alegre), operado pela Companhia Riograndense de Saneamento (CORSAN).

Este estudo justifica-se pelo interesse em aumentar a eficiência de um sistema de tratamento de efluentes a baixos custos, o que se enquadra na política do programa. Tecnicamente, justifica-se tanto pelo desconhecimento da dinâmica física que rege o escoamento deste tipo de reator quanto pela dificuldade de analisá-lo matematicamente. Também não é possível, com a instrumentação disponível, fazer alguns tipos de observação “in loco” do reator em escala real e operando. O exame da bibliografia atual sobre o assunto mostra que, a não ser por tentativas recentes de modelagem física, os estudos, não só deste tipo de reator como em geral para reatores de tratamento de efluentes, se restringem ao estudo do processo biológico em colunas unidimensionais a nível de laboratório e que não contemplam a tridimensionalidade do escoamento real.

### **1.2 Objetivos**

O presente estudo tem por objetivos gerais estabelecer limites de operação e condições de semelhança para um modelo reduzido de um Digestor Anaeróbico de Fluxo Ascendente (ver Gimenez et al, 1998 ), e a partir do estabelecimento de uma metodologia de ensaio que possibilite estratificar o escoamento de forma análoga ao do protótipo existente,

visualizá-lo de forma adequada. Procura-se identificar, mesmo que de forma simplificada, os padrões deste escoamento para permitir que no futuro, com a instrumentação adequada, se façam análises mais detalhadas visando determinar parâmetros de dimensionamento para este tipo de estrutura, que contemplem as equações do movimento. Assim serão superadas as atuais observações empíricas, que respondem de forma limitada às dúvidas e problemas encontrados pelos projetistas.

Como objetivos específicos, pretende-se determinar algumas propriedades físicas do fluido (lodo), como por exemplo massa específica, viscosidade e tensão superficial, as quais servem, tanto para o entendimento inicial do fenômeno, quanto para a calibração do modelo físico. O conhecimento destas propriedades serve, também, para a calibração de modelos matemáticos desenvolvidos para a simulação deste tipo de escoamento, que permitam variar as condições de contorno.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 DAFA

O uso dos DAFA nos últimos anos tem sido limitado a pequenos volumes, pois em algumas experiências no emprego dessas estruturas em esgoto doméstico (esgotos de baixa concentração) tem se notado uma queda significativa da eficiência com o aumento das dimensões. Supõe-se que essa queda é devida à falta de critérios mais exatos e rigorosos de dimensionamento.

O uso de modelos empíricos para o dimensionamento de DAFA tem sido popularizado por Lettinga e seus colaboradores (Lettinga et. al. 1991), fazendo-se sempre a distinção entre efluentes de baixas e altas concentrações, os quais implicam em critérios diferentes para o dimensionamento. Para o primeiro, o parâmetro comumente utilizado é o tempo de retenção hidráulica (Trh) e para o segundo tipo de efluente utiliza-se a carga orgânica volumétrica recomendada pela bibliografia especializada e a concentração de matéria orgânica do efluente a ser tratado, obtida a partir de análises laboratoriais deste.

A preocupação com o estabelecimento de critérios de dimensionamento de reatores tipo DAFA está plenamente demonstrada nos trabalhos de Souza (1986), Vieira e Garcia (1992), bem como em Van Haandel & Lettinga (1994) Os autores, a partir de unidades em escala piloto, traçam diretrizes para o projeto de reatores do tipo DAFA preocupando-se basicamente com parâmetros geométricos de dimensionamento como: profundidade, tempo de permanência médio do líquido e número de entradas por metro quadrado de área superficial. Como conseqüência desses parâmetros, de forma simples, define-se o volume total do reator (Van Haandel & Lettinga, 1994).

$$V_r = Q_a \text{Trh} \quad (2.1)$$

Onde:

$V_r$  = volume do Reator ( $\text{m}^3$ );

$Q_a$  = vazão média do afluente ( $\text{m}^3/\text{h}$ );

$\text{Trh}$  = Tempo de retenção hidráulica (h).

A equação (2.1), que define o volume do reator, embora de aparência simples, traz em si a dificuldade básica no dimensionamento de digestores, isto é, a definição do tempo de permanência do líquido. Este parâmetro tem sido motivo da maior parte dos estudos que a

bibliografia atual apresenta. Como o tempo de permanência depende de muitas variáveis, até hoje não bem definidas, tem-se despendido muito tempo no seu estudo.

O volume resultante da equação (2.1), como chamam atenção Van Haandel & Lettinga (1994), é um volume efetivo, embora outros autores ignorem esta diferença, considerando o volume efetivo igual ao total. Um exemplo recente da influência da diferenciação entre o volume efetivo e o volume total no dimensionamento de um DAFA é exposto por Schellinkout & Collazos (1992) que, a partir de uma planta piloto de 107m<sup>3</sup>, dimensionam reatores de 3300m<sup>3</sup>, utilizando o mesmo esgoto e os mesmos tempos de permanência do líquido. Neste trabalho os autores obtêm uma eficiência de 80% na remoção de matéria orgânica para um tempo de permanência de 5 horas no reator de escala piloto, e uma eficiência de 17% a 48% para um tempo de permanência de 5,2 horas a 16 horas nos reatores de grandes dimensões. No caso relatado os autores identificam claramente perturbações no escoamento que interferem na eficiência da cinética do processo. Utilizando uma terminologia típica do estudo de modelos reduzidos está-se na presença de um “efeito de escala”.

Algumas tentativas de descrição do fluxo hidráulico de reatores tipo DAFA têm sido propostas nos últimos anos, como por exemplo a que divide o reator em três regiões distintas, a cama de lodos, o manto de lodos e o sedimentador. Para o fluxo da cama de lodos é proposto que seja tipo fluxo pistão com curto circuitos, o fluxo do manto de lodos é considerado como de mistura completa e o do sedimentador como fluxo pistão. São propostos, também, dois reatores de mistura completa e em série, representados pela cama de lodos e pelo manto de lodos, com curto circuitos entre os dois reatores.

Kalyuzhnyi & Fedorovich (1997), a partir da existência de muitos modelos matemáticos (que consideram os reatores como sendo de mistura completa e não levam em conta o gradiente de concentração e todas as influências que este exerce sobre o escoamento e até mesmo sobre a cinética do processo), apresentam um modelo matemático integral do funcionamento de um reator DAFA levando em consideração a não-uniformidade das propriedades e dividido em quatro blocos, sendo um deles o bloco hidrodinâmico.

Analisando este bloco nota-se a existência de um balanço entre a distribuição longitudinal de massa e o somatório de forças que o influenciam, compostas pela amplitude da variação longitudinal, pela transferência convectiva de massa (velocidade ascensional do líquido) e outros dois termos: um que representa a taxa entre o consumo e a produção biológica e outro representando a taxa de transferência da fase líquida para a fase gasosa do efluente.

Verifica-se que o fator convectivo leva em conta apenas a velocidade ascensional do líquido sem se ater aos fenômenos hidrodinâmicos que regem este escoamento ascensional, como por exemplo o problema de convecção gerado pela injeção de um fluido com baixa concentração de sólidos em um outro super-concentrado.

Vieira & Garcia (1992), baseados no monitoramento de uma unidade piloto da CETESB em São Paulo com volume de 102 m<sup>3</sup>, fazem recomendações sobre critérios de dimensionamento, entre elas altura do reator, a velocidade ascensional e a forma do reator. Apesar de todas estas recomendações estarem de acordo com critérios consagrados da literatura sobre reatores DAFA, não apresentam nenhum equacionamento hidrodinâmico ou uma justificativa mais aprofundada do que a simples observação da eficiência do reator.

Todos os autores acreditam que o perfil de massa específica cresce com a profundidade, independentemente da concentração do lodo, da recirculação adotada e da quantidade de gases gerados no processo. Porém, este perfil pode apresentar alguma anomalia e condições para a instabilidade hidrodinâmica podem aparecer, provocando interações entre camadas distintas, indesejáveis ao processo físico-químico do tratamento anaeróbio.

O estudo da instabilidade hidrodinâmica em escoamentos atmosféricos e outros, embora seja clássico na Mecânica dos Fluidos (Guyon, Hulin & Petit 1991), ainda não foi empregado nos escoamentos de reatores tipo DAFA. Este trabalho tem, como objetivo, transferir estes conceitos para este tipo de escoamento, a fim de fornecer parâmetros físicos de dimensionamento de reatores tipo DAFA.

## **2.2 Modelos Físicos**

A solução analítica dos padrões de escoamento em um DAFA através das equações hidrodinâmicas não é possível no momento, devido à complexidade das condições de contorno e do número de variáveis que envolve. Logo, opta-se por estudá-lo através de um modelo físico reduzido.

Esta opção é justificável também pela dificuldade de observações experimentais no protótipo. Devido à opacidade do fluido é inviável a visualização do fluxo no interior do protótipo, e é grande a dificuldade de se fazerem modificações em sua geometria.

Entretanto, ao adotar a modelagem física será preciso considerar os problemas de semelhança e de escala, isto é, garantir a coerência das relações no modelo e no protótipo.

Escala é a razão entre cada valor que uma dada grandeza assume no modelo e o valor correspondente que a mesma assume no protótipo (Motta, 1972). Estas grandezas precisam guardar entre si certas relações, que constituem o que se chama de condições de semelhança.

Atribui-se ao conceito de similaridade e/ou semelhança física um aspecto qualitativo e um quantitativo. O aspecto qualitativo da semelhança consiste no mesmo fenômeno, regido pela mesma lei que relaciona entre si as mesmas grandezas, se passar no modelo e no protótipo (Motta, 1972). Podemos exprimir esta lei em termos dimensionais por dedução analítica através da aplicação do teorema de Bridgman, ou em termos adimensionais, pela aplicação do teorema de Buckingham (Teorema dos  $\pi$ ). Entretanto, se o(s) número(s) adimensionais que regem o fenômeno em questão, como o número de Reynolds ( $R_e$ ), Rayleigh ( $Ra$ ), Froude ( $Fr$ ) e outros forem devidamente conhecidos, podemos aplicá-lo(s) diretamente ao modelo, desde que sejam respeitados os limites de validade da lei que rege o fenômeno.

O aspecto quantitativo está na existência de relações constantes, bem conhecidas e independentes ou fracamente dependentes dos valores particulares das grandezas, entre os valores que ocorrem no modelo e os que ocorrem no protótipo.

Segundo Motta, os modelos físicos são classificados em: verdadeiros, adequados, distorcidos ou analógicos. O modelo em questão se enquadra na classificação de modelos adequados, pois não possui semelhança para todos os tipos de forças presentes no protótipo, mas mediante a separação e individualização dos problemas a serem estudados, é capaz de fornecer previsões válidas para fins de engenharia, pois os tipos de forças para as quais não se tem semelhança no modelo, desempenham um papel secundário no protótipo.

Porém, mesmo havendo um tipo de força preponderante no modelo, a influência de outros tipos de força pode não ser inteiramente desprezível, e, nestes casos, ocorrerão erros nas previsões extraídas do modelo, conhecidos como efeitos de escala.

A maneira de se verificar a existência ou não de efeitos de escala na simulação física de um dado sistema, consiste em se fazerem diferentes modelos, a diferentes escalas geométricas, do mesmo protótipo. Para as mesmas condições nos diferentes modelos e no protótipo, aplicam-se as escalas respectivas aos valores medidos da grandeza suspeita de estar afetada pelo efeito de escala. Se os diversos valores coincidirem dentro da precisão em que se fazem as medidas, poder-se-á afirmar que não houve efeito de escala. Se variarem, poder-se-á traçar um gráfico da variação da grandeza considerada, em função da escala geométrica. O valor desta última, a partir do qual os valores passam a coincidir, define o limite para a

ocorrência do efeito de escala. Esta prática, no presente caso, é inviável economicamente e, também, pelo tempo excessivo que envolve e, portanto não será aplicada.

Para a modelagem de escoamento estratificado e/ou com diferenças de densidade, Tritton(1988) recomenda a utilização de sal por resultar um efeito de estratificação mais acentuado do que o da temperatura. Estas duas formas de estratificação foram testadas no presente trabalho.

### **2.3 Métodos Experimentais de Visualização**

Como ferramenta principal de análise qualitativa e/ou quantitativa dos resultados dos experimentos foram utilizadas técnicas de visualização.

Segundo Tritton (1988), existem três diferentes métodos de visualização em líquidos: a introdução de traçadores fluidos, de traçadores sólidos e técnicas ópticas a partir da variação do índice de refração do fluido, mediante a variação de massa específica do fluido associada a mudanças de temperatura e/ou concentração. Cabe notar que a técnica de PIV (*Particle Image Velocimetry*) é uma forma processada de visualização baseada em traçadores sólidos.

Como traçadores líquidos ou corantes apropriados para serem introduzidos em fluxos de água, podemos citar o permanganato de potássio, a violeta genciana e o azul de metileno. Todos proporcionam um ótimo contraste, porém com grande incremento na densidade do fluido. Outra desvantagem apresentada, são as manchas coloridas de difícil remoção que provocam nas estruturas a serem estudadas.

Entre as várias partículas disponíveis para serem usadas como traçadores sólidos, as esferas de poliestireno são adequadas para a utilização em água, pois sua densidade é levemente superior à desta. Também limalha de alumínio tem sido usada para visualização de fluxos, principalmente em fluidos viscosos como óleo de silicone.

Outra forma de partículas que apresenta bons resultados por tomar diferentes orientações em diferentes regiões do fluxo é a lamelar. Quando há incidência de luz em diferentes direções daquelas em que serão feitas as observações, a alternância de regiões claras e escuras possibilita a visualização das estruturas de fluxo.

Outra forma de traçadores pode ser produzida eletricamente pelas técnicas de bolhas de hidrogênio, precipitação eletrolítica e a técnica do pH. A primeira adapta-se melhor a visualização de fluxos a altas velocidades. A segunda e a terceira fornecem bons resultados para fluxos intermitentes e a última para fluxos a baixas velocidades como os encontrados em

convecção natural e fluxos rotacionais. Todos porém necessitam de instrumentos adequados para sua produção e visualização.

Uma técnica cada vez mais utilizada para visualização de fluxos e medidas quantitativas de velocidade em diversas áreas da mecânica dos fluidos é a do PIV (*Particle Image Velocimetry*). É uma técnica não intrusiva, baseada na medição de deslocamentos sucessivos de traçadores de fluxo. Gera informações sobre velocidades instantâneas de uma extensa área (Gray, 1992).

Outro método de visualização de fluxo é o que usa a variação do índice de refração do fluido, mediante a variação de massa específica deste associada às mudanças de temperatura e/ou concentração. É uma técnica recomendada para estudos de fenômenos de convecção e de fluidos estratificados. Consiste basicamente na observação da deflexão de feixes de luz paralelos introduzidos no fluido onde existe variação do índice de refração deste.

Em experimentos com visualização de fluxo é extremamente necessário se estabelecer que características deste se deseja observar. Os corantes geralmente mostram a trajetória do fluxo. Os métodos eletrolíticos podem liberar o traçador em um determinado instante, sobre uma determinada direção e gerar informações sobre um instante subsequente. Similares a este último, os traçadores sólidos podem ser usados de várias maneiras, como por exemplo, sendo fotografados em intervalos de tempo suficientemente pequenos para gerarem informações sobre a estrutura do fluxo.

Todos estes métodos apresentam, conforme a bibliografia, ótimos resultados, porém exigem instrumentação adequada não disponível, tornando difícil sua utilização na presente pesquisa e fazendo necessária a busca de outras técnicas de baixo custo, que permitam, mesmo que de forma simplificada, porém eficiente, a visualização do fluxo em questão.

### **3. MÉTODOS DE ABORDAGEM DO PROBLEMA**

#### **3.1 Descrição do Problema**

O problema de engenharia de que trata o presente trabalho, como já citado anteriormente, já recebe atenção de engenheiros e pesquisadores sanitaristas há algum tempo, mas a obtenção de um modelo matemático que contemple simultaneamente os fatores biológicos e hidrodinâmicos que influenciam o processo ainda está longe de ser obtido.

O conhecimento da cinética do processo biológico encontra-se bem adiantado. São conhecidas as velocidades das reações, as faixas ideais de temperatura e pH, a influência da concentração do afluente sobre a eficiência do processo, e outros tantos fatores que o influenciam. Mas sobre parâmetros hidrodinâmicos que regem o tipo de escoamento que ocorre em um DAFA, pouco se sabe.

Para facilitar o entendimento, adotou-se uma abordagem clássica do estudo de emissários de esgoto em rios e mares, o qual divide o campo de escoamento em duas regiões distintas, a saber: campo próximo e campo longínquo (Fischer et. al., 1979). O campo próximo se restringe à zona de entrada e mistura do efluente com a massa bacteriana e/ou banco de lodos do reator e caracteriza-se pela alta turbulência induzida pela inércia dos jatos e pela convecção que ocorre devido à diferença de densidade e/ou concentração entre o efluente que entra e o banco de lodos do reator. O campo longínquo compreende o campo de escoamento do reator que não for caracterizado como campo próximo. Neste, as velocidades são muito baixas e a estratificação não é mais tão acentuada como na zona de mistura do reator.

Tentar-se-á descrever então, mesmo de forma simplificada, o tipo de escoamento que ocorre na instalação em questão. Tem-se um escoamento ascensional estratificado, isto é, com a massa específica ou a concentração de sólidos do fluido variando, consideravelmente, na vertical e, também, no tempo.

Isto ocorre devido à retenção de sólidos no reator o que origina uma variação na altura e na concentração do banco de lodos entre intervalos de descarte de lodos. Isto é, não se tem uma situação – altura e concentração do banco de lodos – constante e ideal, pois estas características estão constantemente variando e esta variação influencia a mistura, a estabilidade do escoamento e origina um gradiente negativo de massa específica na vertical, esta última afirmação verificada em protótipo.

Verificou-se também, que incrementos na vazão geram correspondentes incrementos na velocidade do escoamento, aumentando a altura e diminuindo a concentração do banco de lodos, com consequências semelhantes às descritas no parágrafo anterior.

A geometria e/ou seção efetiva de escoamento do reator é fortemente tridimensional e variável na vertical, o que gera, teoricamente, um gradiente negativo de velocidades na vertical, que associado à variação de massa específica pode originar perturbações importantes no escoamento.

Temos ainda uma grande produção de gás, que é subproduto do processo anaeróbio, que não se solubiliza e ainda sobe aos pulsos, isto é, de forma intermitente, com frequência desconhecida e de difícil determinação. Na formação de gás encontra-se uma provável origem de instabilidades hidrodinâmicas no escoamento.

Quando a produção é intensa (efluentes de alta concentração) e o gás encontra-se aprisionado na massa líquida, a densidade da mistura torna-se menor do que a do meio circundante, e desta forma existe a possibilidade, que muitas vezes torna-se realidade, de que as bolhas de gás ao subirem, se não devidamente captadas, carreguem para cima placas de lodo, podendo gerar diferenças de concentrações em um mesmo plano e instabilizar, não apenas o banco de lodos, como todo o escoamento do reator.

Para o conhecimento das condições médias de variação de massa específica do fluido, foram coletadas amostras de lodo em diversas verticais no protótipo e foram determinadas faixas de variações. Entretanto, por falta de equipamento adequado, não conseguiu-se medir variações instantâneas e nem a evolução destas ao longo do tempo. A metodologia de coleta e determinação desta propriedade será apresentada posteriormente neste trabalho.

Observou-se, também, que amostras de lodo, principalmente as de camadas próximas ao fundo, apresentavam variações significativas em sua viscosidade, o que foi verificado posteriormente em análises de laboratório.

Como nota-se, o escoamento neste tipo de estrutura é complexo e influenciado por muitos fatores. Portanto, como foi necessário estudar a variação de vários parâmetros ao mesmo tempo, os resultados deste trabalho estão sujeitos a erros e imprecisões, porém servirão para alertar e direcionar estudos posteriores.

## 3.2 Equações que regem o movimento

Como o escoamento é altamente estratificado, apresentando perfis de massa específica com variações, da ordem de 2‰<sup>1</sup>, procurou-se um equacionamento que simplificasse a resolução do problema utilizando esta característica de estratificação. Para tanto adotaram-se as hipóteses de Boussinesq aplicadas às equações do movimento. Este tipo de hipótese, correntemente utilizada em modelos de circulação atmosférica e outras condições de escoamento análogas, é válida quando a variabilidade instantânea das propriedades de um fluido numa mesma camada é desprezível em relação à variação vertical desta, permitindo a utilização de um modelo de variação de pressões hidrostático (Lesieur, 1990).

### 3.2.1 As aproximações de Boussinesq

Ao usar as aproximações de Boussinesq assume-se que os valores de propriedades importantes como massa específica, pressão e temperatura são dados por um valor de referência médio, acrescido de uma variação local muito pequena em relação à sua variação vertical, isto é,

$$\begin{aligned}\rho(\bar{x}, t) &= \rho_0(\bar{x}) + \rho'(\bar{x}, t) \\ p(\bar{x}, t) &= p_0(\bar{x}) + p'(\bar{x}, t) \\ T(\bar{x}, t) &= T_0(\bar{x}) + T'(\bar{x}, t)\end{aligned}\tag{3.1}$$

sendo,  $|\rho'|/\rho_0 \ll 1$ ,  $|p'|/p_0 \ll 1$  e  $|T'|/T_0 \ll 1$ . É importante frisar que o valor de referência citado é constante numa mesma camada e varia apenas com a altura. A adoção destas aproximações servirá para a simplificação das equações do movimento para o caso em estudo, pois foi verificado através de levantamentos de campo, que os valores médios de propriedades importantes como massa específica, não variam em pontos de mesma profundidade e de localizações diferentes no interior do reator.

---

<sup>1</sup>Como comparação cita-se a estratificação existente em estuários, onde a água do mar com massa específica de 2 a 3‰ mais pesada que a de rios, em épocas de estiagem escoam para montante destes provocando salinização das águas doces.

### 3.2.2 Equação da continuidade

A equação da conservação de massa, conhecida também, como equação da continuidade, representa o balanço de massa em um ponto ou em um volume de controle. Representa a variação de velocidade ( $\vec{V}$ ) e massa específica ( $\rho$ ) com a posição e é definida pela seguinte expressão:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{V}) = 0, \quad (3.2)$$

onde,

$$\vec{V} = u\vec{i} + v\vec{j} + w\vec{k}$$

Utilizando as aproximações de Boussinesq para a massa específica, podemos considerar  $\rho = cte$  e a equação (3.2) se reduz a:

$$\nabla \cdot \vec{V} = 0 \quad (3.3)$$

É importante ressaltar neste momento, que a geração de gás pelo sistema altera a massa específica de forma lenta, sendo possível tratar esta situação como uma sucessão de estados estacionários, pois caso contrário, o termo  $(\partial \rho / \partial t)$  da equação (3.2) não poderia ser desprezado.

### 3.2.3 Equação de Navier-Stokes

A Equação de Navier-Stokes, conhecida também como equação da quantidade de movimento para fluidos, é representada pela expressão:

$$\frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + \vec{V} \cdot \nabla \vec{V} = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \nu \nabla^2 \vec{V} + \frac{1}{\rho} \vec{F}_c \quad (3.4)$$

onde  $F_c$  representa as forças de campo, isto é, todas as forças que agem sobre uma partícula de fluido,  $\nabla^2$  é o Laplaciano e  $\nu$  é a viscosidade cinemática.

Aplicando as aproximações de Boussinesq às equações do movimento e efetuando as operações matemáticas necessárias, conforme Tritton (1988) e Lesieur (1990), chegar-se-á a números adimensionais importantes para o estudo, os quais regem a semelhança entre o escoamento a ser modelado e o que ocorre em reatores em escala real.

É importante ressaltar que a bibliografia é toda voltada ao estudo de instabilidades atmosféricas, as quais ocorrem por diferenças de densidade das massas de ar ocasionadas por

gradientes térmicos, porém com algumas analogias entre variações de temperatura, densidade e concentração pode ser facilmente utilizado para o problema em estudo, pois nos três casos ocorrem as forças de campo da equação (3.4) e são da mesma ordem de grandeza. Estas analogias são apresentadas abaixo:

$$F \sim \frac{g\Delta\rho}{\rho} \sim g\alpha\Delta T \sim g\alpha_c C \quad (3.5)$$

onde:  $\alpha_c = \Delta\rho / \rho C$

$C$  = concentração e

$\alpha$  = coeficiente de expansão térmica.

### 3.3 Efeitos da estratificação no funcionamento do DAFA

Chamamos de estratificado o escoamento que é afetado por uma variação vertical de densidade ou massa específica. Esta variação pode ser positiva ou negativa, e na maioria dos casos de escoamentos estratificados, onde as forças preponderantes são as de flotação ou empuxo, esta condição é determinante para a estabilidade do escoamento.

A instabilidade de um escoamento ocorre devido a um desequilíbrio entre as forças externas e internas, como por exemplo as forças de empuxo em um fluido de densidade variável, e as de forças de inércia e viscosas.

Na ausência de perturbações no campo de velocidades causadas por forças externas e considerando os efeitos viscosos desprezíveis, o fluido move-se de acordo com o equilíbrio entre sua inércia e sua pressão interna, sendo que este equilíbrio pode ser quebrado por pequenas perturbações. A tendência do fluido de deslocar-se no sentido do gradiente negativo de pressões pode ser visto como amplificador dos distúrbios de certos escoamentos, gerando instabilidades ( Drazin & Reid, 1981).

As condições de contorno do escoamento também desempenham papel importante, agindo como limites e restringindo o desenvolvimento de perturbações e, geralmente, quanto mais próximos forem estes limites, mais estável é o escoamento. Portanto, o problema em estudo é tão complexo quanto a instabilidade, pois caracteriza-se por uma estrutura tridimensional com seção variável, o que por si só justifica a modelagem física.

Quando tem-se um sistema com uma camada de fluido mais denso sobre outra de fluido menos denso, ocorrerá uma tendência ao movimento que se opõem ao sentido da

aceleração da gravidade, podendo ocorrer recirculações por efeitos de empuxo. Esta tendência é controlada por efeitos difusivos e dissipativos da condutividade e da viscosidade, respectivamente. O número adimensional que relaciona estes efeitos é o número de Rayleigh ( $Ra$ ).

Podem existir ainda situações onde a estratificação do meio seja inversa à citada acima, isto é, quando temos fluido mais denso em baixo e fluido mais leve em cima, o que teoricamente induz a um escoamento estável e que pode ser descrito pelo número de Richardson ( $Ri$ ).

Porém, quando injeta-se um fluido menos denso em um fluido com uma estratificação estável, é difícil prever analiticamente como será o escoamento e a simulação em modelo físico faz-se necessária.

Para falar de estabilidade da estratificação, introduzir-se-á o conceito de ondas internas de densidade. Estas ondas se propagam internamente no fluido, e são descritas pelo movimento oscilatório de uma partícula de fluido que se desprende de sua camada por efeito de uma força instabilizadora, como por exemplo a de empuxo. Esta partícula tende a voltar à sua camada originária e oscilar em torno desta, pois ora possui a densidade desta camada (inferior), ora possui densidade igual à da camada superior. Sua frequência de oscilação, também conhecida por frequência de Brunt-Väisälä, é descrita por:

$$N^2 = -\frac{g}{\rho_0} \frac{d\rho_0}{dz} \quad (3.6)$$

Quando  $N^2 < 0$ , a estratificação do escoamento é instável. Se  $N^2 = 0$ , o fluido não é estratificado ou a estratificação é insignificante. Quando  $N^2 > 0$ , a estratificação é estável e não produz perturbações no escoamento.

Os desenvolvimentos matemáticos detalhados para encontrar-se a equação (3.6) são encontrados nos trabalhos de Tritton (1988) e Lesieur (1990).

### **3.4 Dificuldade do estudo analítico**

A partir das hipóteses apresentadas por Maestri e Gimenez (1998), onde são relacionadas as equações gerais do escoamento com as devidas aproximações e simplificações e do capítulo anterior, verifica-se que o estudo analítico é complexo e só é possível para soluções particulares, bem definidas e simplificadas, onde as condições de contorno são

simples e constantes e não funções desconhecidas de mais de uma variável e como no caso em estudo.

Outro fator que torna o estudo complexo é a falta de soluções relatadas na bibliografia para sistemas onde injeta-se fluido menos denso em um fluido com uma estratificação estável através de várias fontes ou jatos, e é difícil prever como será a influência da interação destes diversos pontos de injeção sobre o escoamento.

Para a análise da estabilidade é necessário, também, conhecer-se as propriedades físicas do fluido em questão, se são constantes ou não, e neste caso conhecer a função que representa suas variações.

### **3.5 Modelagem Física**

A partir da dificuldade encontrada para proceder-se o estudo analítico, propõe-se a elaboração e construção de um modelo físico para iniciar-se o estudo do escoamento deste tipo de reator.

Para a elaboração e projeto do modelo são necessárias etapas preliminares que compreendem o estudo das variáveis que influenciam o escoamento e escolha daquelas de interesse para o estudo, assim como uma análise dimensional do fenômeno para reagrupar as variáveis em grupos adimensionais permitindo a verificação de sua maior ou menor importância ou não no fenômeno. Após determinados os grupos importantes, procura-se manter as mesmas relações de forças no protótipo e no modelo, ou seja, os mesmos números adimensionais nos dois.

Para tanto, são calculadas as escalas do modelo. Normalmente, opta-se por fixar uma das escalas a partir da necessidade de respeitar limites importantes para o fenômeno e/ou limitações físicas do aparato experimental. Neste caso fixou-se a escala geométrica considerando o espaço físico das instalações e a estrutura do modelo, levando sempre em consideração a manutenção da geometria existente no protótipo e a tridimensionalidade do escoamento. A escala geométrica escolhida foi de 1:5, pois desta forma garante-se tridimensionalidade ao modelo, condição obrigatória para o estudo. As demais escalas para o modelo são calculadas respeitando relações de forças que são dependentes das dimensões geométricas, a partir dos números adimensionais determinados. De posse das escalas do modelo, determinaram-se suas faixas de operação de acordo com as possibilidades da instalação experimental e da instrumentação disponível.

### **3.6 Simplificações e limitações da simulação**

Conhecer as limitações da simulação é imprescindível para a compreensão do estudo e dos resultados, isto é, deve-se entender exatamente o problema a ser estudado a fim de aplicar-se sempre a relação de forças necessária para tanto, já que a semelhança completa, neste caso, torna-se difícil e poderia inviabilizar o estudo.

Como citado anteriormente, o modelo proposto é classificado como adequado, pois não simulará todas as forças e seus efeitos sobre o escoamento. Não será modelada a diferença de viscosidade entre o lodo do reator e a água, o que de certa forma é arriscado, já que a entrada do efluente se dá por meio de jatos turbulentos. Também não serão modeladas as bolhas de gás, nem a diferença entre a tensão superficial existente entre o lodo e a água. Para qualquer tentativa de simulação de bolhas, deveria ser levado em consideração o número de Weber, que representa os efeitos da tensão superficial.

Situações de inversão da estratificação, isto é, momentos de instabilidade, não foram observadas, ou pela pequena série de observações que se pôde fazer ou pela não existência das mesmas na situação em que se encontrava o protótipo. Não se conseguiu desta forma, realizar medidas na época em que foi observada a ocorrência de desprendimento de placas de lodo, o que não permitiu a confirmação ou não das hipóteses de instabilidade hidrodinâmica e como conhece-se apenas seus mecanismos teóricos não houve simulação deste fenômeno, também.

Neste trabalho serão simulados apenas os efeitos de uma estratificação estável sobre o escoamento do reator, a fim de verificar se ela realmente estabiliza o escoamento ou se existem caminhos preferenciais desde a entrada dos jatos até a saída.

Como se pode notar, até mesmo a modelagem física do problema é complexa, e a modelagem de todos os fatores que influenciam o escoamento inviabilizaria o estudo. Por este motivo, efetuar-se-á a modelagem descrita acima, com o estabelecimento de uma metodologia para tanto e com o levantamento de informações importantes, como por exemplo a diferença existente entre as propriedades físicas do lodo e as da água.

### 3.7 Análise Dimensional

Abaixo são relacionadas as possíveis variáveis com influência no fenômeno:

1. Vazão:  $Q$ ,  $[L^3T^{-1}]$
2. Velocidade Ascensional:  $V_a$ ,  $[LT^{-1}]$
3. Gravidade:  $g$ ,  $[L^2T^{-1}]$
4. Largura:  $L_1$ ,  $[L]$
5. Comprimento:  $L_2$ ,  $[L]$
6. Altura:  $h$ ,  $[L]$
7. Tempo:  $t$ ,  $[T]$
8. Massa específica:  $\rho$ ,  $[ML^{-3}]$
9. Viscosidade cinemática:  $\nu$ ,  $[L^2T^{-1}]$
10. Difusividade térmica:  $k$ ,  $[L^2T^{-1}]$
11. Tensão Superficial:  $\sigma$ ,  $[MT^{-2}]$
12. temperatura:  $T$ ,  $[\Theta]$
13. Concentração:  $C$ ,  $[ML^{-3}]$
14. Variação de massa específica:  $\Delta\rho$ ,  $[ML^{-3}]$
15. Variação de temperatura:  $\Delta T$ ,  $[\Theta]$

O fenômeno pode ser função dos seguintes parâmetros adimensionais:

$$f_1\left(V_a L / \nu, V_a L / k, \nu / k, V^2 / gL, \Delta\rho / \rho, \frac{g\alpha\Delta TL^3}{\nu^2}, L_1 / L_2, L_1 / h, L_2 / h, g\Delta\rho h / V^2, \rho V_a^2 L / \sigma\right) = 0$$

Ou rescrevendo a função com a notação usual dos números adimensionais:

$$f_1\left(R_e, P_e, P_r, F_r^2, G_r, R_i, W, \frac{\Delta\rho}{\rho}, \frac{L_1}{L_2}, \frac{L}{H}\right)$$

$$\text{Número de Reynolds: } R_e = \frac{VL}{\nu} \quad (3.7)$$

Poderá ser útil na zona de campo próximo onde as velocidades são maiores. Não tem influencia direta no campo longínquo, pois as velocidades são muito baixas e as forças de inércia não são preponderantes no fenômeno .

$$\text{Número de Peclet: } P_e = \frac{VL}{k} \quad (3.8)$$

É similar ao número de Reynolds, diferenciando-se, apenas por abordar a difusividade térmica, em contrapartida à viscosidade cinemática, que é, também um tipo de difusividade. Como as trocas de calor dentro do reator são muito baixas, este fator não se torna preponderante para o fenômeno.

$$\text{Número de Prandtl: } Pr = \frac{\nu}{k} \quad (3.9)$$

Este número adimensional relaciona as difusividades térmicas e molecular, e para um mesmo fluido, é sempre constante, podendo ser abordado conjuntamente com outro parâmetro adimensional no caso, o número de Grashof.

$$\text{Número de Froude: } Fr = \frac{V^2}{gL} \quad (3.10)$$

Possui certa correlação com o fenômeno a ser estudado, porém representa fenômenos de ondas de superfície, enquanto o problema em questão é de ondas internas de densidade.

$$\text{Número de Grashof: } Gr = \frac{g\alpha\Delta TL^3}{\nu^2} \text{ (introduzindo-se o coeficiente } \alpha \text{ )} \quad (3.11)$$

Sendo  $\alpha$  o coeficiente de expansão volumétrica do fluido, o número de Grashof representa uma situação particular do problema, mais precisamente quando o gradiente de massa específica gerado pela diferença de temperatura for positivo, isto é, maiores temperaturas nas camadas inferiores, que correspondem a massas específicas menores nas respectivas camadas. Pode ser utilizado junto com o número de Prandtl para um mesmo fluido, gerando um outro número adimensional, o número de Rayleigh.

$$Gr \cdot Pr = \frac{g\alpha\Delta TL^3}{\nu k} = R_a = \text{número de Rayleigh} \quad (3.12)$$

$$\text{Número de Richardson: } R_i = \frac{g\Delta\rho h}{\rho V^2} \quad (3.13)$$

Representa o fenômeno quando o gradiente de massa específica for negativo, isto é, quando as camadas inferiores possuírem massas específicas maiores, o que ocorre no protótipo.

$$\text{Número de Weber: } W = \frac{\rho V^2 L}{\sigma} \quad (3.14)$$

Poderá ser importante a partir do momento em que se quiser representar um escoamento bifásico, isto é, ao introduzir-se mais um aspecto que seriam as bolhas de gás. Na modelagem proposta não será abordada este problema, portanto não será utilizado.

$$\text{Relações geométricas: } L_1 / L_2 ; L_1 / H ; L_2 / H \quad (3.15)$$

São relações entre as dimensões do reator, que determinam sua tridimensionalidade, e para o problema em questão, são fixadas de acordo com a escala geométrica do modelo.

Desta forma chegamos à função que melhor representa o fenômeno em estudo, sendo composta de dois diferentes números adimensionais, que para situações distintas darão a similitude do escoamento,

$$f_2(Ra, Ri) = 0 \quad (3.16)$$

Porém, por problemas operacionais no protótipo não foi possível observar períodos com possíveis inversões da estratificação causadas por algum fator instabilizador, como por exemplo um acréscimo de vazão muito acentuado e a análise limitou-se a situações com gradiente negativo de massa específica do meio. Logo,

$$f_3(Ri) = 0 \quad (3.17)$$

Nota-se que muitos dos números adimensionais aqui considerados importantes para o estudo foram desprezados, o que de certa forma limita as conclusões deste trabalho. Porém mantem-se coerência com os objetivos apresentados e com a dificuldade de simulação de diversos fatores simultaneamente. Isto é, a simplificação introduzida viabilizará uma melhor compreensão do assunto.

A simulação dos gradientes de densidade por si só introduz grande dificuldade ao estudo e foi escolhida por ser um dos fatores com maior peso nas equações que regem o escoamento.

## 4. METODOLOGIAS DE EXPLORAÇÃO DO PROTÓTIPO E DO MODELO

### 4.1 Introdução

Como abordado desde o início deste trabalho, o relativo desconhecimento das leis hidrodinâmicas que regem este tipo de reator, a complexidade matemática para seu estudo analítico e até mesmo a impossibilidade de se representar todas as forças que atuam sobre o sistema em questão, fizeram com que a pesquisa seguisse os seguintes passos:

- Análise do protótipo;
- Determinação e fixação da escala geométrica do modelo;
- Projeto e construção do modelo;
- Análise dimensional do problema;
- Levantamentos de campo;
- Determinação e escolha da força preponderante e do parâmetro adimensional que a representa, assim como da possibilidade de sua simulação e
- Simulações e verificações no modelo físico reduzido.

A análise dimensional e a determinação da força a ser representada assim como os parâmetros adimensionais representativos já foram abordados anteriormente. Pretende-se neste capítulo descrever os demais passos do estudo, a começar pela descrição sucinta do protótipo e do modelo. Logo após, descrever-se-á a coleta de material do protótipo, as análises que foram feitas, os instrumentos utilizados, suas precisões, as dificuldades encontradas e os resultados obtidos. Será feito também o relato dos experimentos, seus procedimentos, seus acertos, seus erros e a instrumentação utilizada.

A estratificação, isto é, a separação do escoamento em fases ou faixas de massa específica diferenciadas, a qual é função da concentração do lodo, da formação de gases e da variação de temperatura no digestor, será representada através de uma só variável de controle. Para tanto, foram testadas duas formas de simulação mencionadas na bibliografia: temperatura e salinidade. Ao trabalhar-se com água limpa, como é o caso, a introdução de um gradiente de temperatura gera automaticamente um gradiente de densidade ou de massa específica. De forma análoga, a introdução de uma solução salina também gera um gradiente de massa específica. Pretende-se verificar qual destas duas formas de simulação alcança

melhores resultados na representação do protótipo, diminuindo o número de variáveis a serem simuladas e simplificando a modelagem física.

A análise dos limites e das condições de semelhança é feita em três etapas. A primeira consiste na determinação do(s) número(s) adimensionais que regem o escoamento em questão. A segunda se baseia na determinação de parâmetros de controle (vazão, velocidade) e de propriedades físicas (massa específica), assim como suas faixas de variação no protótipo. A última e terceira etapa, resulta na determinação das escalas que regem a semelhança entre modelo e protótipo, com a determinação das faixas de simulação possíveis para a instalação experimental existente.

Após estabelecida a semelhança entre protótipo e modelo, e os limites de operação deste, foram realizados ensaios variando-se a vazão e, conseqüentemente, a velocidade ascensional, com a finalidade de se verificar a influência desta no escoamento na estrutura como um todo.

## **4.2 Descrição do protótipo**

O protótipo utilizado para as medidas de campo atende a uma comunidade com cerca de 10000 habitantes. Construído em concreto, é composto por duas células de, aproximadamente, 129m<sup>3</sup> cada, que possuem seção transversal trapezoidal (figura 4.1) com paredes inclinadas a 45°. Inicialmente, continham placas colocadas transversalmente às paredes inclinadas, com a função de separador de fases, distinguindo a zona de digestão da zona de decantação. Durante o projeto estas placas transversais foram retiradas por estarem com defeitos e optou-se por deixar uma das células sem separador de fases e para a outra foi desenvolvido um sistema integrado de separador de fases e coletor de gases fabricado com lona de alta densidade.

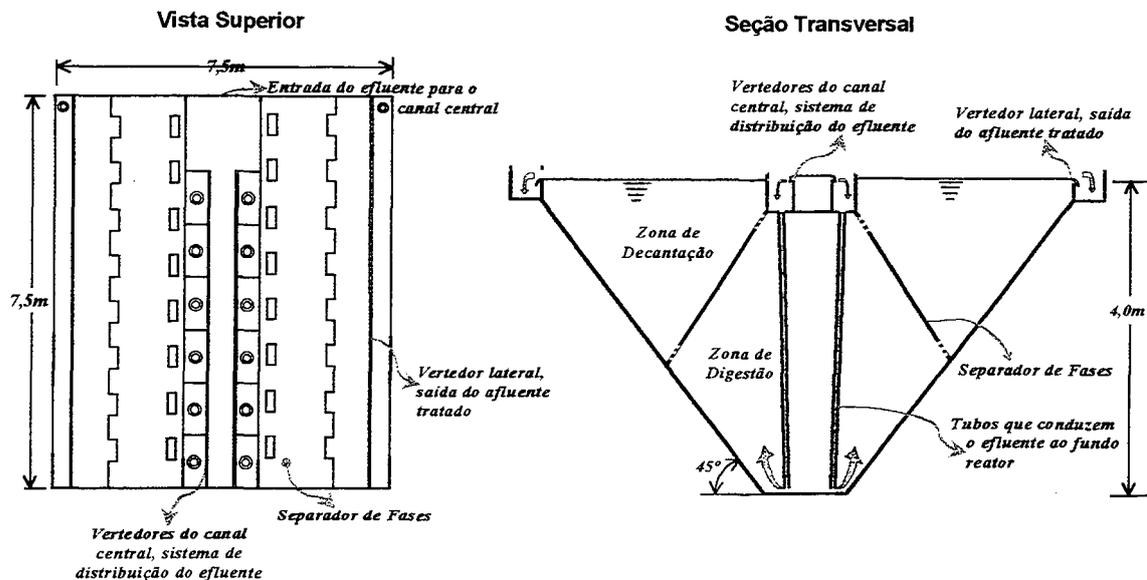


Figura 4.1 – Representação esquemática do protótipo

A entrada do efluente se dá pelo canal central na parte superior, onde o efluente é então, dividido e conduzido ao fundo do reator. Do fundo do reator, o efluente segue uma trajetória em fluxo ascendente passando pela zona de digestão onde se localiza a massa bacteriana anaeróbia responsável pela degradação da matéria orgânica. Passando pelos orifícios presentes na placa separadora de fases, segue para uma região de fluxo mais tranquilo, onde o objetivo é que as partículas de esgoto que aí chegarem, encontrem uma situação que não permita a sua ascendência e sedimentem sobre o separador de fases e, quando o peso do conjunto das partículas sedimentadas for considerável, escorreguem e retornem à zona de digestão. Abaixo é apresentada uma foto que ilustra a estação.



*Figura 4.2 - Foto da estação de tratamento (protótipo)*

Teoricamente o efluente, que então chega até a parte superior do digestor, decantando sobre os vertedores laterais, estará livre de grande parte de sua matéria orgânica poluente. A seção transversal trapezoidal proporciona a redução da velocidade do fluxo ascendente na medida em que o efluente se aproxima da parte superior devido ao fato de que a área transversal longitudinal vai aumentando neste mesmo sentido.

### **4.3 Parâmetros medidos no protótipo**

#### **4.3.1 Sistemática de coleta**

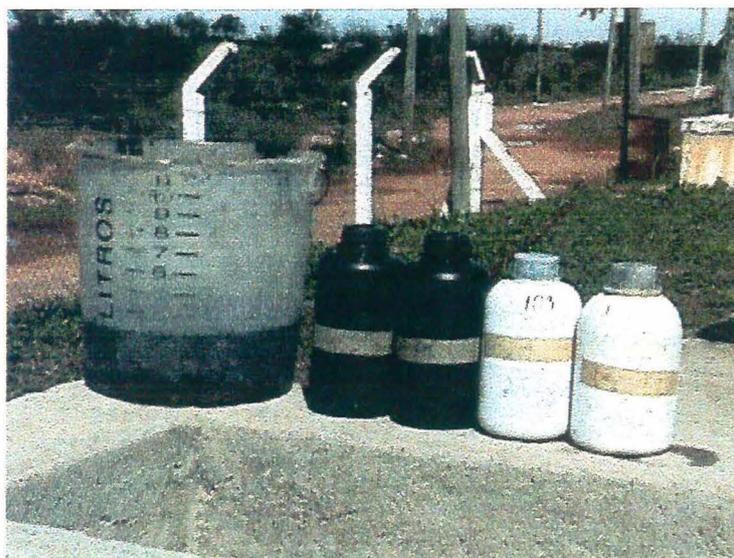
Para a análise das propriedades físicas do lodo do reator desenvolveu-se uma sistemática de coleta e transporte do material desde a estação na cidade de Cachoeirinha/RS até os laboratórios do IPH. A coleta era feita com a ajuda de um amostrador de lodo (Figura 4.3) que possibilitava a amostragem em diferentes pontos e profundidades do reator. O amostrador consiste basicamente em uma haste com 1,0 metro a mais do que a profundidade do reator, que carrega em uma de suas extremidades um recipiente com janelas por onde entra o lodo. Estas são abertas por um sistema de molas acionadas, manualmente, por uma corda que é conduzida do amostrador até o operador por dentro da haste.



*Figura 4.3 - Amostrador de lodos*

Verificou-se que a coleta feita em diversos pontos de uma mesma vertical, devia iniciar pelos pontos de cima, para que a introdução do amostrador provocasse o mínimo possível de agitação nos pontos inferiores. A vedação das janelas de admissão de lodo foi verificada antes da introdução do amostrador e logo após sua retirada, para garantir que a coleta tivesse recebido o mínimo possível de infiltração de outras camadas.

Após realizada a coleta em cada ponto do reator, o efluente era despejado em um jogo de recipientes (Figura 4.4), que serviam para análises locais e para o transporte do material para os laboratórios.



*Figura 4.4 – Recipientes utilizados para a coleta do lodo*

### 4.3.2 Massa específica

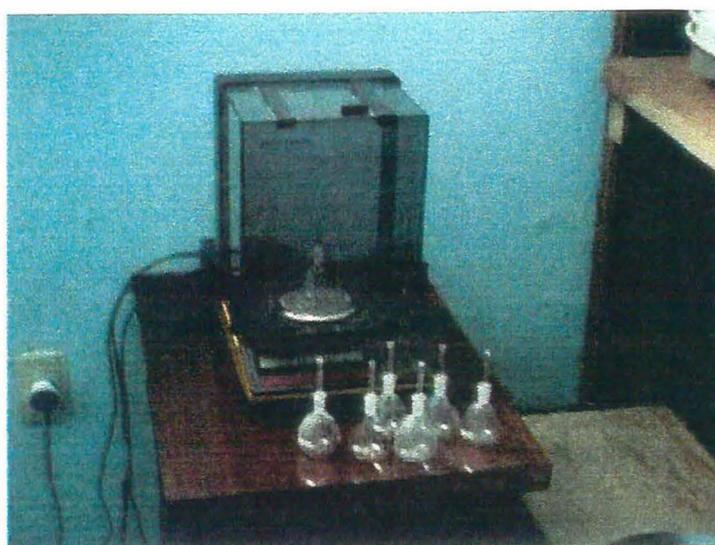
Para a medição da massa específica do lodo utilizaram-se duas técnicas distintas: a indireta com a utilização de um densímetro flutuador (Figura 4.5) e a direta, utilizando-se a técnica de pesagem com picnômetros (Figura 4.6).



*Figura 4.5 - Densímetro e proveta utilizados na medição indireta*

Pretendia-se inicialmente, utilizar a primeira técnica pela sua facilidade de operação, que consiste em despejar a amostra de lodo em uma proveta, introduzir lentamente o densímetro e fazer a leitura em sua escala.

Porém, notou-se que para o material mais concentrado do fundo do reator, isto é, o do banco de lodos, a leitura era prejudicada pela aderência do densímetro ao lodo. Acredita-se que isto ocorra devido à maior viscosidade do lodo.



*Figura 4.6 - Picnômetros e balança utilizados na medição direta*

A partir do descrito anteriormente, foram utilizados picnômetros de 50 ml para pesar as amostras de lodo dos diferentes pontos e profundidades do reator. Este procedimento consiste em comparar-se o peso medido dos picnômetros com lodo e os que continham água limpa.

Neste caso, os resultados obtidos mantiveram uma boa repetibilidade para todas as profundidades e confirmou-se que o densímetro flutuador não realiza boas medidas para o material mais concentrado, pois a diferença encontrada entre as massas específicas medidas, com uma e com outra técnica, ultrapassou os 50% da variação média da massa específica do lodo em relação a da água, que é o valor de referência.

### 4.3.3 Viscosidade

Além da massa específica, mediu-se a viscosidade do lodo do fundo do reator, já que não há uma correlação direta entre estas duas propriedades e não foram encontradas referências sobre este assunto. Objetivava-se verificar a magnitude de sua variação e a possível necessidade de simulá-la em algum estudo específico.

A medição foi realizada com um viscosímetro digital programável Brookfield DV-2+ ( Figura 4.7) que opera aplicando torques em um pequeno e esbelto cilindro ( spindle ), que gera tensões variadas em uma amostra de fluido e mede a deformação deste. Para fluidos newtonianos o gráfico (tensão x deformação) se aproxima de uma reta e a declividade desta reta representa a viscosidade deste fluido. Fluidos cujas curvas não são retas e/ou a viscosidade varia de acordo com a tensão aplicada são chamados não-newtonianos. O lodo anaeróbio analisado enquadra-se nesta segunda classificação.

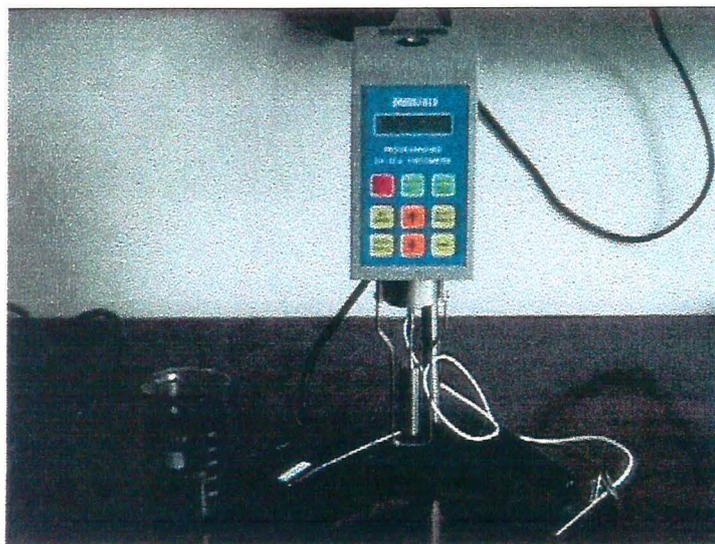
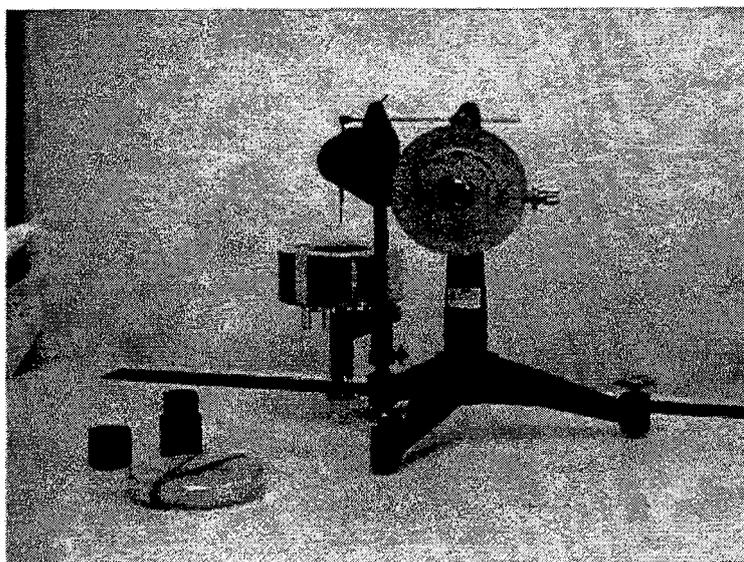


Figura 4.7 – Viscosímetro e demais periféricos utilizados na medição da viscosidade do lodo

#### 4.3.4 Tensão superficial

Como sabe-se, água com alta concentração de matéria orgânica dissolvida apresenta valores de tensão superficial menores que os da água limpa. Para verificar a intensidade desta variação, verificaram-se algumas amostras de lodo.

As análises foram feitas utilizando-se um tensiômetro interfacial ( Figura 4.8), que mede a força realizada para mover um fino anel metálico na interface entre fluido e ar. É importante, neste tipo de análise, observar o valor da temperatura da amostra para comparar-se os resultados obtidos com os de uma água limpa à mesma temperatura. A temperatura das amostras, neste caso, era de 30°C.



*Figura 4.8 – Tensiômetro utilizado na medição da tensão superficial do lodo*

Esta verificação é importante na medida em que deseja-se simular bolhas de gás, o que não faz parte do escopo deste trabalho.

#### 4.3.5 Sólidos

Mediu-se a concentração de sólidos do fluido estudado com dois objetivos: verificar se a condição do lodo da estação, em relação a concentração de sólidos, era condizente com os valores apresentados pela bibliografia e, também, no intuito de fazerem-se correlações com as demais propriedades medidas

Seguindo as recomendações do *Standart Methods*, manual que padroniza os processos de análises de propriedades físicas e químicas de águas e efluentes, foram

realizadas análises de sólidos totais em amostras de lodo que foram analisadas também, para a medição das outras propriedades.

#### **4.3.6 Temperatura**

As medidas anteriormente referidas, massa específica, viscosidade, tensão superficial e sólidos foram feitas por amostragem discreta ao longo da exploração do modelo. Com o objetivo de observar o comportamento do DAFA de forma contínua, monitorou-se a temperatura.

Monitorou-se uma vertical representativa do protótipo, a fim de observar-se possíveis inversões térmicas que pudessem ocasionar instabilidades no escoamento do reator. Acompanhou-se também, o efeito da variação térmica diária ambiente sobre a temperatura do reator.

A instrumentação utilizada consistiu em sondas termoresistivas tipo PT-100, com precisão de 0,1°C e gravador de dados (*dataloger*) com possibilidade de gravação em diversos intervalos de tempo, desenvolvidos pelo setor de instrumentação do IPH especialmente para este fim.

#### **4.3.7 Vazão**

A vazão era medida na estação através de uma calha *Parshal* e relacionava-se sempre com o tempo de retenção hidráulico utilizado na estação. Por deficiências na operação não apresentava boa precisão. Como a exploração do modelo foi feita para uma faixa de vazões, obtidas a partir de tempos de retenção hidráulica citados pela bibliografia corrente, a medida de valores particulares de vazão no protótipo deixou de ser importante.

### **4.4 Objetivos na exploração do modelo**

O primeiro passo a ser dado na exploração do modelo é a verificação dos limites da instalação, isto é, as vazões e os gradientes de massa específicas máximos e mínimos possíveis de serem utilizados de forma operacional.

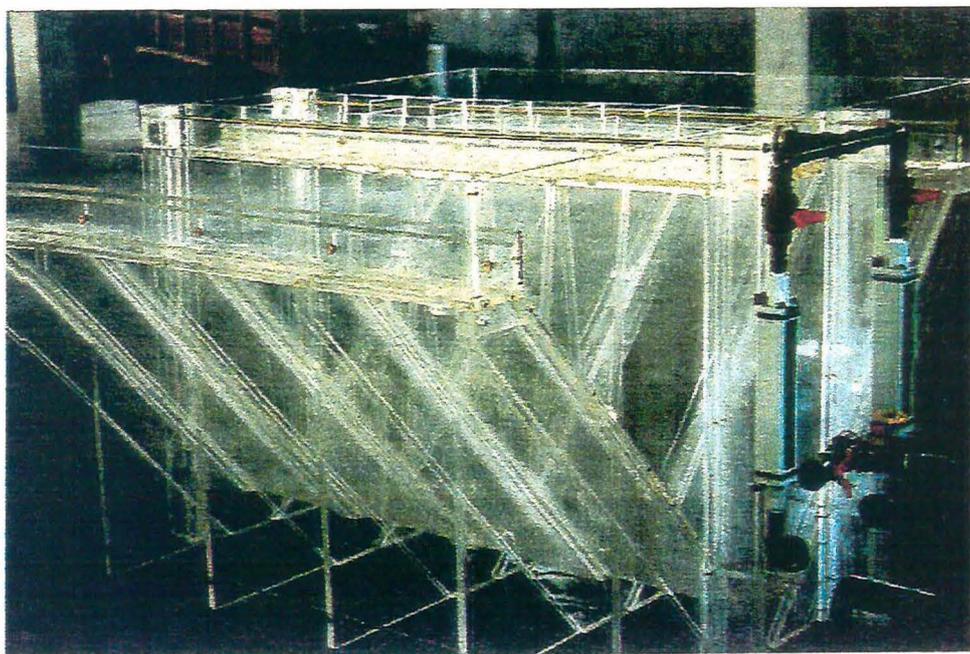
Esta etapa foi realizada com testes preliminares onde testou-se a instalação das mais variadas formas, observando seus limites de operação. Logo após traçou-se um plano de ensaios para determinar quantos e quais ensaios seriam realizados. Este plano é baseado nos objetivos do trabalho, no tempo estimado para cada ensaio e no tempo disponível para efetuá-los.

Feito o plano, iniciou-se a execução das baterias de ensaios, simulando as situações observadas no protótipo, a fim de verificar como é o escoamento nestas situações. Nesta etapa, os ensaios foram filmados para posterior aquisição e tratamento das imagens.

#### 4.5 Descrição do modelo

A partir do projeto em escala real do DAFA pré-existente e elaborado pelo Eng<sup>o</sup> Francisco Bidone – professor do Instituto de Pesquisas Hidráulicas – foi projetado o modelo reduzido em escala 1:5.

Como pode ser observado na figura (4.9), preservou-se a visualização do escoamento com a construção do modelo em chapas de acrílico transparente com 10mm de espessura em todas as faces. As placas representativas do separador de fases, também em acrílico, são móveis, possibilitando a alteração das suas posições dentro do reator. Os tubos que conduzem o efluente ao fundo do reator foram, inicialmente, feitos em vidro e, posteriormente, trocados por mangueiras flexíveis, de modo a possibilitar a mudança dos pontos de entrada do efluente. Para a entrada do efluente no fundo do reator, foi projetada e construída uma peça especial que permite a escolha da direção e do número de jatos de entrada.



*Figura 4.9 – Modelo reduzido construído em acrílico*

O modelo possui ainda, instrumentação adequada ao controle da vazão afluyente, assim como termômetros e densímetros para controle de propriedades da água. Foram desenvolvidas também, sondas que medem a condutividade elétrica da água a fim de medir-se indiretamente a massa específica e/ou a densidade em diversas profundidades do modelo.

## 4.6 Escalas do modelo

Para a determinação das escalas do modelo o número adimensional a ser utilizado será o de Richardson ( $Ri$ ) que representa a situação de estratificação verificada no protótipo e, como citado anteriormente, a escala geométrica foi fixada previamente em  $\lambda_l = 1/5$  e as demais escalas são calculadas a partir dela como abaixo:

$$Ri = \frac{g\Delta\rho h}{\rho V^2}$$

$$Ri_m = Ri_p \rightarrow g \frac{h_m}{V_m^2} \Delta\rho_m = g \frac{h_p}{V_p^2} \Delta\rho_p \rightarrow \frac{h_m}{h_p} \frac{\Delta\rho_m}{\Delta\rho_p} = \frac{V_p^2}{V_m^2}$$

$$\frac{h_m}{h_p} = \lambda_l = 1/5 \rightarrow \frac{\Delta\rho_m}{\Delta\rho_p} = 5 \left( \frac{V_m}{V_p} \right)^2 \rightarrow \lambda_{\Delta\rho} = 5\lambda_v^2$$

$\lambda_l \rightarrow$  escala geométrica

$\lambda_v \rightarrow$  escala de velocidades

$\lambda_Q \rightarrow$  escala de vazões

$\lambda_{\Delta\rho} \rightarrow$  escala de variação de massa específica

A tabela 4.1 apresenta as relações entre as escalas do modelo

Fatores	Relações	Escalas	Relação entre escalas
Geométrica	-	$\lambda_l = 1/5$	-
Velocidade	-	$\lambda_v$	$\lambda_v = \lambda_Q \times 25$
Vazão	$Q = V \times A$	$\lambda_Q = \lambda_v \times \lambda_l^2$	$\lambda_Q = \lambda_v / 25$
Massa específica	-	$\lambda_{\Delta\rho} = 5 \times \lambda_v^2$	-

Tabela 4.1 – Relações de escalas do modelo

Temos então, duas escalas a determinar,  $\lambda_{\Delta\rho}$  e  $\lambda_v$ , esta última podendo ser substituída pela  $\lambda_Q$ , o que leva a arbitrar uma delas e, então, determinar a outra, verificando a

possibilidade de utilização da mesma, isto é, se a faixa determinada é possível de ser simulada no modelo,

- se  $\lambda_v = 1 \rightarrow \lambda_{\Delta p} = 5 \rightarrow$  o que é inviável de representar no modelo;
- se  $\lambda_v = 1/2 \rightarrow \lambda_{\Delta p} = 5/4 \rightarrow$  o que levaria a uma variação de aproximadamente 21 un de massa específica no modelo;
- se  $\lambda_v = 1/3 \rightarrow \lambda_{\Delta p} = 5/9 \rightarrow$  o que levaria a uma variação de aproximadamente 9 un de massa específica no modelo;
- se  $\lambda_v = 1/4 \rightarrow \lambda_{\Delta p} = 5/16 \rightarrow$  o que levaria a uma variação de aproximadamente 5 un de massa específica no modelo.

Verificando as escalas de vazões,

- se  $\lambda_v = 1 \rightarrow \lambda_Q = 1/25$
- se  $\lambda_v = 1/2 \rightarrow \lambda_Q = 1/50$
- se  $\lambda_v = 1/3 \rightarrow \lambda_Q = 1/75$
- se  $\lambda_v = 1/4 \rightarrow \lambda_Q = 1/100$

É necessário conhecer-se as vazões no protótipo ( $Q_p$ ) para verificar a possibilidade de simulação destas no modelo. A partir de tempos de retenção hidráulica ( $Trh$ ) usuais para DAFAs, determina-se as vazões para o protótipo em função de seu volume:

$$Q_p = Vol / Trh \quad (4.1)$$

onde:  $Vol =$  volume do reator =  $129m^3$

- se  $Trh = 3h \rightarrow Q_p = 12l / s$
- se  $Trh = 6h \rightarrow Q_p = 6l / s$
- se  $Trh = 9h \rightarrow Q_p = 4l / s$

logo,

- se  $\lambda_Q = 1/25 \rightarrow Q_m = 0,48l / s ; 0,24l / s ; 0,16l / s$
- se  $\lambda_Q = 1/50 \rightarrow Q_m = 0,24l / s ; 0,12l / s ; 0,08l / s$

- se  $\lambda_Q = 1/75 \rightarrow Q_m = 0,16l/s ; 0,08l/s ; 0,05l/s$
- se  $\lambda_Q = 1/100 \rightarrow Q_m = 0,12l/s ; 0,06l/s ; 0,04l/s$

Se o gradiente de massa específica do meio for positivo, isto é, massa específicas menores nas camadas inferiores, o escoamento tenderá a ser instável e a semelhança será dada pelo número de Rayleigh. A análise para esta situação não será realizada por este trabalho, pois por problemas operacionais no protótipo não foi possível observar períodos com possíveis inversões da estratificação causadas por algum fator estabilizador, como por exemplo um acréscimo de vazão muito acentuado. A análise limitou-se, portanto, a situações com gradiente negativo de massa específica do meio.

## **4.7 Simulação da estratificação no modelo**

### **4.7.1 Simulação com gradientes de temperatura**

A primeira tentativa de operação do modelo com estratificação de massa específica foi realizada injetando-se água quente à temperatura média de 60°C. Infelizmente este procedimento foi frustrado, pois inicialmente desconhecia-se a forma de estratificação do escoamento e acreditava-se que os ensaios consistiriam, simplesmente, na injeção de fluido com densidade inferior à do meio, o que posteriormente, verificou-se não corresponder à realidade do protótipo.

Como descrito anteriormente, possui-se um meio com forte estratificação negativa, onde as maiores densidades localizam-se na parte inferior do reator e injeta-se fluido com densidade inferior e da mesma ordem de grandeza do fluido da parte superior do reator. Esta situação é completamente diferente da primeira, onde injeta-se fluido com densidade inferior em um meio mais denso, mas homogêneo e produz-se um escoamento altamente turbulento devido à inércia dos jatos e à convecção originada pela diferença de densidades. Na segunda situação, a estratificação negativa origina um efeito altamente estabilizador do escoamento.

A água foi aquecida com um aquecedor de acumulação e bombeada para dentro do modelo com o sistema existente sem lhe causar problemas. Foi verificada apenas uma deformação excessiva do acrílico, mas que de nenhuma forma impediu os testes realizados. O sistema de monitoramento da temperatura cobria o modelo desde a entrada do efluente até a sua saída.

A visualização do escoamento foi feita através de corantes elaborados a partir de tinta PVA diluída em água e com a densidade ajustada pela adição de álcool etílico e medida com densímetros flutuadores de boa precisão. Procurou-se, assim, assegurar que a densidade do corante fosse a mesma da água limpa a fim de não comprometer os resultados obtidos. Este corante obteve ótimo resultado na visualização do fluxo e sua formulação foi apresentada em Gimenez 2000.

Foram feitas também, visualizações por partículas de estireno-butadieno com diâmetros que variaram de 1 a 0,15mm, enfatizando-se os resultados obtidos com diâmetro de 0,3mm. Foram utilizados planos de luz verticais obtidos a partir de refletores de jardim comuns de 1000 Watts de potência e com “máscaras” de alumínio com uma fina fenda da ordem de 1mm. Esta forma de visualização obteve bom resultado a olho nú, porém na captação da filmagem dos ensaios notou-se faltar intensidade luminosa. Além disto, a tridimensionalidade do escoamento fazia com que as partículas não se deslocassem apenas no plano de luz e sim, entrassem e saíssem deste, impossibilitando qualquer análise quantitativa do mesmo.

Enfim, não recomenda-se a utilização de água aquecida para a simulação em questão. Optou-se, então, pela utilização de outra forma de simulação de estratificação de massa específica. Não é recomendada também a utilização de planos de luz como o descrito acima para a análise de escoamentos tridimensionais como o analisado.

#### **4.7.2 Simulação com solução salina**

A segunda forma de simulação da estratificação foi feita injetando-se uma solução salina, a qual se depositava junto ao fundo do modelo e subia lentamente por diluição e difusão, formando uma espécie de “banco salino” como demonstrado na figura (4.10) pela cor verde. Esta situação foi extremamente interessante, pois mesmo havendo uma interface entre a solução salina (mais pesada) e a água limpa (mais leve), conseguiu-se simular de forma quase perfeita a estratificação verificada no protótipo.



*Figura 4.10 – “Banco salino” originado nas simulações  
pela introdução de solução salina*

Para a medição da massa específica resultante da salinização da água do modelo, foram construídas e aferidas sondas que medem a condutividade elétrica das soluções e esta é relacionada por curvas de calibração com a massa específica resultante da solução.

Nesta etapa do trabalho foram feitas dois tipos de ensaios distintos: um com o banco totalmente colorido com corante branco à base de tinta PVA e o outro injetando-se o mesmo corante e observando seu percurso por determinado tempo. O primeiro tinha por objetivo colorir o “banco salino” a fim de mostrar sua estabilidade para diversas faixas de vazão e estratificação do modelo. Pretendia-se, também, observar e medir as ondas internas que ocorrem na interface da estratificação com o objetivo de relacioná-las com os acréscimos de vazão. Este tipo de ensaio permitiu a observação da existência destas ondas internas. Por não possuir-se a instrumentação adequada, como câmera filmadora com maior velocidade de aquisição e iluminação correta, não foi possível medir suas amplitudes nem suas frequências, pois o borrão que aparecia na interface da estratificação era maior do que as amplitudes que deveriam ser medidas. Para este tipo de ensaio foram testados jatos do sistema de distribuição incidindo diretamente sobre as paredes com o objetivo de verificar se alguma modificação do sistema de distribuição podia de alguma forma instabilizar o escoamento, o que não ocorreu.

A introdução da solução salina era feita a partir dos vertedores de entrada do modelo e consistia basicamente em diluir-se 800g de sal de cozinha comum em 4 litros de água e adicioná-los de uma vez só no modelo. A adição do corante era feita de forma distinta para os dois tipos de ensaios. Para o primeiro o corante era adicionado em todo o fundo do reator pelos vertedores de entrada logo após a injeção da solução salina. A partir de então, esperava-se até que a leitura das sondas alcançasse os valores desejados para então, proceder-se a filmagem do ensaio. No segundo tipo de ensaio, primeiramente esperava-se que a leitura das sondas alcançasse os valores desejados quando introduzia-se o corante e filmava-se a sua trajetória.

Para esta forma de simulação, as escalas, as faixas de operação escolhidas e as quantidades de sal utilizadas no modelo são apresentadas nas tabelas 4.2 e 4.3:

- **Faixa de Operação nº1**

$\lambda_{\Delta\rho} = 5/16$	$\lambda_v = 1/4 \Leftrightarrow \lambda_Q = 1/100$	
$\Delta_\rho \approx 5$	$Trh_m(h)$	$Q_m(l/s)$
0,35 kg de sal	3	0,12
	6	0,06
	9	0,04

Tabela 4.2 – Faixa de operação nº1

Para esta faixa de operação não foi possível simular a vazão de 0,04 l/s, pois se aproximava muito do final da escala do rotâmetro e apareciam sérios problemas de tensão superficial nos vertedores de entrada do modelo.

- **Faixa de Operação nº2**

$\lambda_{\Delta\rho} = 5/9$	$\lambda_v = 1/3 \Leftrightarrow \lambda_Q = 1/75$	
$\Delta_\rho \approx 10$	$Trh_m(h)$	$Q_m(l/s)$
0,7 kg de sal	3	0,16
	6	0,08
	9	0,05

Tabela 4.3 – Faixa de operação nº2

A faixa de operação nº 2 foi a mais utilizada, pois contemplava os três tempos de retenção hidráulica escolhidos para a simulação. Nenhuma de suas vazões ocasionou problemas de tensão superficial, e conseqüente mau funcionamento dos vertedores do modelo.

#### 4.8 Parâmetros medidos no modelo

##### 4.8.1 Massa específica ou condutividade

Com a opção pela utilização de solução salina para a estratificação do escoamento no modelo, foram realizados teste preliminares e os resultados foram muito satisfatórios. Após a introdução da solução salina no modelo o escoamento mudava por completo, ocorrendo inclusive, a formação de uma espécie de “banco salino” como pode ser visto na figura (4.1). Outro fator que motivou a utilização de solução salina na simulação foi a amplitude de variação de massa específica adequada e mensurável obtida com a introdução do sal.

Porém para medir a massa específica resultante da introdução do sal não havia nenhum instrumento disponível. Para tanto foram desenvolvidas sondas (Figura 4.11) que medem a condutividade de uma solução e relacionou-se esta condutividade a uma massa específica resultante da introdução de sal na água limpa.

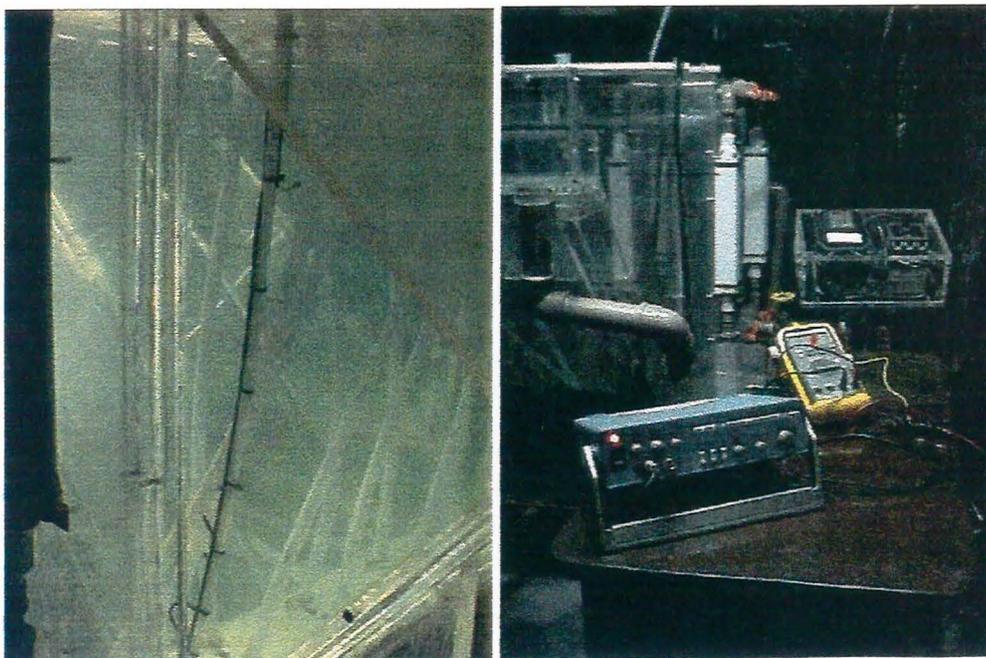
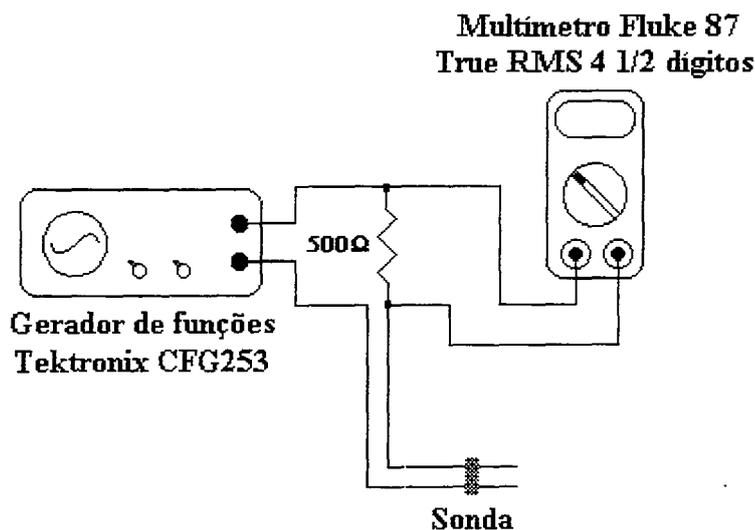


Figura 4.11 – Sondas de condutividade e instrumentação de controle

As sondas consistem em um circuito simples, composto por dois terminais banhados a ouro que são introduzidas na solução, um gerador de tensão que gera uma extensa faixa controlável de tensões e formas de ondas e aplica uma tensão alternada conhecida e controlada de 1V pico a pico sobre uma resistência conhecida de 500 ohms. Após diversas tentativas foi escolhida a forma senoidal com frequência de 1kHz. O valor médio desta senóide (componente de corrente contínua) foi precisamente zerado (menos de 5mV), para evitar a formação de bolhas de gás na superfície dos eletrodos por eletrólise, o que alteraria a condutividade entre estes. Um multímetro lia a queda de tensão na resistência e uma chave seletora permitia que as sondas fossem operadas uma a uma para evitar efeitos cruzados.

Para fechar o circuito, a corrente passa entre as pontas de ouro utilizando o meio como condutor e quanto maior a salinidade do meio maior é a sua condutividade. Logo é feita uma correlação entre a leitura do multímetro e a massa específica da solução de acordo com curvas de aferição geradas anteriormente.

Salienta-se que na aferição deve-se observar a repetibilidade das leituras e uma possível oxidação dos eletrodos em falhas da cobertura de ouro, pois este tipo de problema pode gerar erros nos resultados. Caso ocorram, deve-se substituir as pontas por outras com cobertura de ouro mais espessa, que evite o mascaramento das leituras. A figura (4.12) apresenta um esquema do circuito utilizado.



*Figura 4.12 - Esquema do circuito utilizado nas sondas condutivimétricas*

Para a aferição das sondas procedia-se da seguinte forma: adicionava-se uma pequena quantidade de sal à água limpa em uma proveta de volume conhecido de 500ml, homogeneizava-se por completo a solução, verificava-se a massa específica resultante com um densímetro flutuador e introduzia-se ponta por ponta na solução anotando-se para cada uma a leitura de multímetro. Procedeu-se desta forma, por 4 diferentes vezes durante as simulações e utilizando-se 15 pontos numa faixa de massas específicas entre 998 e 1030 kg/m<sup>3</sup>.

As sondas devem ser aferidas uma a uma, pois apresentam leituras diferentes para um mesmo valor de massa específica da solução. Isto ocorre devido a pequenas diferenças existentes nas medidas das sondas, como por exemplo a distância entre os seus pólos.

Os valores da resistência e da voltagem utilizadas, foram os que obtiveram a melhor sensibilidade e as menores oscilações de leitura para o sistema criado. Isto não significa, que para outros sistemas semelhantes, não possam haver valores e formas de ondas satisfatórios.

Aconselha-se verificar a curva de calibração e possíveis oxidações das pontas após períodos sucessivos de ensaios.

#### **4.8.2 Vazão**

No modelo as vazões utilizadas foram determinadas a partir da redução de escalas efetuada e medidas com rotâmetros com precisão de 0,005 l/s as quais foram conferidas através de técnicas de pesagem duas vezes durante os ensaios.

É importante ressaltar que os rotâmetros trabalham bem para a temperatura a qual foram aferidos e confeccionados e na tentativa de simulação com água quente, estes apresentaram comportamento anômalo.

#### **4.8.3 Campos de velocidade**

Inicialmente, pretendia-se medir campos de velocidades nas diferentes situações testadas no modelo. Para tanto, foram testados diferentes traçadores sólidos que possuíssem densidade o mais próximo possível da densidade da água e o de melhor desempenho foi o do estireno-butadieno com diâmetro de 0,30mm.

Para a sua iluminação utilizou-se a técnica do plano de luz o qual obtinha-se a partir de um refletor de jardim de 1kW associado a uma máscara de alumínio com uma fenda de

1,0mm por onde abria-se o plano de luz. Para escurecer-se o entorno do modelo construiu-se uma barraca com lona preta a qual não permitia a passagem de outra luz indesejada.

Porém como a velocidade do escoamento é muito baixa qualquer outro efeito como a velocidade de queda ou a flutuação das partículas utilizadas e de outras partículas produziam velocidades irrealistas. Outro problema enfrentado foi a falta de luminosidade para a filmagem dos ensaios, isto é a potência de 1kW não era completamente aproveitada, pois a fenda utilizada para a abertura do plano era fina o suficiente para produzir um plano de luz não muito espesso, mas originava muita perda de intensidade luminosa.

Outra dificuldade para a determinação de campos de velocidade no modelo é a total tridimensionalidade do escoamento, que faz com que as partículas não se desloquem, em sua maioria, apenas em um plano e sim em diversas direções ou entrando e saindo do plano.

Logo, foram realizados dois tipos distintos de ensaios utilizando-se corante branco à base de tinta PVA e procedendo-se conforme descrito no sub-ítem (4.7.2).

#### **4.9 Análise de erros**

Tratando-se de um estudo experimental em modelo reduzido operado e controlado por dispositivos e instrumentos mecânicos e eletrônicos, podem ocorrer diversos tipos de erros em cada procedimento de ensaio.

As principais fontes de erros apontadas nos procedimentos de ensaio, na instrumentação aplicada e na extração dos resultados foram os seguintes:

- coleta e determinação dos valores das propriedades do lodo;
- controle da vazão de entrada pelos rotâmetros e inversor de frequências;
- variação nas características de traçador de fluxo utilizado, desde a sua coloração até a sua massa específica;
- variação na massa específica do fundo do reator, desde a sua homogênea distribuição, até a seu exato valor medido pelas sondas que além de, por si só, serem possíveis fontes de erro, tinham seus valores anotados manualmente, adicionando a possibilidade de erro do anotador no instante exato do ensaio;
- variação nas condições de filmagem, como a distância e inclinação da câmera ao orifício objeto da filmagem, onde apesar de utilizar-se um medida calibrada para se fazer a verificação, na digitalização e calibração existe um limite de precisão dada pela resolução das imagens capturadas e pelo tamanho da menor unidade de medida no computador (pixel);

- na identificação visual e traçado das imagens.

Além destes erros apontados como principais, outras condições ambientais também podem vir a ser fontes de erros embutidos nos procedimentos. Como dito anteriormente, apesar de não serem quantificados, foram considerados procedimentos para minimizar os efeitos destas possíveis fontes de erros, sendo que quando estes surgissem com maior magnitude, foi possível constata-los na análise dos resultados e, então excluir este dado gerado das análises finais.

## 5. ENSAIOS

### 5.1 Descrição dos ensaios

Foram realizados diversos ensaios preliminares para determinação das quantidades de sal a serem usadas para alcançar-se os gradientes de massa específica estipulados pelas faixas de operação do modelo, para localização ideal das fontes de iluminação e para conhecer-se e familiarizar-se com o modelo. Todos estes ensaios estão gravados em fitas VHS de posse do setor de Hidráulica Aplicada do IPH, porém a maioria deles não serviu para análises quantitativas e qualitativas do escoamento. Realizou-se também, ensaios sem estratificação com o objetivo de mostrar a diferença entre o escoamento com o meio estratificado e o não-estratificado, chamado de “tipo 0”.

Dentre os diversos ensaios realizados destacam-se duas formas diferentes de observação da estratificação a partir da injeção de solução salina: um, chamado de “tipo A”, com toda a zona salinizada colorida com corante a base de tinta PVA ( ver Gimenez, 2000), com uma interface bem definida e observando-se as instabilidades e as ondas internas que ocorrem neste tipo de escoamento e outro, chamado de “tipo B”, acompanhando-se o caminho percorrido pelo corante desde sua injeção até seu completo desenvolvimento.

Neste último foram testados diferentes jatos, inclusive com modificação do sistema de distribuição para jatos incidindo sobre as paredes inclinadas do modelo, com o objetivo de averiguar-se a possibilidade deste tipo de distribuição afetar a estabilidade da estratificação existente até então.

Os jatos, assim como, a forma geral do sistema de distribuição utilizado para cada ensaio, são detalhados nas figuras 5.1 e 5.2:

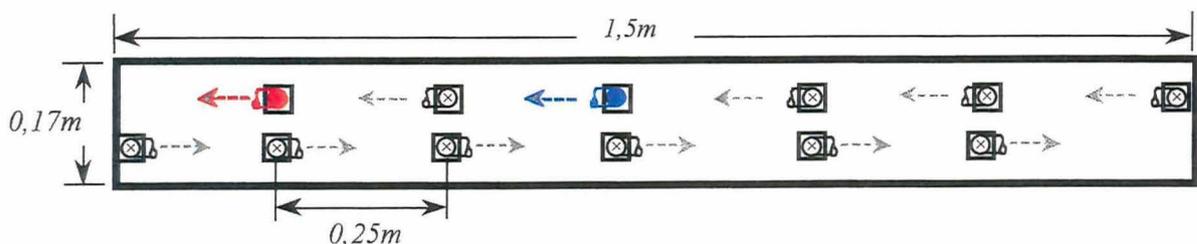


Figura 5.1 – Sistema de distribuição n°1

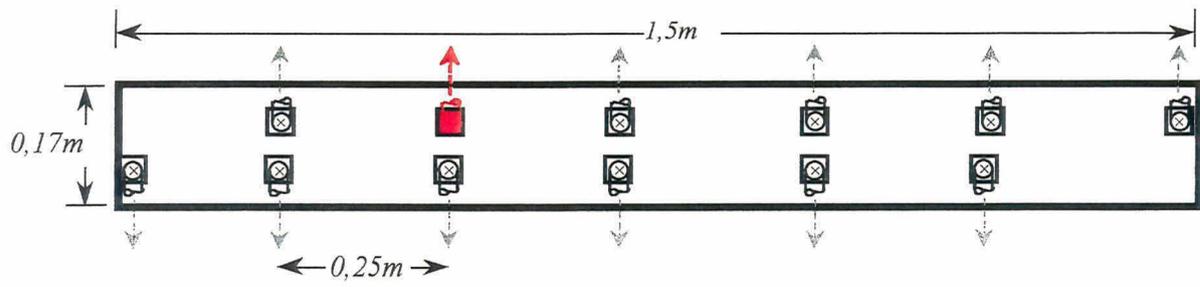


Figura 5.2 – Sistema de distribuição n° 2

A seguir é apresentada a tabela 5.1 com os ensaios realizados e suas características:

<b>Ensaio</b>	<b>Faixa de operação</b>	<b>Tipo</b>	$\Delta\rho$ ( $kg/m^3$ )	$Q$ ( $l/s$ )	<b>Sistema de distribuição</b>	<b>Jato</b>
E1	1	A	5	0,05	1	-
E2	1	A	5	0,11	1	-
E3	2	A	10	0,05	1	-
E4	2	A	10	0,08	1	-
E5	2	A	10	0,15	1	-
E6	2	B	10	0,05	1	Azul
E7	2	B	10	0,08	1	Azul
E8	2	B	10	0,15	1	Azul
E9	2	B	10	0,05	1	Vermelho
E10	2	B	10	0,08	1	Vermelho
E11	2	B	10	0,15	1	Vermelho
E12	2	B	10	0,05	2	Vermelho
E13	2	B	10	0,08	2	Vermelho
E14	2	B	10	0,15	2	Vermelho
E15	2	A	10	0,15	2	-
E16	-	0	-	0,05	1	Vermelho
E17	-	0	-	0,08	1	Vermelho
E18	-	0	-	0,11	1	Vermelho
E19	-	0	-	0,15	1	Vermelho

*Tabela 5.1 – Resumo das características dos ensaios*

Todos os ensaios foram filmados para posterior análise das características de escoamento.

Esta captura se deu por meio de duas câmeras filmadoras do tipo VHS colocadas em pontos fixos a fim de garantir a repetibilidade dos parâmetros de filmagens. Uma das câmeras foi colocada à frente do modelo e à outra ortogonal a primeira, na lateral do modelo. Com esta disposição objetivou-se acompanhar a tridimensionalidade do escoamento.

Utilizaram-se câmeras *Panasonic Omni Movie Color*, com fitas VHS T-120 coloridas no formato padrão NTSC (*National Television Standards Commission*). Optou-se pelo foco manual, pois na opção de foco automático verificaram-se problemas de fixação do foco devido à dificuldade dos sensores em identificarem a real distância entre a câmera e o ponto, que se desejava capturar dentro da massa líquida, variando constantemente o foco a este ponto. Dentre as velocidades de obturação possíveis – automático, 1/500 e 1/1000 – utilizou-se a segunda, pois na primeira, verificaram-se problemas de variação das intensidades de cor apresentadas pelas imagens capturadas e, para a última, a intensidade de luz requerida para a filmagem era muito alta.

Foi criado também, um ambiente de iluminação adequado às filmagens, constituído por uma tenda preta que isolava a área de ensaio de qualquer fonte de luz causadora de reflexos indesejáveis nas filmagens e uma fonte luminosa composta por 4 lâmpadas halógenas de 1000 Watts cada dispostas acima do modelo, a fim de não ofuscarem as filmagens laterais e frontais.

Com isto, obtiveram-se duas filmagens de cada ensaio denominadas de “F” para as frontais e “L” para as laterais.

Durante as filmagens dos ensaios foram anotados os valores instantâneos lidos nas sondas de condutividade, os quais foram posteriormente transformados para valores de massa específica, de acordo com a curva de calibração de cada sonda.

## **5.2 Aquisição e tratamento dos dados**

Como descrito no item 5.1, os ensaios foram gravados em fitas VHS e, logo após, transferidos para um microcomputador onde foram realizadas análises quantitativas e qualitativas do escoamento. Os resultados das medições de massa específica efetuados pelas sondas de condutividade, foram graficados com auxílio do *software Microsoft Excel 97* e são apresentados posteriormente no capítulo de resultados.

O objetivo da transferência das imagens VHS para um meio computacional adequado é transformar os dados analógicos armazenados em vídeo em dados digitais, a fim de

procederem-se as análises desejadas. Esta transferência se deu através de uma placa de captura de vídeo, *Wave Watcher TV-PCI*, e do programa que a acompanha, *Video Capture* da *Ulead-Media Studios*. Os arquivos gerados foram do tipo vídeo digitalizado AVI (*Audio Video Interleave*), que armazena diversos quadros em sequência ordenada, permitindo a extração de quaisquer quadros desejados e em diversos formatos possíveis como JPEG e TIFF, utilizados neste trabalho.

O conjunto computacional (*hardware e software*) utilizado neste processo era composto por um microcomputador com processador AMD-K6II, 128Mb de memória RAM, disco rígido de 6,4Gb, adaptador de vídeo AGP-Pro com 8Mb e sistema operacional Windows 98. As características do conjunto permitiram a captura das imagens sem perda de dados, até uma taxa de transferência de 25 quadros por segundo.

Para o tratamento e análise dos arquivos em formato de imagem, utilizou-se o programa *UTHSCA Image Tool*, desenvolvido no *Health Science Center* da Universidade do Texas em San Antonio, EUA, obtido gratuitamente através do *site* <http://macorb.uthsca.edu/dig/itdesc.html>.

A escolha dos quadros apropriados para as análises deve ser feita de acordo com uma frequência em que se consiga observar os fenômenos desejados. Nos ensaios “tipo 0” determinou-se que o quadro ou instante inicial corresponderia ao quadro imediatamente anterior àquele em que se observava o primeiro vestígio de traçador e após este seriam tomados quadros de 200 em 200 imagens ou de 8 em 8 segundos, a fim de montarem-se sequências de 10 quadros que possibilitassem a visualização do padrão de escoamento em questão.

A partir dos arquivos de imagem dos quadros selecionados para cada ensaio utilizou-se o programa *Image Tool* para manipular estas imagens de forma a dispô-las de forma adequada à sua análise. As 10 imagens foram armazenadas em pilhas (“*stack*”), isto é, arquivos que permitem o armazenamento de imagens em sequência e logo após processadas (*processing-stack-montage*) de forma a montar as sequências finais. Apresenta-se no capítulo de resultados as sequências referentes aos ensaios E16 e E19.

Para os ensaios do tipo A desejava-se observar as oscilações que ocorrem em escoamentos estratificados, isto é, as ondas internas que ocorrem entre camadas de massa específica diferente. Para tanto observava-se quadro por quadro procurando-se sempre picos e cavas de ondas, a fim de identificarem-se comprimentos de onda característicos e suas frequências, porém a intensidade destas oscilações não foi passível de medidas quantitativas

com as técnicas utilizadas tanto nos ensaios, quanto no tratamento destes, conseguindo-se apenas montar sequências mostrando que elas existem.

Para cada ensaio foram geradas duas sequências: uma da filmagem frontal (F), com 10 imagens ou quadros e outra da lateral (L) com oito imagens ou quadros. O critério de seleção do número de quadros para montagem das sequências baseou-se na qualidade e possibilidade de visualização dos fenômenos em questão e não obedeceu algum rigorismo de frequências de aquisição, isto é, montou-se sequências com os melhores quadros obtidos.

A filmagem frontal e lateral simultânea objetivava mostrar a ocorrência de ondas internas ao escoamento em questão de forma tridimensional, isto é, em mais de uma direção.

Com os arquivos de imagem dos quadros selecionados para cada uma das filmagens de cada ensaio e utilizando o programa *Image Tool* foram criadas pilhas. Cada pilha foi transformada para escala de cinza (*color to gray-scale*), pois nestes casos as informações de cores adquiridas com as imagens não se faziam necessárias para o tratamento e, além disto, imagens em escala de cinza são de menor tamanho, facilitando o tratamento. Após esta transformação foi aplicado um filtro detetor de contornos (*edge detect*) com objetivo de realçar a estratificação e mostrar as oscilações que ocorrem neste tipo de escoamento. Para melhorar o contraste e a impressão das sequências dos ensaios inverteu-se as cores destas com a aplicação de outro filtro (*negative image*), isto é, o que era preto tornou-se branco e vice-versa. Os ensaios E3 e E5 são apresentados no capítulo de resultados.

Os ensaios do “tipo B” foram os de tratamento mais complicado e demorado. Seus objetivos eram verificar as zonas de maior turbulência e instabilidade no escoamento. Para tanto, não houve preocupação no tratamento e apresentação, com detalhes na determinação dos quadros iniciais a serem capturados, mas sim com a apresentação de quadros que contemplassem a visualização do escoamento entre camadas de massa específica diferentes. Foram tomados quadros ou instantes de 200 em 200 imagens ou de 8 em 8 segundos a partir de um momento em que o corante já estivesse escoando pelo modelo. As sequências foram tratadas e montadas da mesma forma que nos ensaios tipo A.

Com o intuito de melhor visualizar a tridimensionalidade do escoamento as filmagens “F” e “L” destes ensaios foram montadas em sequências lado a lado. Esta operação de montagem foi realizada com o auxílio do *software* de tratamento de imagens *Adobe Photoshop*. Além da montagem lado a lado, foi realizada com o auxílio deste *software* um refinamento das imagens com a retirada de reflexos indesejáveis, os quais atrapalhavam a identificação da evolução do corante utilizado. Apresenta-se no capítulo de resultados, as sequências dos ensaios E6, E8, E12 e E14.

Todos os demais ensaios encontram-se armazenados tanto em formato VHS, como em formato digital, junto ao Pavilhão Fluvial / IPH com o professor Rogério Maestri.

O *software Image Tool* permite também, a extração de dados como comprimentos e áreas mediante prévia calibração do *software* com uma escala de comprimento conhecido na imagem. Algumas verificações foram feitas a partir desta metodologia, porém tanto o fenômeno observado, quanto a filmagem efetuada, são tridimensionais, e a extração de quaisquer resultados quantitativos a partir de imagens planas obtidas, podem levar a erros da ordem da faixa de variação observada.

## **6. RESULTADOS**

São apresentados e discutidos neste capítulo os resultados obtidos a partir da análise de algumas propriedades físicas do fluido (lodo) que ocorre no protótipo, assim como, o produto gerado pelos ensaios executados em modelo reduzido e tratados conforme o capítulo anterior.

### **6.1 Resultados das medições no protótipo**

Como descrito na metodologia deste trabalho, a análise de propriedades físicas do lodo no protótipo foi inviabilizada pela dificuldade de trabalhar-se com os equipamentos adequados em campo. Logo, transportaram-se amostras deste lodo até os laboratórios do IPH, onde foram devidamente analisadas. Os resultados destas análise são apresentados a seguir.

É importante salientar que ocorreram diversos problemas de operação na estação os quais poderiam afetar os resultados obtidos e, também, que o curto período de coleta e análise de amostras não produz resultados estatisticamente muito confiáveis. Porém ao comparar-se os valores de sólidos medidos com os apresentados na bibliografia especializada, notou-se que eram muito parecidos e, como não encontra-se nenhuma informação sobre as demais propriedades físicas deste tipo de lodo, decidiu-se adotar os resultados para a simulação.

### 6.1.1 Massa específica (densidade)

Os resultados obtidos para esta propriedade foram alcançados utilizando-se a técnica direta de medição, isto é, pesagem de amostras com auxílio de picnômetros. A seguir é apresentado um gráfico resumo com os resultados de algumas medições, relacionados às vazões afluentes dos respectivos dias.

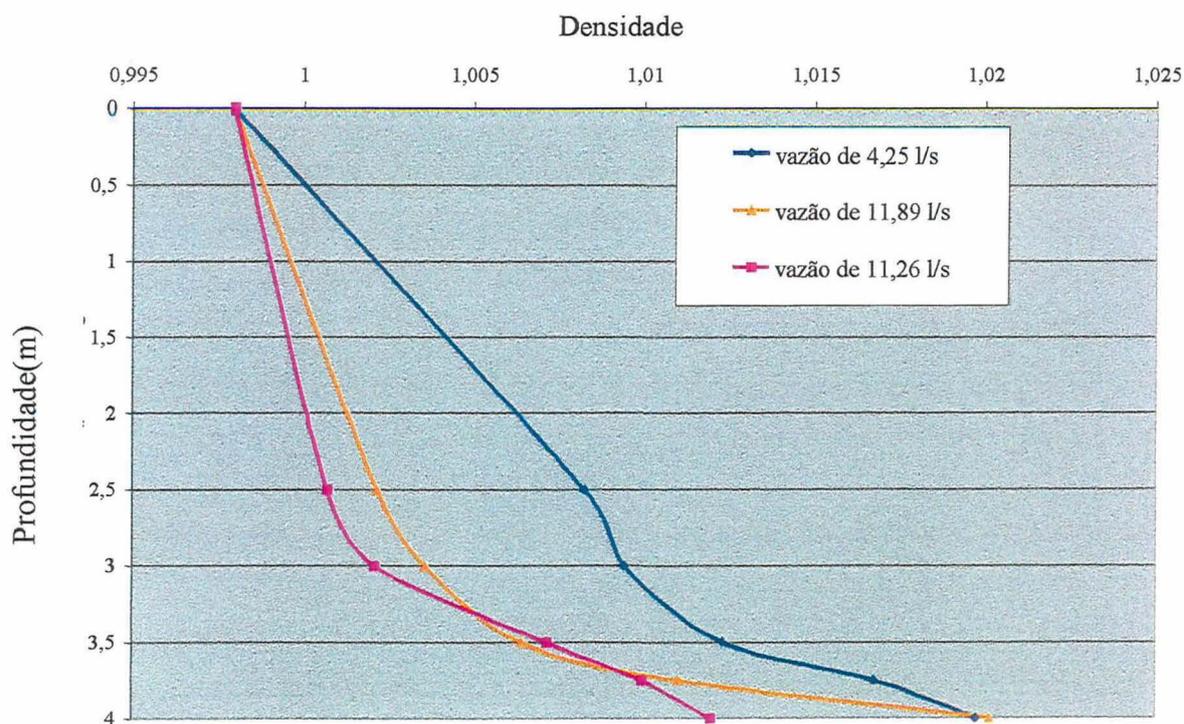


Figura 6.1 – Gráfico resumo dos perfis de densidades e/ou massa específica

Nota-se que os valores possuem uma certa variação, mas a tendência dos perfis de estratificação obtidos são coerentes em vista da variabilidade existente neste tipo de medição e da sedimentação do lodo. Como simplificação para os cálculos de escalas e, também, para as simulações, a faixa de variação de densidade a ser utilizado é de 1,017, ou em porcentagem 1,7 %.

### 6.1.2 Viscosidade

A figura 6.2 representa a variação do valor da viscosidade do lodo com a tensão aplicada

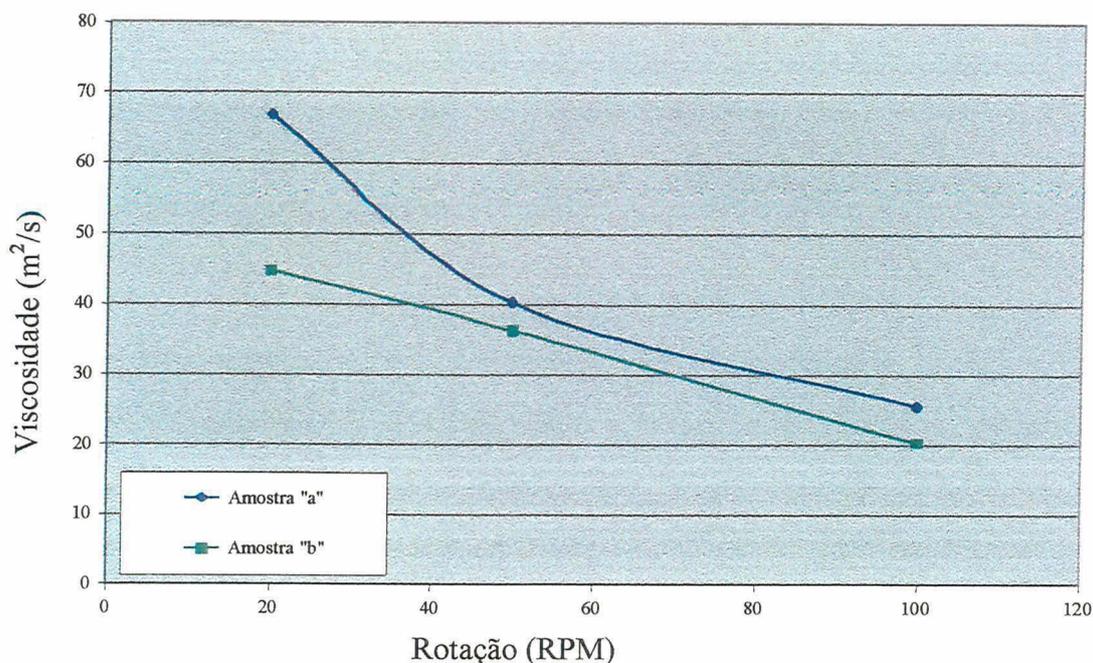


Figura 6.2 – Variabilidade da viscosidade do lodo no protótipo com a tensão aplicada

Observando o gráfico, nota-se que ao aplicarem-se diferentes tensões nas duas amostras de lodo, sua viscosidade variou consideravelmente, diminuindo com o aumento da tensão aplicada. Neste caso, o fluido em questão é não newtoniano e classificado como pseudo-plástico, isto é, que apresenta comportamento variável e de difícil previsão para diferentes tensões. Verifica-se também, que sua viscosidade média para as tensões aplicadas é da ordem de 40 vezes a viscosidade da água.

### 6.1.3 Tensão superficial

Estas análises confirmaram o menor valor da tensão superficial do lodo em relação ao da água limpa à mesma temperatura e constatou-se que esta diferença é, em média, da ordem 50% em todo o banco de lodos.

Como a ordem de grandeza desta diferença é bastante significativa, a simulação de bolhas de gás sem levar em consideração o efeito da tensão superficial sobre o escoamento

destas bolhas é, provavelmente, inadequada, se o fluido utilizado para a simulação for água limpa.

#### 6.1.4 Sólidos Totais

Felizmente, os resultados obtidos pelas análises de amostras de lodo da estação em questão refletem muito bem as indicações da bibliografia e situam-se na faixa entre 4500 e 6000 mg/l como pode ser observado em um gráfico resumo destes resultados.

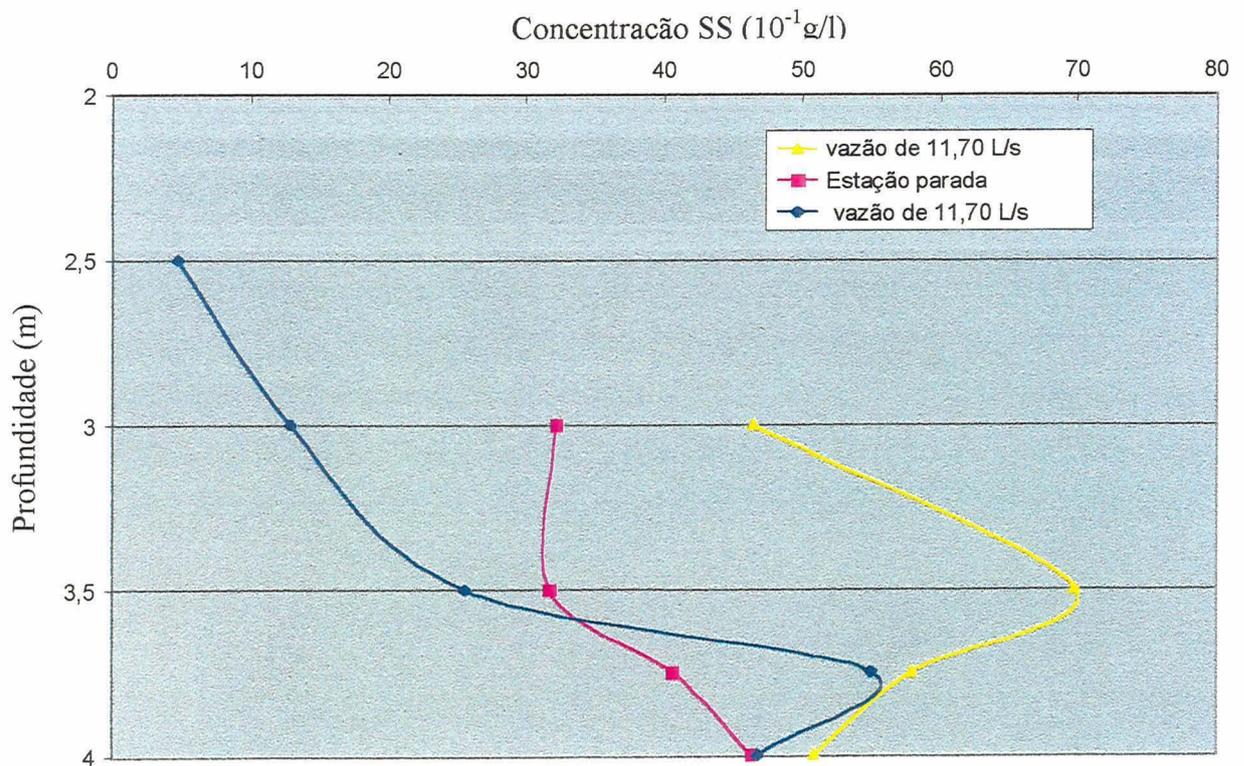


Figura 6.3 – Perfis de concentração de sólidos

Nota-se também, que a concentração junto ao fundo, nas amostras retiradas em dias em que a estação estava operando, isto é, com vazão afluyente, decresce na faixa de profundidade compreendida entre 3,50 e 3,75 metros. Estes resultados refletem o esperado, pois a zona abaixo da faixa de profundidade referida, compreende a zona de campo próximo, a qual está, quando operacional, sob efeito da inércia dos jatos e tende a apresentar, como verificado, uma menor concentração de sólidos.

Confirma-se esta afirmação analisando-se o perfil referente ao dia em que a estação estava parada, sem a influência da inércia e poder de mistura dos jatos. Nesta situação, o perfil de concentração cresce, ininterruptamente, em direção ao fundo.

Esta verificação levou a confiar-se nos resultados das análises das outras propriedades, pois ao menos para a concentração, o lodo analisado apresentava normalidade em relação à média de outras estações de tratamento e, inclusive a parâmetros de projeto largamente utilizados nestes casos.

### 6.1.5 Temperatura

O gráfico abaixo apresenta um monitoramento contínuo de um dia de inverno, contendo a temperatura de entrada do afluente, do meio do reator e da saída.

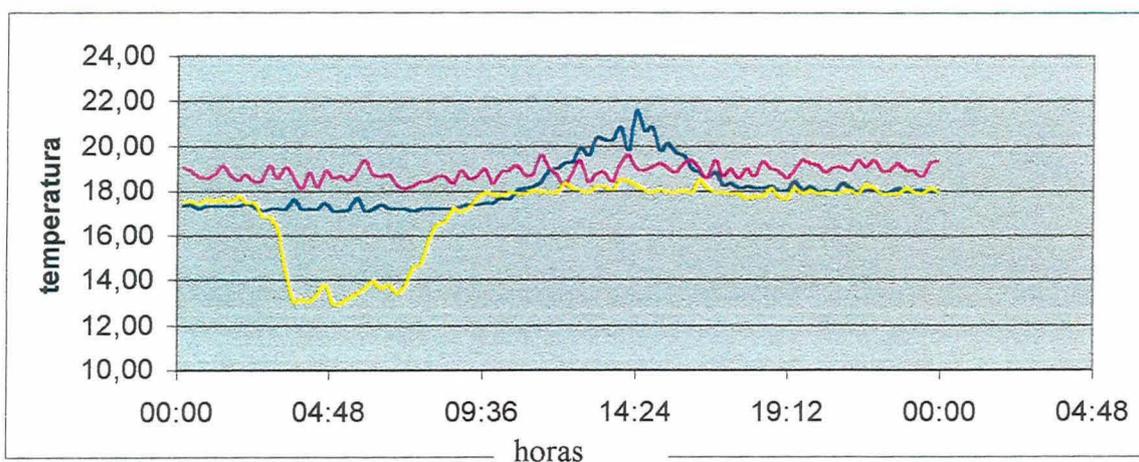


Figura 6.4 – Temperaturas: entrada (---); meio (---); saída (---)

Observa-se que durante a madrugada a temperatura do afluente cai bruscamente, ocasionando uma perturbação na temperatura interna do reator, caracterizando um possível momento de instabilidade. Porém houve diversos problemas com o equipamento de controle que não permitiram um acompanhamento preciso da evolução desta perturbação por um período mais significativo. Outro ponto desfavorável à sua análise foi a inviabilidade de coletar-se lodo do reator nos momentos em que ocorriam estas perturbações, a fim de verificar a forma como esta influenciava a variação de propriedades importantes do fluido (lodo).

Desta forma, desconsiderou-se a influência da variação de temperatura na variação de outras propriedades importantes para a simulação. Mas salienta-se que o monitoramento contínuo da temperatura associado a uma campanha intensa de coleta e análise do lodo, favoreceriam em muito o entendimento da dinâmica do processo e a precisão de simulações futuras.

## 6.2 Resultados dos ensaios no modelo reduzido

### 6.2.1 Perfis de massa específica gerados nos ensaios

Apresenta-se nesta etapa os perfis de massa específica gerados nos ensaios, relativos às seqüências representativas do desenvolvimento do escoamento apresentadas no item 6.2.2.

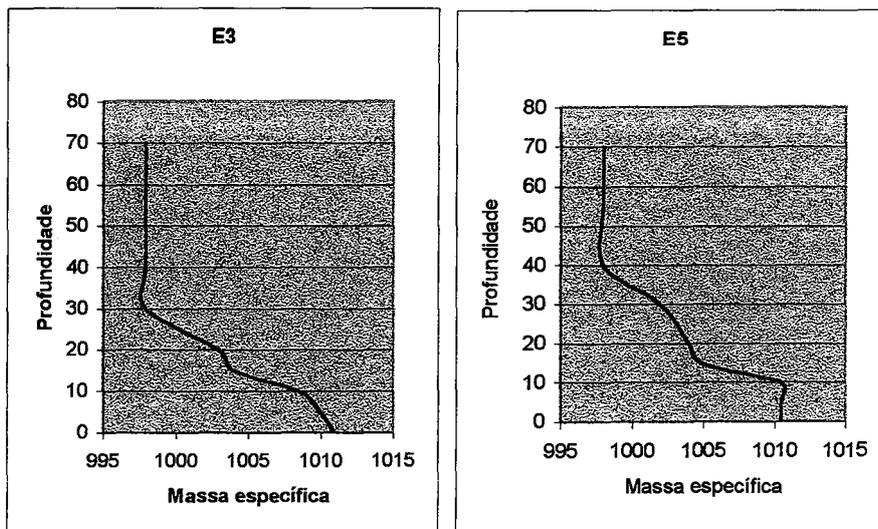


Figura 6.5 – Perfis de massa específica gerados nos ensaios E3 e E5

Profundidade em (m) e massa específica ( $\text{kg/m}^3$ )

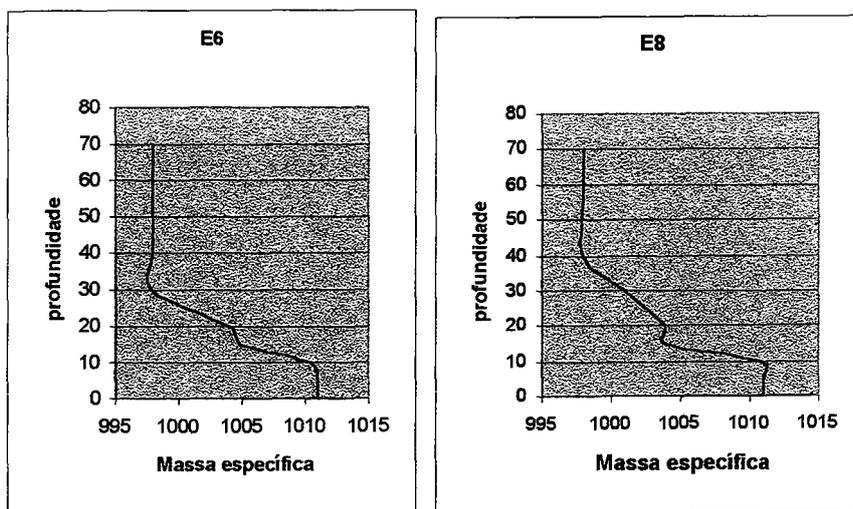


Figura 6.6 – Perfis de massa específica gerados nos ensaios E6 e E8

Profundidade em (m) e massa específica ( $\text{kg/m}^3$ )

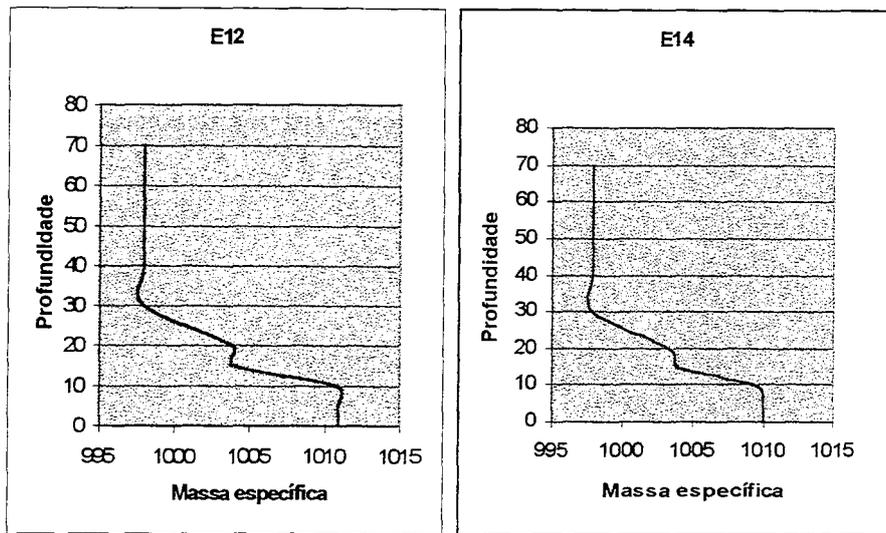


Figura 6.7 – Perfis de massa específica gerados nos ensaios E12 e E14

*Profundidade em “m” e massa específica (kg/m<sup>3</sup>)*

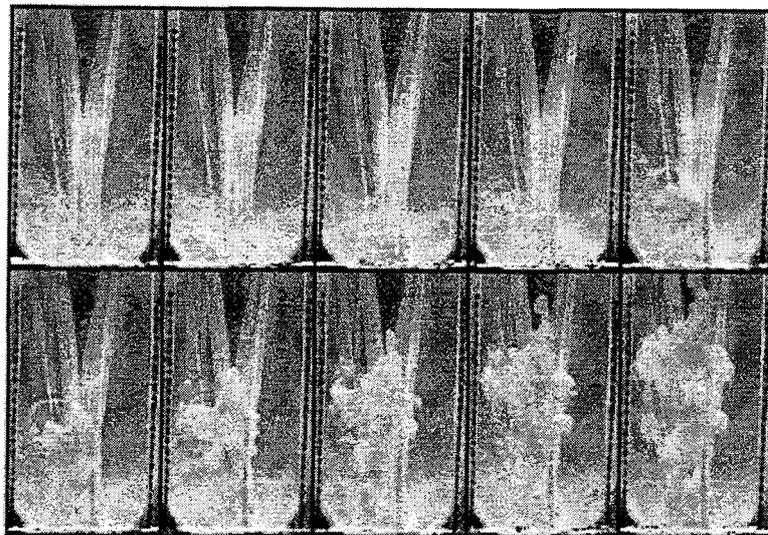
Como nota-se nas figuras (6.5), (6.6) e (6.7) os perfis de massa específica gerados nos ensaios possuem boa repetibilidade entre um e outro ensaio e aproximam-se muito dos perfis observados no protótipo, representados pela figura (6.1), mostrando que a simulação parcial efetuada no modelo reduzido obteve resultados satisfatórios.

## 6.2.2 Sequências dos ensaios

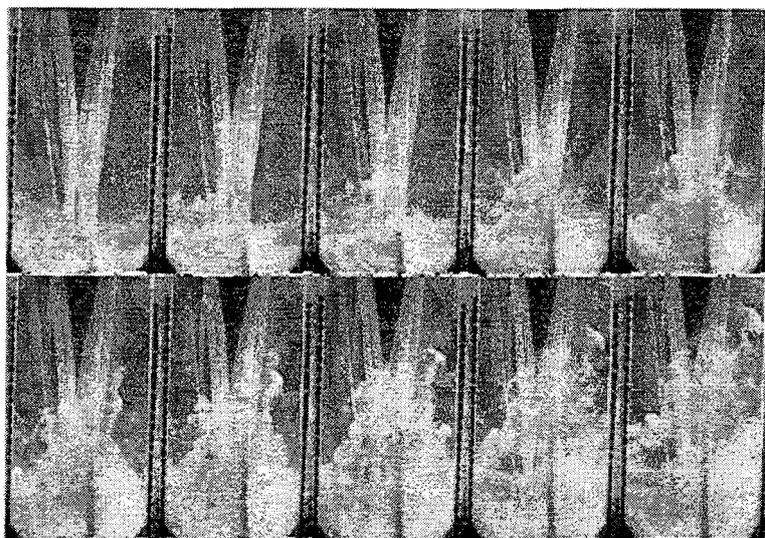
Procedeu-se de três formas distintas à análise dos resultados obtidos nos ensaios executados no modelo físico reduzido em questão, a partir do tratamento descrito no capítulo anterior:

- A primeira consiste na comparação entre ensaios de mesma vazão dos tipos “0” e “B”, com objetivo de mostrar as diferenças nas simulações com e sem estratificação;
- A segunda compara ensaios de vazões diferentes do tipo “A”, objetivando identificar a relação entre vazão (Q) e a intensidade das oscilações e/ou ondas internas que ocorrem neste tipo de escoamento. Objetivou-se também, verificar a existência de relações entre as oscilações que ocorrem em diferentes sentidos (transversal e longitudinalmente), assim como sua fonte geradora;
- Por fim, analisa-se ensaios do tipo “B”, em diferentes jatos, em duas disposições distintas do sistema de distribuição e em diferentes vazões, a fim de verificar-se a influência destas modificações sobre a estabilidade do escoamento.

Apresenta-se então, as sequências representativas do padrão de escoamento observado nos ensaios “E16” e “E19”, respectivamente, figuras (6.8) e (6.9)



*Figura 6.8 – Sequência frontal do ensaio E16*

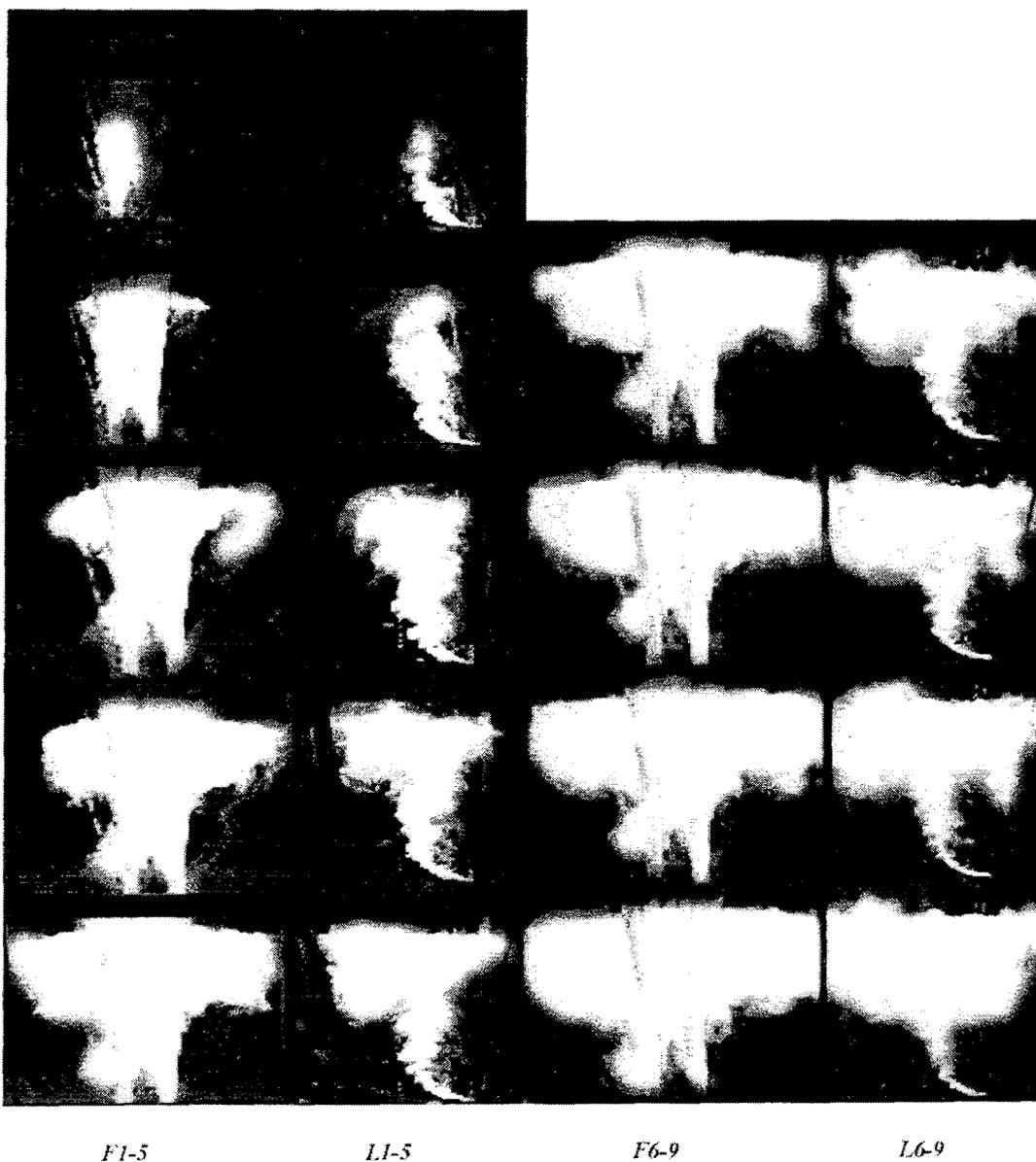


*Figura 6.9 – Sequência frontal do ensaio E19*

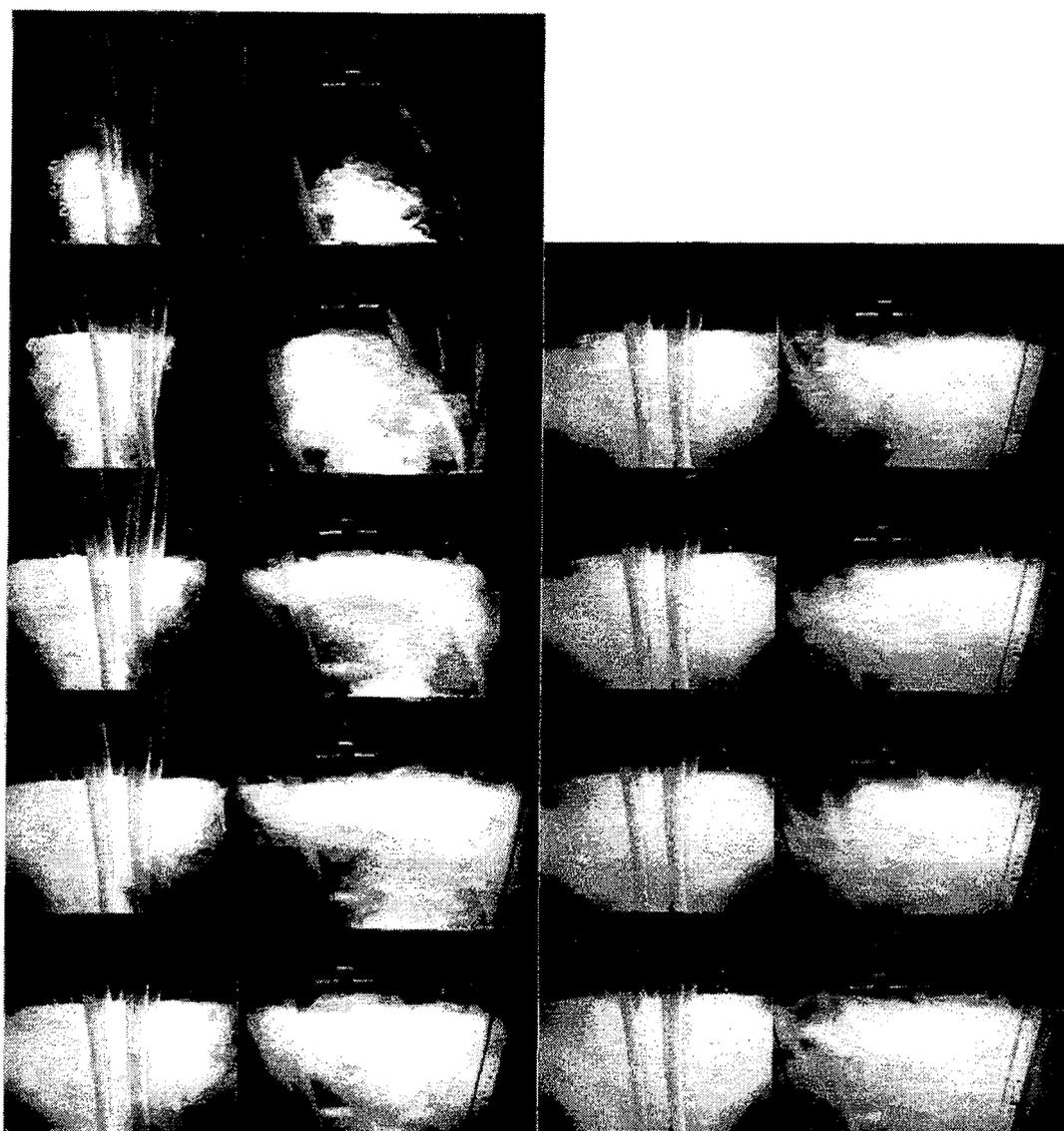
Estas sequências representam o escoamento que ocorreria no reator, caso não existisse a estratificação de massa específica descrita anteriormente. Observa-se diferença entre a concentração do corante dos dois ensaios, pois a vazão do ensaio da figura (6.8) é um terço da vazão ensaio da figura (6.9), isto é, o poder de mistura na primeira é inferior ao da última.

Nota-se que o corante vermelho introduzido, o qual representa o afluente, escoava livremente até a zona superior do reator, não permanecendo no campo próximo onde deveria misturar-se com a massa bacteriana, a fim de iniciar a digestão da matéria orgânica presente. Esta situação não ocorre no protótipo e serve apenas para demonstrar a diferença entre a simulação com e sem estratificação.

As figuras (6.10) a (6.13) apresentam resultados de alguns ensaios do tipo "B". São sequências compostas por 09 imagens frontais (F1-9) e 09 imagens laterais (L1-9) de cada um destes ensaios e representam o desenvolvimento do escoamento observado.



*Figura 6.10 – Sequência frontal e lateral do ensaio E6*



*F1-5*

*L1-5*

*F6-9*

*L6-9*

*Figura 6.11 – Sequência frontal e lateral do ensaio E8*

As figuras (6.10) e (6.11) representam o desenvolvimento do escoamento observado nos ensaios “E6” e “E8”, respectivamente. Nota-se que o escoamento, representado pelo corante branco, percorre uma trajetória ascensional até a altura na qual começa espalhar-se, no sentido transversal (F) e no longitudinal (L) do modelo.

O padrão de escoamento verificado nos dois ensaios é semelhante, em relação ao campo longínquo, e diferencia-se apenas no campo próximo pelo maior poder de mistura dos jatos, garantido por uma vazão 03 vezes maior no segundo.

Analisando também, os perfis de massa específica gerados nos ensaios (Figura 6.6), identifica-se duas interfaces entre fluídos de menor e maior massa específica: uma na altura de 10cm e outra na faixa entre 30cm e 40cm.

Examinando as figuras e medindo, com o auxílio do *software* “*Image Tool*”, a altura onde a trajetória do escoamento muda e o corante começa a espalhar-se (representado nas figuras pelo contorno superior do corante branco), encontra-se a mesma faixa de valores tanto para as alturas medidas ao longo do plano frontal (F), quanto para o Longitudinal (L).

A partir da identificação destas duas alturas e/ou regiões distintas confirma-se uma das hipóteses simplificativas do problema, a qual divide o escoamento em campo próximo e longínquo: a primeira com preponderância dos efeitos de inércia, alta turbulência e alta quantidade de movimento, e a segunda, onde a partir da mistura do afluente (menos denso) com o meio (mais denso) e da dissipação de quantidade de movimento, estes efeitos diminuem, tornando-se preponderantes então, os efeitos estabilizadores da estratificação negativa de massa específica.

Ou seja, o corante injetado, assim como o afluente de qualquer sistema de tratamento, é menos denso do que o meio circundante ou receptor (banco de lodos) e não ultrapassa seus limites (sua altura), pois no caminho ascensional vai se misturando e adquirindo a mesma densidade deste meio.



F1-5

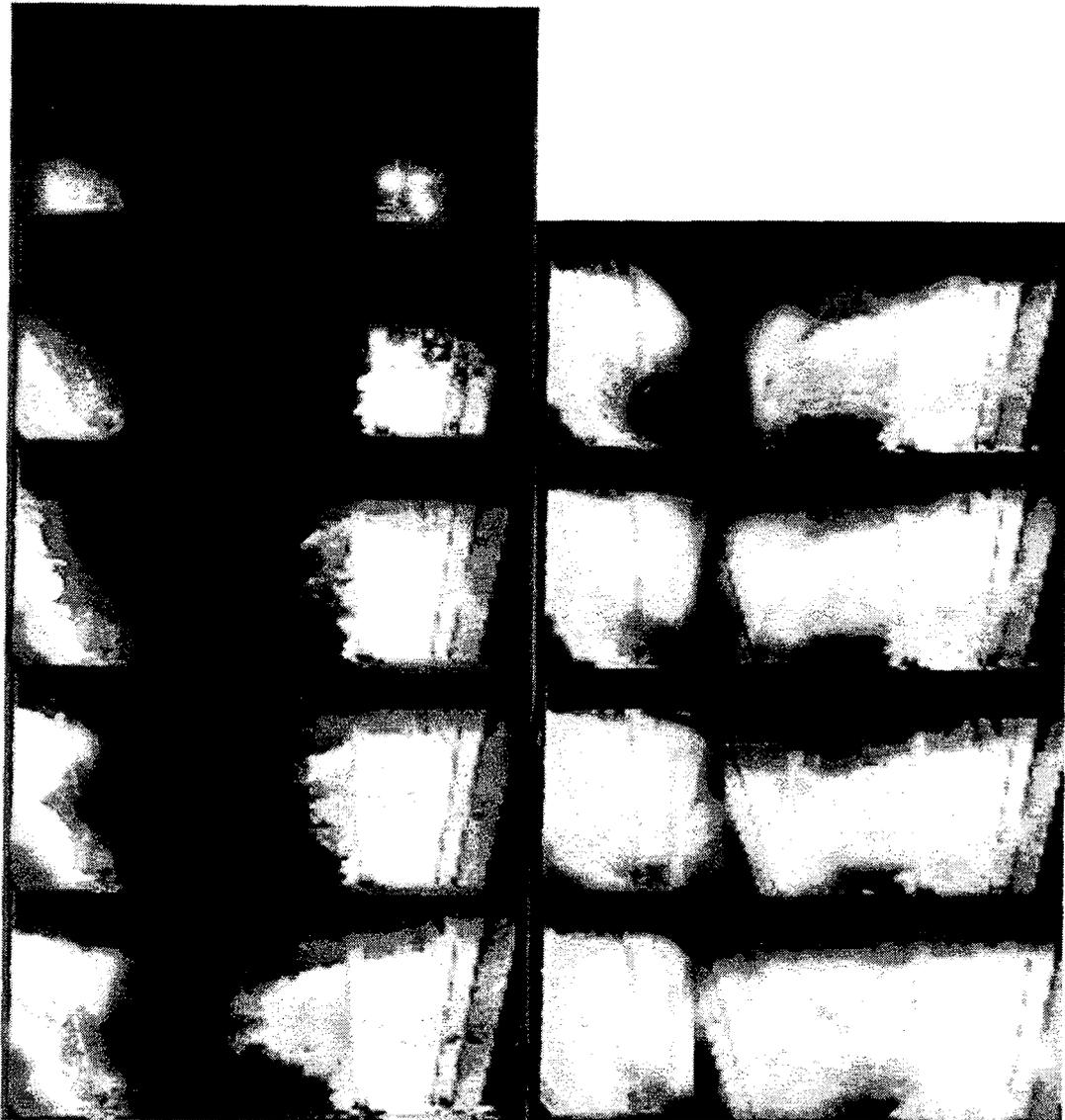
L1-5

F6-9

L6-9

*Figura 6.12 – Sequência frontal e lateral do ensaio E12*

As figuras (6.12) e (6.13) representam o desenvolvimento do escoamento observado nos ensaios “E12” e “E14”, respectivamente. A figura (6.7) apresenta os perfis de massa específica gerados nestes ensaios, os quais garantem a repetibilidade da condição de estratificação proposta. Identifica-se nestes ensaios que, mesmo uma mudança completa da disposição do sistema de distribuição do modelo (ver item 5.1 deste trabalho), não altera o padrão de estabilidade do escoamento no campo longínquo e do comportamento do campo próximo. Porém lembramos sempre das limitações de uma comparação qualitativa.



*FI-5*

*LI-5*

*F6-9*

*L6-9*

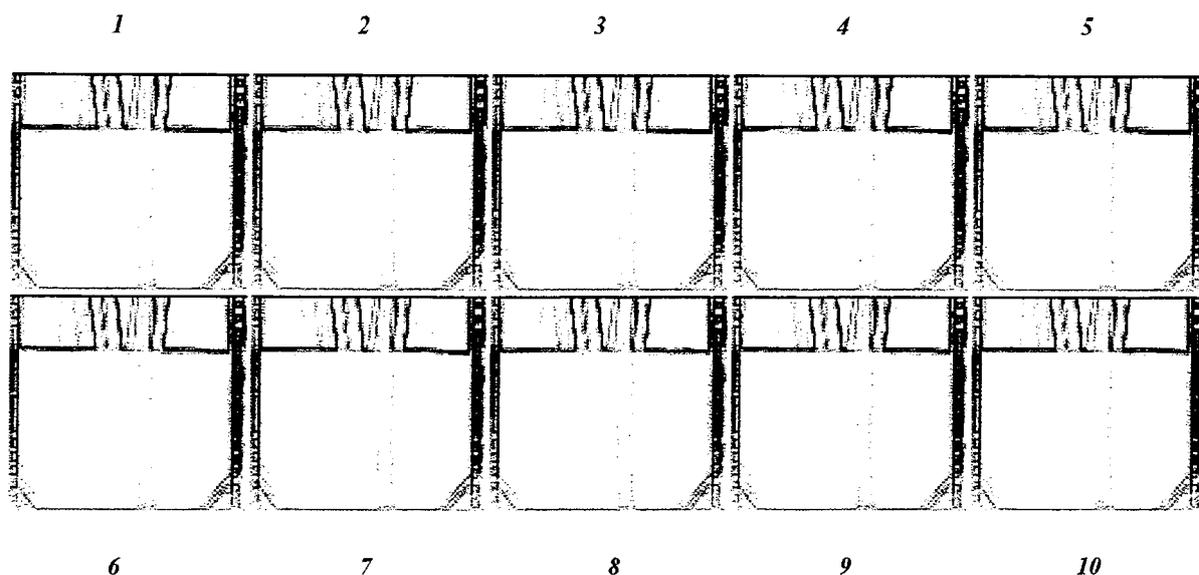
*Figura 6.13 – Sequência frontal e lateral do ensaio E14*

A partir do exposto nos parágrafos anteriores, extrai-se os seguintes resultados:

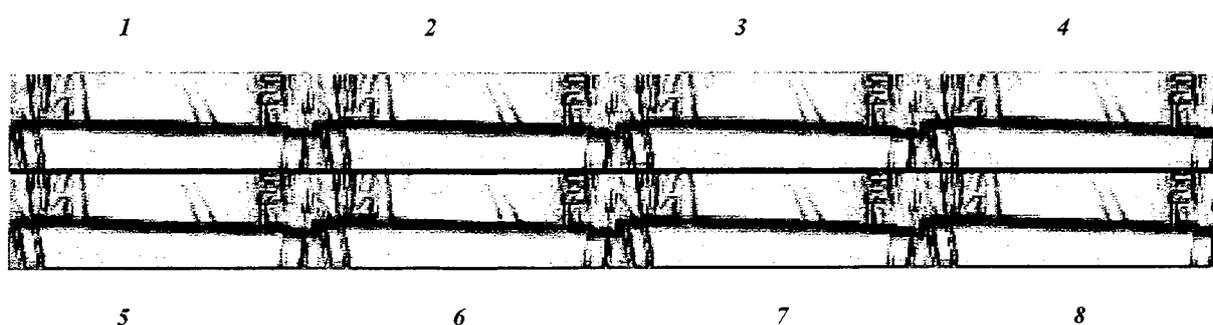
- estudo hidrodinâmico de reatores tipo DAFA, seja no seu sistema de distribuição ou em seu interior, ou de qualquer sistema (reator, digestor, ...) que retenha sólidos, anaeróbio ou não, sem levar em consideração a estratificação de massa específica do meio poderá acarretar conclusões errôneas;
- a hipótese simplificativa, que divide o escoamento deste tipo de reator em campo próximo e longínquo foi confirmada nos ensaios realizados;
- a forma e a disposição do sistema de distribuição de reatores tipo DAFA como o estudado, não influencia a estabilidade hidrodinâmica de seu campo longínquo;

- o fator preponderante a nível de projeto, deve ser a capacidade de mistura de cada jato e não a quantidade de jatos do sistema de distribuição, pois garantida a capacidade de mistura individual de cada jato o banco de lodos se encarregará, na continuidade do processo, de proceder à distribuição espacial do afluente pelo reator.

Apresentam-se a seguir seqüências representativas dos ensaios “E3” e “E5”. As figuras (6.14) e (6.15) apresentam, respectivamente, as seqüências frontal e lateral do ensaio “E3”. O ensaio “E5” é apresentado nas figuras (6.16) e (6.17).

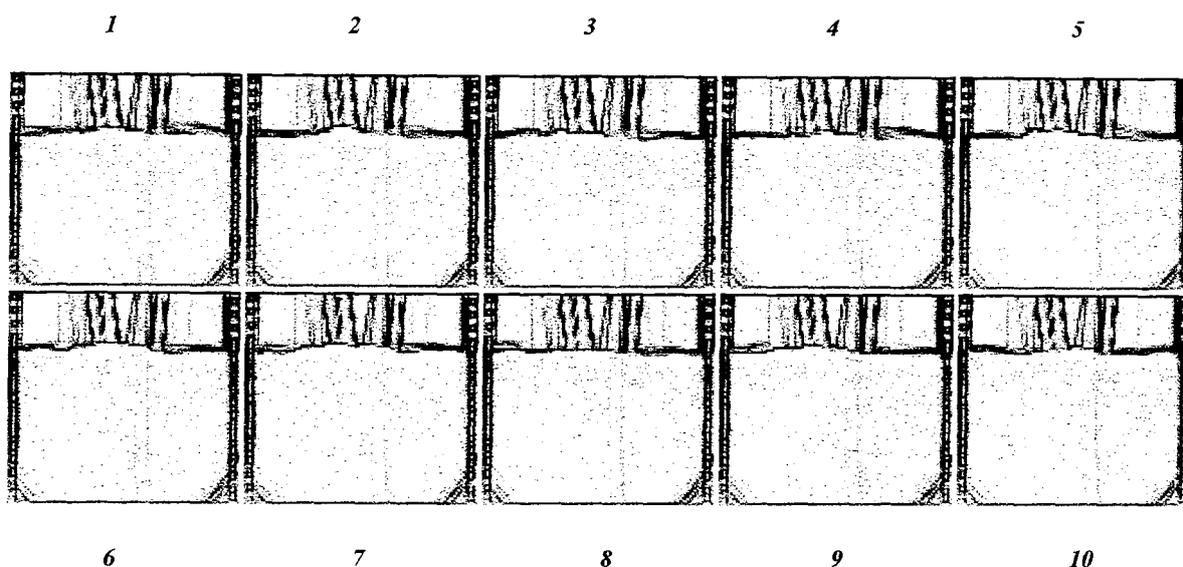


*Figura 6.14 – Sequência frontal do ensaio E3*

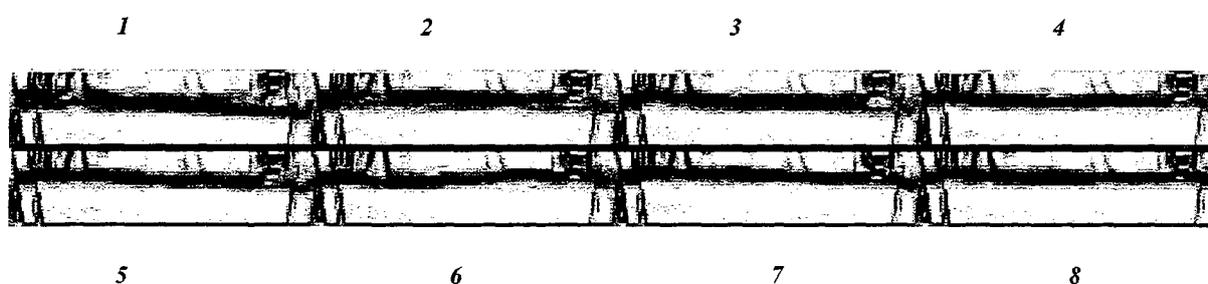


*Figura 6.15 – Sequência lateral do ensaio E3*

Observa-se a existência de uma oscilação em ambas as figuras, isto é, em direções perpendiculares. Este efeito é esperado pela tridimensionalidade do escoamento. Hipotetiza-se que sejam ondas internas, porém excitadas não apenas pelo gradiente de massa específica, mas também, pela inércia dos jatos, que ao entrarem no meio mais denso descrevem uma trajetória parabólica até atingir a interface de massas específicas.



*Figura 6.16 – Sequência frontal do ensaio E5*



*Figura 6.17 – Sequência lateral do ensaio E5*

Estas últimas duas imagens (6.16 e 6.17), representam a mesmo gradiente de massa específica, porém com uma vazão três vezes maior. Como nota-se, ocorrem as mesmas oscilações observadas nas imagens do ensaio E3, porém com mais intensidade. Este fato reforça a hipótese da influência conjunta da diferença de massa específica e da inércia dos jatos.

Seria muito importante medirem-se as características destas ondas e suas variações com a mudança dos parâmetros vazão (velocidade ascensional) e gradiente de massa específica. O estudo destas ondas pode responder questões, como por exemplo, a influência das condições de contorno sobre o escoamento, ou seja, limitar ou estabelecer dimensões ótimas para estruturas como a estudada.

Esta verificação não foi possível com a técnica de visualização utilizada, pois observando as figuras acima, nota-se um “borrão” na interface que possui dimensões da mesma ordem de grandeza das oscilações que desejava-se observar. Técnicas como as do PIV e similares se fazem necessárias neste caso.

É importante observar que em todas as imagens a zona de mistura mantém-se na região inferior, onde a massa específica é maior mostrando que o banco de lodos atua como um dissipador de perturbações e serve como limite para o campo próximo.

## 7. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A partir dos resultados obtidos na exploração do protótipo e do modelo, o presente trabalho alcançou seus objetivos principais. Foram determinadas as ordens de grandeza e as faixas de variação das propriedades físicas do fluido que se desejava modelar; estabeleceu-se a semelhança parcial entre o protótipo e o modelo, determinando-se as faixas de operação; e criaram-se metodologias de ensaio que possibilitaram visualizar o fluxo e entender, mesmo que de forma simplificada, o efeito da estratificação de massa específica sobre o escoamento de um reator de tratamento de esgoto, no caso um Digestor Anaeróbico de Fluxo Ascendente (DAFA).

Os ensaios no modelo confirmaram, também, a abordagem do problema, que divide o escoamento do DAFA em duas regiões: os campos próximo e longínquo. Este método de abordagem e/ou simplificação do problema mostrou-se satisfatório e deve ser considerado pelos pesquisadores que vierem a estudar o comportamento hidrodinâmico não só de DAFA's, com também, de reatores de tratamento de esgoto em geral.

Ficou evidente a ocorrência de duas regiões distintas: uma com massa específica maior e alta capacidade de mistura do efluente com a massa bacteriana; e outra com massa específica menor onde desenvolvem-se as demais etapas do processo.

Seria interessante verificar-se o comportamento da massa bacteriana nesta região, isto é, sua eficiência de degradação de matéria orgânica em ambientes com alta turbulência

Obtiveram-se dados sobre propriedades físicas do lodo na exploração do protótipo, apesar de ocorrerem descontinuidades de operação que podem gerar desconfiança. Porém, a falta de tempo para uma coleta e análise mais detalhada, levaram a considerá-los no trabalho. Isto não significa que estes dados devam ser considerados como suficientes. Recomendam-se coletas e análises por períodos de tempo mais prolongados e estatisticamente mais representativos.

Sobre as coletas de lodo no protótipo é muito importante frisar a ordem de amostragem, ou seja as camadas superiores antes das inferiores, pois desta forma obtêm-se amostras apenas da camada desejada.

A técnica de medição direta de massa específica mostrou-se adequada, porém aconselha-se a utilização de volumes maiores para os picnômetros, na ordem de 100 ml.

Recomendam-se análises cuidadosas dos perfis de temperatura, associadas às de massa específica e eficiência, a fim de identificar possíveis instabilidades do reator. Estas devem ser simuladas a fim de verificar seu efeito sobre o escoamento e a eficiência do DAFA.

Dentro do período de tempo e da disponibilidade de materiais e pessoal, a exploração do modelo atendeu às expectativas da pesquisa, pois apresentou resultados importantes para o entendimento da dinâmica deste tipo de reator. Foram simuladas as situações observadas no protótipo e visualizados alguns efeitos da estratificação sobre o escoamento, como por exemplo a ocorrência do banco de lodos (banco salino). Imaginava-se inicialmente, que este pudesse ocorrer no protótipo, porém ser simulado, como mostraram os ensaios, foi muito importante para começar-se a compreender a importância do banco de lodos sobre a mistura e o escoamento do reator.

As escalas utilizadas para o modelo, assim como a instrumentação utilizada para o controle do mesmo foram adequadas e facilitaram a operação.

As sondas de condutividade construídas para a medição da salinidade e, indiretamente, da massa específica necessitam de calibrações periódicas a fim de garantir-se a precisão mínima. Seus baixos custos de concepção e manutenção (calibração periódica) e facilidade de operação resultaram em ótimo desempenho e as referenciam para este tipo de simulação.

O método de estratificação de massa específica com solução salina confirmou as indicações da bibliografia, mostrando-se adequado ao caso, pela intensidade de estratificação obtida.

Os ensaios possibilitaram, como abordado anteriormente, a visualização de fenômenos importantes. Porém é importante ressaltar que o principal parâmetro variado nas simulações foi a vazão, mostrando que dentro da faixa de vazões utilizadas, em nenhum instante conseguiu-se situações de instabilidade.

Seria interessante realizar simulações com vazões constantes e variando-se os gradientes de massa específica a fim de verificar os limites para o início de instabilidades. Acredita-se que exista um limite inferior para este parâmetro. Esta informação é importante para determinação da faixa de densidades e/ou concentrações ideais para o banco de lodos.

A iluminação, o traçador, a técnica de visualização, a aquisição e o tratamento de imagens utilizados possibilitaram a observação qualitativa do escoamento que ocorre no reator para as situações simuladas.

Os perfis de massa específica gerados nos ensaios foram muito semelhantes aos observados no protótipo, conferindo credibilidade às simulações efetuadas.

Sua relação com a altura atingida pelo corante, mostra que o banco de lodos pode atuar como inibidor de perturbações e limite entre os campos próximo e longínquo.

A análise conjunta dos perfis de massa específica, das imagens apresentadas e da forma geométrica do reator sugerem a formação de “nichos de mistura”, isto é, a criação de regiões no fundo dos reatores onde o lodo se acumule com mais facilidade, para receberem os jatos de entrada do afluente, a fim de melhorar a mistura e liberar o restante do volume do reator para as demais etapas do processo de tratamento.

Quanto maior for o gradiente de massa específica entre o afluente e esta região de mistura, maior será a convecção que ali ocorrerá. Este gradiente aumenta a turbulência, melhorando assim, a equalização do afluente com a massa bacteriana. Não esquecendo nunca da energia cinética introduzida pelos jatos quando de sua entrada.

O fator preponderante a nível de projetos, deve ser a capacidade de mistura de cada jato e não a quantidade de jatos do sistema de distribuição, pois garantida a capacidade de mistura individual de cada jato o banco de lodos se encarregará, na continuidade do processo, de proceder a distribuição espacial do afluente pelo reator. Portanto, a principal conclusão deste trabalho é a baixa sensibilidade do escoamento deste tipo de reator à forma e à quantidade do sistema de distribuição, desde que garantida a capacidade de mistura individual de cada jato.

## 8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- DRAZIN, P. G. e REID, W. H. (1981). *Hidrodinamic Stability*.
- FISCHER, Hugo B.; LIST, E. John.; KOH, Robert C. Y.; IMBERGER, Jorg; BROOKS, Norman H. 1979. *Mixing in Island and Coastal Waters*. Academic Press. Nova Iorque.
- GIMENEZ, J. R., NASSR, S. C., MAESTRI, R. D. 1997. Estudo em modelo reduzido de um Digestor Anaeróbio de Fluxo Ascendente. *VI Feira de Iniciação Científica UFRGS/PROPESQ*. Porto Alegre, 15-19 de Setembro.
- GIMENEZ, J. R., NASSR, S. C., MONTEGGIA, L. O., MAESTRI, R. D. 1998. Construction and operation of a reduced model of an Upflow Anaerobic Sludge Blanket reactor. *Fifth Latin-American Round Table-Seminar of wastewater anaerobic treatment*. Viña del Mar, Chile, 27-30 de Outubro.
- GIMENEZ, J. R. (2000). Estudo do sistema de distribuição por jatos de um Digestor Anaeróbio de Fluxo Ascendente. Dissertação de Mestrado, IPH/UFRGS. Porto Alegre, Brasil.
- GRAY, C. 1992. The evolution of particle image velocimetry. Em: *Symposium on optical methods and data processing in heat and fluid flow*. Londres, 2-3 de Abril.
- GUYON, E., HULIN, J.P. and PETIT, L., (1991). *Hydrodynamique Physique*. Paris. Savoirs Actuels-InterEditions. 506p.
- HAANDEL, Adrianus C., LETTINGA, Gatzke. 1994. Tratamento anaeróbio de esgotos: um manual para regiões de clima quente. Campina Grande: Epgraf.
- KALYUZHNYI, S. and FEDOROVICH, V., (1997). Integrated mathematical model of UASB reactor. In proc. 8th international conference on anaerobic digestion, 1, 156-63.
- LESIEUR, M., (1990). *Turbulence In Fluids*. Dordrecht. Kluwer Academic Publishers. 412p.
- LESIEUR, M., (1994). *La Turbulence*. Grenoble. Presses Universitaires de Grenoble. 262p.
- LETTINGA, G. e POL, L. W. Hulshoff. 1991. UASB-process design for various types of wastewaters. *Wat. Sci. Tech.* Vol. 24, nº 8, pp. 87-107.
- MAESTRI, R. D., GIMENEZ, J. R. 1998. Hydrodynamic study of upflow anaerobic sludge blanket reactors. *Fifth Latin-American Round Table-Seminar of wastewater anaerobic treatment*. Viña del Mar, Chile, 27-30 de Outubro.

- MOTTA, Victor Freire. 1972. *Curso de Teoria da Semelhança*. Ed. da URGs. Porto Alegre.
- SCHELLINKHOUT, A e COLLAZOS, C. J. 1992. Full-scale application of the UASB technology for sewage treatment. *Water Science Technology*. Vol. 25, nº 7, pp. 159-166.
- SOUZA, M. E., 1986. Criteria for the utilization, design and operation of UASB reactors. *Wat. Sci. Tech.* Vol. 18, nº 12, pp. 55-69.
- EATON, A D.; CLESCERU, L. S.; GREENBERG, A E.. Standard Methods for examination of water and wastewater. 19 Ed. American Public Health Association, Washington 1995.
- TRITTON, D. J. 1988. *Physical Fluid Dynamics*. Clarendon Press. Oxford.
- VIEIRA, S. M. M. e GARCIA Jr, A. D. 1992. Sewage treatment by UASB-reactor. Operation results and recommendations for design and utilization. *Wat. Sci. Tech.* Vol. 25, nº 7, pp. 143-157.
- VIEIRA, Sonia M. M. e SOUZA, Marcos E. 1986. Development of technology for the UASB reactor in domestic sewage treatment. *Wat. Sci. Tech.* Vol. 18, nº 12, pp. 109-121.