

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
INSTITUTO DE PESQUISAS HIDRÁULICAS**

**ESTUDO DO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO POR
JATOS EM UM DIGESTOR ANAERÓBIO DE
FLUXO ASCENDENTE**

Juliano Rodrigues Gimenez

**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, Novembro de 2000

A minha família

UFRGS
BIBLIOTECA IPH

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
INSTITUTO DE PESQUISAS HIDRÁULICAS**

**ESTUDO DO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO POR
JATOS EM UM DIGESTOR ANAERÓBIO DE
FLUXO ASCENDENTE**

Autor:

Juliano Rodrigues Gimenez

Orientação:

Luiz Olinto Monteggia

Colaboração:

Rogério Dornelles Maestri

**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, Novembro de 2000

APRESENTAÇÃO

As atividades que originaram este trabalho tiveram início no ano de 1997 durante trabalho desenvolvido em iniciação científica, quando projetou-se e construiu-se o modelo reduzido, objeto experimental desta pesquisa, pelos então alunos do curso de graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Juliano Rodrigues Gimenez e Sandro Concli Nassr, sob a orientação do professor Rogério Dornelles Maestri, sendo o coordenador do projeto o professor Luiz Olinto Monteggia.

A execução do modelo foi plenamente desenvolvida no Instituto de Pesquisas Hidráulicas, sendo o setor de tornearia mecânica, com a atuação do artífice Paulo Dolejal, responsável por esta materialização.

Durante esta fase, a produção científica ficou registrada em relatórios técnicos, em trabalho escrito e exposto durante a VI Feira de Iniciação Científica promovida pela UFRGS, o qual mereceu o título de “Menção Honrosa”, e em dois trabalhos apresentados no *Fifth Latin-American Round Table-Seminar of Wastewater Anaerobic Treatment* em Viña del Mar, Chile. O modelo ainda, devido a sua atratividade visual e facilidade didática que se disponibilizava para a exposição do sistema de tratamento proposto, serviu à UFRGS e ao IPH em exposições públicas durante a EXPOINTER 1997 e a Expo-Água 1998.

A partir do ano de 1999, o trabalho foi desenvolvido em nível de pós-graduação, o qual foi responsável pela geração de duas dissertações de mestrado, uma delas a que aqui está sendo apresentada, e a outra, de autoria de Sandro Concli Nassr sob orientação do professor Paulo Kroeff de Souza. Nesta etapa de trabalho, o grupo de pesquisa ficou composto pelos dois alunos acima citados, responsáveis pelo desenvolvimento experimental propriamente dito, pelo professor Luiz Olinto Monteggia, atuante através de seus conhecimentos em Saneamento Ambiental, pelo professor Rogério Dornelles Maestri, atuante através de seus conhecimentos de hidromecânica e teoria da semelhança, pelo professor Paulo Kroeff de Souza, atuante com seus conhecimentos de engenharia mecânica e instrumentação aplicada, e pelo Engenheiro Eletricista Alexandre Mahler, com seus conhecimentos de instrumentação eletrônica.

Além das duas dissertações, parte da produção científica desta pesquisa fez parte das apresentações durante a VI Oficina e Seminário Latino Americano de Digestão Anaeróbia, em Recife, e também será submetido à revista *Water Science and Technology*. Ainda está prevista a elaboração de trabalhos escritos em revistas para as áreas de hidromecânica e de visualização de escoamentos.

Durante todo este período de desenvolvimento deste trabalho, foram diversas as pessoas que de forma direta ou indireta colaboraram para que o mesmo se concretizasse, seja pelo auxílio teórico, técnico ou didático oferecido, seja pelo estímulo moral e pessoal oferecido da mesma forma. Agradeço e dedico este trabalho a todas estas pessoas e, sem querer cometer injustiças, gostaria de destacar algumas que foram significativas para esta conquista.

Agradeço ao Orientador, professor Luiz Olinto Monteggia, que através de seus conhecimentos e de suas habilidades em expor suas idéias, muito ajudaram para a realização e compreensão deste trabalho.

Ao professor Rogério Dornelles Maestri, que através de seus conhecimentos nas áreas de hidromecânica, atuou como orientador desde os início dos trabalhos, até as etapas conclusivas. Espero que o presente trabalho sirva de estímulo e talvez de base, para que se dê prosseguimento das atividades de pesquisa do professor.

À professora Ana Luiza de Oliveira Borges, quem muito auxiliou tanto com seus conhecimentos técnicos, quanto com seu apoio moral, e inclusive financeiro.

Ao colega e amigo Sandro Concli Nassr, por todo o período de convivência que tivemos juntos durante a pesquisa, por todo o apoio e dedicação que sem dúvidas, foram vitais para que este trabalho se concretizasse desta forma.

A todos os demais professores do setor de Hidráulica, ao professor Paulo Kroeff de Souza, à professora Edith Beatriz Camaño Schettini e ao professor Marcelo Giulian Marques.

Aos demais colegas do grupo de Hidráulica, Jaime Federici Gomes, Paulo Henrique Ferreira e Samuel Fabián.

A todo grupo de apoio composto pelos funcionários do IPH que de alguma forma auxiliaram na condução desta pesquisa, em especial à Paulo Dolejal, responsável pela confecção do modelo reduzido, e ao amigo Dagoberto Weimar (*in memoriam*), que, durante o período em que esteve presente, sempre encontrou disposição em auxiliar no que fosse necessário.

Ao curso de Pós-graduação, ao Instituto de Pesquisas Hidráulicas e à Universidade Federal do Rio Grande do Sul, que com seu suporte, contribuem para que pesquisas como estas sejam concretizadas.

RESUMO

Dentre os sistemas biológicos para tratamento de águas residuárias, o Digestor Anaeróbio de Fluxo Ascendente (DAFA), tem se destacado nos últimos anos, principalmente por ser um sistema compacto, de simples operação e que pode alcançar níveis de eficiência de remoção da matéria orgânica bastante significativos. Encontram-se na literatura, diversas pesquisas relativas a este sistema com o intuito de aprimorar características biológicas e químicas que incrementem sua eficiência. No entanto, são poucas as pesquisas que enfatizam as características físicas destas estruturas. Este trabalho tem por objetivo proceder um estudo físico de uma estrutura para o tratamento de efluentes que utiliza o sistema tipo DAFA, caracterizando seu comportamento hidrodinâmico de forma a propor diretrizes de dimensionamento que contribuam para a melhoria do sistema. O estudo procede-se em um modelo físico tridimensional em escala reduzida, baseado em um protótipo em funcionamento, fato que permitiu a identificação dos parâmetros de similitude necessários para a modelagem do comportamento hidrodinâmico do processo que ocorre nestes reatores. Especificamente o trabalho apresenta a avaliação do comportamento hidrodinâmico do sistema de distribuição por jatos localizados ao fundo do reator. O fenômeno hidrodinâmico presente nesta região caracteriza-se pela injeção de um fluido através de um orifício em um meio composto por outro fluido com massa específica maior, devido principalmente à presença de matéria biossólida dissolvida, resultando em um fluxo do tipo jatos sob efeitos de empuxo. Apresenta-se um estudo teórico realizado que avaliou os principais parâmetros hidráulicos característicos do fenômeno presente. Com este estudo teórico e com o modelo físico do reator, aplicaram-se técnicas de visualização do escoamento para avaliar o comportamento destes jatos sob diferentes condições de vazão e de gradientes de massa específica. Com a base teórica apresentada e com as avaliações procedidas em modelo, o trabalho conclui com a proposição de parâmetros de dimensionamento para a região sob influência dos jatos de entrada no fundo do reator.

ABSTRACT

Among the biological systems for wastewater treatment, the Upflow Anaerobic Sludge Blanket (UASB) reactors has had stand out application in the last years, mainly for being a compact system of simple operation and manage significant efficiency levels of organic matter removal. In the literature there are several researches related to this treatment system aiming the improvement of biological and chemistries characteristics increasing its efficiency. However, there are few researches emphasising physicals characteristics of these structures. The objective is to proceed a physical study of a structure for the wastewater treatment that uses the system UASB, characterising its hydrodynamic behaviour in order to propose design guidelines that contribute to the improvement of the system. The study is proceeded in a three-dimensional physical model in reduced scale, based on a prototype in operation, fact that allow the identification of the similitude parameters necessary to the modelling of the hydrodynamic behaviour of the process that occurs in these reactors. Specifically the work presents the evaluation of the hydrodynamic behaviour of the jets distribution system located at the bottom of the reactor. The hydrodynamic phenomena present in this area is characterised by the injection of a fluid through a hole in an environment composed by other fluid with grater density, due to the presence of biosolid matter dissolved, resulting in a flow of the type buoyant jets effects. An accomplished theoretical study is introduced which evaluated the main hydraulic characteristic parameters of the present phenomena. With this theoretical study and with the physical model of the reactor, flow visualisation techniques were applied to evaluate the behaviour of these jets under several flow rates and density gradients conditions. With the presented theoretical base and with the evaluations proceeded in the model, the work concludes with the proposition of design parameters for the area under influence of the entrance jets at the bottom of the reactor.

SUMÁRIO DE CAPÍTULOS

<i>Apresentação</i>	<i>IV</i>
<i>Resumo</i>	<i>VI</i>
<i>Abstract</i>	<i>VII</i>
<i>Sumário de Capítulos</i>	<i>VIII</i>
<i>Sumário de Tabelas</i>	<i>IX</i>
<i>Sumário de Figuras</i>	<i>X</i>
<i>Lista de Símbolos</i>	<i>XII</i>
1. Introdução	1
2. Objetivos	3
3. Revisão Bibliográfica	5
3.1 Digestores Anaeróbios de Fluxo Ascendente	5
3.2 Jatos e Plumas	10
3.3 Jatos sob efeito de empuxo	16
3.4 Modelagem Física e Análise Dimensional	17
3.4.1 Jatos e sua análise dimensional	21
3.4.2 Plumas e sua análise dimensional	24
3.4.3 Jatos com efeito de empuxo e sua análise dimensional	26
3.5 Visualização de Fluxos	35
4. Metodologia	37
4.1 Caracterização do fenômeno	37
4.2 O protótipo e o modelo	38
4.3 Instrumentação aplicada ao modelo	40
4.4 Análise dimensional	41
4.5 Traçadores	44
4.6 Sistema de aquisição e tratamento de imagens	45
4.7 Descrição do experimento	47
4.8 Captura e tratamento das imagens	52
4.9 Análise de erros	57
5. Análise dos Resultados	58
5.1 Avaliação do protótipo	58
5.2 Ensaios sem estratificação	61
5.3 Ensaios com estratificação	61
5.3.1 Análise das imagens	65
6. Conclusões	78
7. Recomendações	80
8. Referências Bibliográficas	82

SUMÁRIO DE TABELAS

4.1 – Parâmetros característicos do protótipo	48
4.2 – Determinação da faixa de trabalho para o modelo	49
4.3 – Plano de ensaios no modelo	51
5.1 – Resultados obtidos no modelo	63

SUMÁRIO DE FIGURAS

3.1 –	Representação esquemática de um Digestor Anaeróbio de Fluxo Ascendente _____	6
3.2 -	Esquema simplificado das zonas de circulação de um Reator tipo DAFA _____	10
3.3 -	Ilustração mostrando o decaimento de um jato _____	11
3.4 –	Flutuação da intensidade turbulenta sobre o eixo de um jato turbulento circular ____	13
3.5 –	Definições geométricas para um jato livre circular _____	14
3.6 –	Modelo reduzido de um Digestor Anaeróbio de Fluxo Ascendente _____	19
3.7–	Decaimento da velocidade média ao longo do eixo de um jato circular turbulento _____	22
3.8 –	Diluição como função da distância ao longo do eixo de um jato turbulento circular _____	23
3.9 –	Relação entre μ , κ e β para jatos tridimensionais _____	29
3.10 –	Percurso do eixo de um jato tridimensional _____	30
3.11 –	Concentração e velocidade ao longo do eixo de um jato tridimensional _____	31
3.12 –	Solução assintótica para a diluição em um jato circular turbulento na direção vertical sob efeito de forças de empuxo, comparado com os valores experimentais apresentados por Ricou e Spalding (1961) _____	34
4.1 –	Vista geral da Estação de Tratamento de Esgoto Parque da Matriz _____	38
4.2 –	Representação esquemática mostrando uma vista superior e um corte transversal do reator protótipo. _____	39
4.3 –	Vista superior mostrando a disposição dos jatos no fundo do Reator protótipo ____	48
4.4 –	Evolução do jato em imagens seqüenciais extraídas do arquivo de vídeo digital com um intervalo de 2 segundos, correspondente ao ensaio para $Q=0,05\text{l/s}$ e $\Delta\rho=10\text{kg/m}^3$, considerado como “padrão” pois apresenta valores onde os efeitos de empuxo são mais preponderantes. _____	53
4.5 –	Evolução do mesmo jato apresentado na Figura 4.4, agora mostrando as oito imagens resultantes do processo de subtração da primeira imagem apresentada naquela mesma figura. O resultado é uma do jato, sem a interferência de imagens presentes em segundo plano. _____	54
4.6 –	Seqüência de imagens mostrando a evolução do jato após passar por filtros de imagem que possibilitaram uma melhor visualização e análise do fenômeno em questão _____	55
4.7 –	Esquema demonstrando a técnica de visualização aplicada _____	56
5.1 -	Relações entre vazões e diâmetros para diferentes faixas de Reynolds _____	60
5.2 –	Evolução do jato para uma mesma vazão em uma situação sem estratificação e outra com estratificação _____	61
5.3 –	Gráfico mostrando a trajetória dos jatos para os ensaios 1, 2 e 3 _____	65
5.4 –	Gráfico mostrando a trajetória dos jatos para os ensaios 4, 5 e 6 _____	66
5.5 –	Gráfico mostrando a trajetória dos jatos para os ensaios 7 e 8 _____	66

5.6 – Gráfico mostrando a trajetória dos jatos para os ensaios 9, 10 e 11.	67
5.7 – Gráfico mostrando a trajetória dos jatos para os ensaios 12 e 13.	68
5.8 – Gráfico mostrando a trajetória dos jatos para os ensaios 14, 15, 16 e 17.	68
5.9 – Gráfico mostrando a trajetória dos jatos para os ensaios 18, 19 e 20.	69
5.10 – Gráfico mostrando a trajetória dos jatos para os ensaios 21, 22 e 23.	69
5.11 – Gráfico mostrando a trajetória dos jatos para os ensaios 24, 25, 26 e 27.	70
5.12 – Agrupamento de todos os resultados que descreveram a trajetória percorrida elo eixo do jato sob diferentes valores do Número de Richardson	72
5.13 – Trajetórias dos eixos dos jatos ajustadas e associadas ao Número de Richardson correspondente	73

LISTA DE SÍMBOLOS

<u>Símbolo</u>	<u>Descrição</u>	<u>Dimensões (exemplo)</u>
A	Área da seção transversal	L^2 (m ²)
B	Fluxo de empuxo	L^4/T^3 (m ⁴ /s ³)
c_j	Coefficiente do jato	Adimensional
c_p	Coefficiente da pluma	Adimensional
D	Diâmetro do orifício	L (m ou cm)
F_d	Número de Froude densimétrico	Adimensional
G	Aceleração local da gravidade	L/T^2 (m/s ²)
H	Altura do reator	L (m)
L_M	Comprimento de escala característico	L (m ou cm)
L_Q	Comprimento de escala característico	L (m ou cm)
L_v	Carga orgânica volumétrica	$M/L^3/T$ (kg _{DBO} /m ³ ×dia)
M	Quantidade de movimento	L^4/T^2 (m ⁴ /s ²)
M	Quantidade de movimento local	L^4/T^2 (m ⁴ /s ²)
\dot{m}	Vazão mássica	$L^3/T/M$ (m ³ /s×kg)
Q ou Q_0	Vazão na saída do jato	L/T^3 (m ³ /s ou l/s)
Q_a	Vazão média afluyente	L/T^3 (m ³ /s ou l/s)
R	Raio, distância medida a partir do eixo do jato	L (m ou cm)
R_e	Número de Reynolds	Adimensional
R_i	Número de Richardson	Adimensional
R_p	Número de Richardson da pluma, valor constante	Adimensional
S	Distância medida a partir do orifício de entrada ao longo do eixo do jato	L (m ou cm)
S_0	Concentração da matéria orgânica, massa de DBO por unidade de volume	M/L^3 (kg _{DBO} /m ³)
TP	Tempo de permanência do líquido, o mesmo que TRH	T (h ou min)
TRH	Tempo de residência hidráulico, o mesmo que TP	T (h ou min)
u	Velocidade do fluido do jato na direção do eixo do jato	L/T (m/s)

u_x	Velocidade média no eixo do jato na posição x	L/T (m/s)
u_o	Velocidade horizontal do fluido do jato em $s=0$	L/T (m/s)
U ou U_0	Velocidade média na saída do jato pelo orifício	L/T (m/s)
U_c	Velocidade média no centro do jato na distância	L/T (m/s)
V_r	Volume do reator	L ³ (m ³ ou l)
x	Coordenada horizontal medida a partir do orifício, ou quando como sub-índice indica a direção de avaliação de dada propriedade	L (m ou cm)
Y	coordenada vertical medida a partir do orifício, ou quando como sub índice indica a direção de avaliação de dada propriedade	L (m ou cm)
$\Delta\rho$	Diferença de massa específica entre os fluidos do meio e do jato ($\rho - \rho_0$)	M/L ³ (kg/m ³)
β	Empuxo local	L ⁴ /T ³ (m ⁴ /s ³)
ν	coeficiente de viscosidade cinemática	L ² /T (m ² /s)
ρ ou ρ_s	massa específica do ambiente	M/L ³ (kg/m ³)
ρ_0	massa específica do fluido do jato em $s=0$;	M/L ³ (kg/m ³)

1. INTRODUÇÃO

Uma questão muito debatida nos últimos tempos tem sido aquela relacionada aos problemas sanitários advindos com o desenvolvimento dos aglomerados urbanos. Nesta discussão, se destaca a busca por uma alternativa adequada para o tratamento dos esgotos domésticos gerados, alternativa esta que privilegie as operações e processos unitários que combinem alta eficiência a baixos custos de implantação e operação.

Os sistemas biológicos de tratamento de esgotos podem ser subdivididos em dois grandes grupos: os sistemas aeróbios e os anaeróbios. Os sistemas convencionais de tratamento aeróbio de esgotos apresentam, normalmente, custos elevados tanto na implantação quanto na operação. Os processos anaeróbios, por sua vez, apresentam baixo custo de operação, sendo os custos de implantação bastante variados de acordo com o sistema a ser utilizado.

Nos últimos anos, os reatores anaeróbios de manto de lodo de fluxo ascendente, denominados como Digestores Anaeróbios de Fluxo Ascendente – DAFA ou *Upflow Anaerobic Sludge Blanket Reactor - UASB*, vêm merecendo destacada aplicação como uma boa alternativa para o tratamento anaeróbio de esgotos, pois, além de apresentarem custos mais reduzidos, são sistemas bastante compactos e de simples operação. A partir dos trabalhos de Lettinga e colaboradores iniciados na década de 70, o uso dos DAFAs, originalmente concebidos em países de clima frio, vem se expandindo nos países de clima tropical e subtropical onde a sua eficiência aumenta em muito. Isso relacionado às faixas de temperatura encontradas nessas regiões, que propiciam o desenvolvimento de um melhor *habitat* para a proliferação de bactérias mais eficientes à remoção da matéria orgânica.

As cinéticas dos processos bioquímicos que ocorrem neste sistema tem merecido destacado avanço na sua compreensão por parte de diversos estudos realizados, o que indiscutivelmente tem colaborado para a melhoria dos índices de eficiência desta categoria de tratamento de efluentes. Apesar disto, as tecnologias para projetos destas estruturas ainda não são completamente controladas, pois diversas são as variáveis que podem intervir na cinética destes processos bioquímicos que ocorrem no meio.

Um dos fatores que intervêm de alguma forma neste processo diz respeito à geometria das estruturas de tratamento que concorrem para a presença de comportamentos

hidrodinâmicos mais, ou menos favoráveis ao incremento dos níveis de eficiência atingidos pelo sistema como um todo.

Como já foi dito, são vários os trabalhos que buscam o aprimoramento destes sistemas avaliando as condições biológicas e químicas de funcionamento dos mesmos. Encontra-se, no entanto, uma lacuna considerável no que diz respeito às investigações relacionadas às condicionantes físicas de dimensionamento destas estruturas, ou seja, de que forma a determinação de parâmetros geométricos pode interferir em condições hidráulicas de funcionamento que favoreçam seu aprimoramento?

É em um estudo mais detalhado destas condicionantes físicas, que aqui se tentará colaborar para a compreensão dos fenômenos hidrodinâmicos que ocorrem em um sistema natural como este, onde através de um meio anaeróbio busca-se o tratamento de efluentes sanitários. Seria uma aplicação da chamada Hidráulica Ambiental.

Em linhas gerais o que se espera é contribuir para a compreensão dos fatores que possam intervir no aprimoramento das condicionantes de projeto destas estruturas, que por sua vez, venham incrementar sua eficiência, tanto no que diz respeito à redução de custos, quanto no relacionado a melhores condições de remoção da matéria orgânica.

Por tanto, desenvolver uma pesquisa enfatizando a avaliação dos fenômenos físicos em determinado processo de tratamento de efluentes, serviria como uma contribuição a mais para um entendimento global de todos os fenômenos envolvidos no processo em questão.

2. OBJETIVOS

O estudo hidrodinâmico de sistemas biológicos, como é o caso dos reatores anaeróbios de manto de lodo com fluxo ascendente, ainda hoje não são bem fundamentados, existindo a necessidade de esclarecerem-se quais variáveis realmente deveriam ser consideradas quando do estudo em modelo destas estruturas, a fim de garantir uma adequada similitude de comportamento com outras estruturas em diferentes escalas.

Unindo-se a este fato, verifica-se que as diretrizes de projeto para dimensionamento de reatores DAFA em escala real têm sido baseadas em estudos de estruturas em planta piloto ou em experimentos conduzidos em modelos unidimensionais de laboratório em forma de coluna.

Das estruturas em escala piloto encontram-se os melhores resultados, pois praticamente se eliminam problemas relacionados com a transferência de escalas para outras estruturas, restando somente problemas relacionados com a identificação de quais parâmetros deveriam ser considerados para se representar o real comportamento hidrodinâmico destas estruturas. No segundo caso, nos experimentos em escala de laboratório, os resultados do ponto de vista hidrodinâmico se apresentam bastante diferenciados dos observados em escala real, pois estes não contemplam a tridimensionalidade do escoamento necessária para a avaliação do comportamento hidrodinâmico destas estruturas.

Este trabalho tratará de estudos na região sob influência dos jatos de entrada no fundo do reator, ou seja, na região denominada de campo próximo dos Digestores Anaeróbios de Fluxo Ascendente. Pretende-se assim, contribuir para o conhecimento da caracterização física destes reatores, de forma complementar às caracterizações biológicas e químicas largamente identificadas na literatura.

Os objetivos gerais deste trabalho são os seguintes:

- ❑ **identificar parâmetros de similitude adequados para se tratar dos fenômenos hidrodinâmicos que ocorrem nestas estruturas e**
- ❑ **propor diretrizes de projetos que incrementem a eficiência destes sistemas.**

Identificar quais os parâmetros de similitude mais adequados implica em realizar uma análise dimensional do problema em questão, levantando todas as variáveis

intervenientes que sejam preponderantes para a descrição do fenômeno, identificando assim, relações adimensionais que possibilitem comparações entre estruturas em escalas diferentes.

O segundo item diz respeito ao estabelecimento de parâmetros de projeto que possam representar de forma generalizada características que objetivem o incremento da eficiência do sistema.

Para cumprir o presente utilizou-se um modelo físico em escala reduzida de um DAFA baseado em um reator existente, atualmente utilizado em um conjunto habitacional para tratamento dos efluentes sanitários.

Como etapas de estudo para cumprirem-se os objetivos gerais delineados, tem-se:

- Modelagem hidrodinâmica do sistema:
 - caracterização do fenômeno;
 - identificação das variáveis intervenientes;
 - análise dimensional;
- Estudo em modelo do sistema de entrada do efluente no reator:
 - caracterização do problema;
 - proposição e aplicação de técnicas de visualização do escoamento;
- Proposição de parâmetros de projeto:
 - captura e tratamento de dados;
 - extrapolação dos resultados.

O primeiro item inicia-se a partir das características geométricas conhecidas entre o modelo e o protótipo existentes, onde conhecendo-se determinadas características físicas do protótipo e utilizando teorias da Mecânica dos Fluidos para determinar que tipo de comportamento ocorre neste sistema, será feita a análise para determinar quais parâmetros são mais adequados para se estudar a região de campo próximo.

Com os parâmetros encontrados na etapa anterior, inicia-se o segundo item que servirá para validar o primeiro, permitindo que sejam inferidas propostas de parâmetros de projeto para o dimensionamento desta estrutura. Técnicas de visualização para o escoamento presente no reator serão utilizadas para cumprir estes objetivos, sendo necessário identificar um material traçador de fluxo adequado, bem como permitir que a partir disto, seja relativamente simples extraírem-se resultados.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A seguir será apresentada a revisão bibliográfica realizada durante a pesquisa. Esta serviu não somente para dar conhecimento sobre o atual estado das pesquisas desenvolvidas em temas semelhantes, mas também para melhor compreender e caracterizar o fenômeno com que iria se lidar, procurando também as técnicas mais adequadas para proceder-se a exploração deste fenômeno, sendo que mesmo durante os procedimentos de ensaio em modelo houve a necessidade de complementação desta revisão diversas vezes.

A revisão que será então apresentada em continuação começa pelo tópico mais genérico, apresentando os digestores anaeróbios de fluxo ascendente, objeto de pesquisa deste trabalho. Em seguida apresenta-se tópicos sobre jatos, plumas e jatos sob efeito de empuxo, caracterizando os fenômenos que serão avaliados no reator (digestor).

Para compreender a forma de condução dos estudos em modelo reduzido, bem como as relações de forças que irão reger o comportamento dos fenômenos em análise, apresenta-se um tópico sobre modelagem física e análise dimensional, seguido de sub-tópicos específicos sobre a análise dimensional de jatos, plumas e de jatos sob efeito de empuxo.

Por fim segue um tópico sobre a visualização de fluxos, que serviu para avaliar os métodos e dispositivos já utilizados neste sentido.

3.1 Digestores Anaeróbios de Fluxo Ascendente

O tratamento de efluentes utilizando reatores anaeróbios de manto de lodo com passagem de fluxo ascendente teve sua principal contribuição na década de 70, quando Lettinga e sua equipe de pesquisa (Lettinga et al., 1980) idealizaram o Digestor Anaeróbio de Fluxo Ascendente (DAFA).

A Figura 3.1 descreve a concepção inicial do reator DAFA com seus principais dispositivos (Haandel e Lettinga, 1994). Resumidamente pode-se descrever seu funcionamento da seguinte forma: o esgoto é introduzido no meio pelo fundo do reator, seguindo uma trajetória ascendente até alcançar a saída na parte superior, onde se teria o líquido já tratado. O tratamento ocorre nesta passagem do líquido pelo reator, pois na

presença de um ambiente adequadamente anaeróbico, propicia-se o desenvolvimento da biomassa de bactérias anaeróbicas responsáveis pela digestão da matéria orgânica.

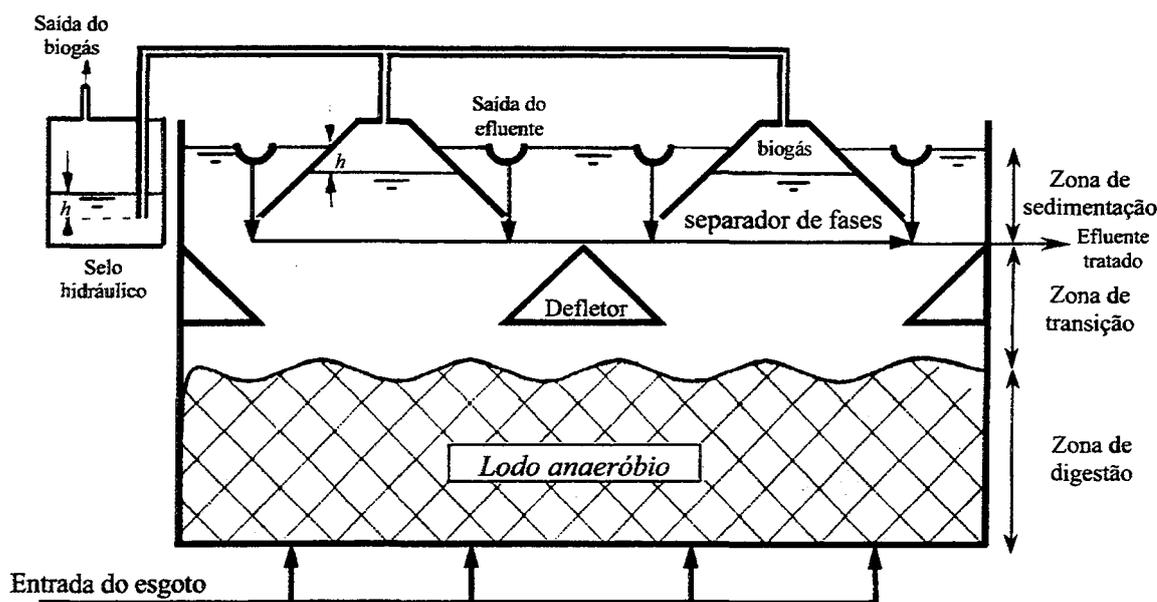


Figura 3.1 – Representação esquemática de um Digestor Anaeróbico de Fluxo Ascendente (Haandel e Lettinga, 1994)

O reator possui duas regiões bem definidas, denominadas de zona de digestão e zona de sedimentação ou decantação. Na primeira ocorre o contato do esgoto bruto com a biomassa de bactérias anaeróbicas, ou seja, se tem a digestão da matéria orgânica. A segunda, normalmente separada da primeira por um dispositivo denominado separador de fases, é caracterizada pela tranquilização do fluxo ascendente, responsável então pela sedimentação de partículas sólidas que saíam da zona de digestão, contribuindo para a clarificação do efluente. Pode-se também coletar os gases gerados pelo processo de digestão anaeróbica, conduzindo-os de forma adequada possibilitando até o seu reaproveitamento.

Estudos em laboratório como os de Khan e Mehrotra (1990), Schellinkout e Collazos (1992), Gnanadipathy e Polprasert (1993) e Wentzel et al. (1994), foram realizados em modelos de laboratório em coluna e a partir destes, transferiram-se para escalas reais os parâmetros observados. As eficiências de remoção apresentaram-se bastante variadas com relação às esperadas, agravando ainda mais quando o tratamento era aplicado em estruturas com grandes dimensões.

Supõe-se que essa queda possa ser devida à falta de critérios mais exatos e rigorosos para o seu dimensionamento, pois nos modelos de laboratório citados, a ênfase maior era dada

para o incremento da eficiência do sistema do ponto de vista biológico que, de forma indireta tentava-se associar a parâmetros físicos da estrutura.

Diversos fatores podem fazer com que esta transferência de escala não seja bem sucedida. Maestri e Gimenez (1998) citam a possibilidade da existência de instabilidades hidrodinâmicas nos reatores em escala real. Estas instabilidades não estariam adequadamente contempladas em modelos de laboratório em coluna, havendo a necessidade de estudos em modelos tridimensionais caso se queira inferir correlações com parâmetros físicos entre estruturas de diferentes escalas.

Encontram-se critérios para o dimensionamento de reatores DAFA nos trabalhos de Souza (1986), Vieira e Garcia (1991) e Haandel e Lettinga (1994). A partir de unidades em escala piloto e escala real foram traçadas diretrizes de projeto, preocupando-se basicamente com parâmetros geométricos como a profundidade, o tempo de permanência médio do líquido e o número de entradas por metro quadrado de área superficial no fundo do reator. Como consequência desses parâmetros, o volume total do reator é definido da seguinte forma (Haandel e Lettinga, 1994):

$$V_r = Q_a \times TP \quad (3.1)$$

Onde:

V_r : volume do Reator;

Q_a : vazão média do afluente e

TP : tempo de permanência do líquido.

O tempo de permanência do líquido, também denominado tempo de residência hidráulico (TRH), é o parâmetro que tem sido motivo da maior parte dos estudos apresentados, pois ele depende de muitas outras variáveis, até hoje não bem definidas. O volume resultante da equação 3.1, como chama atenção Haandel e Lettinga (1994), é um volume efetivo, embora outros autores ignorem esta diferença considerando o volume efetivo igual ao volume total.

A diferenciação entre o volume efetivo e volume morto (volume total menos o volume efetivo) no dimensionamento de um DAFA é exposto por Schellinkout e Collazos (1992) que, a partir de uma planta piloto de 107m³, dimensionam reatores de 3300m³ utilizando o mesmo esgoto e os mesmos tempos de permanência do líquido. Obteve-se uma eficiência de 80% na remoção de Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO) para um tempo

de permanência de 5 horas no reator de escala piloto, e eficiências que variaram de 17% a 48% de remoção da DBO para tempos de permanência de 5,2 a 16 horas nos reatores em escala real. No caso relatado os autores identificam claramente perturbações no escoamento que interferem na eficiência da cinética do processo.

Além dos modelos físicos citados anteriormente, encontram-se estudos em modelos matemáticos como os de Kalyuzhnyi e Federovich (1997) e de Hanisch (1995), onde o objetivo também foi focalizado em pesquisar determinados parâmetros biológicos ou químicos que trouxessem uma melhor eficiência ao sistema, propondo parâmetros físicos para o dimensionamento de estruturas em escala real.

Outros trabalhos como os de Lettinga et al. (1980), Lettinga e Pol (1986, 1991), Souza (1986), Vieira e Souza (1986) e Vieira e Garcia (1992), apresentam parâmetros de projeto para a estrutura em escala real a partir da experiência adquirida tanto em estudos em escala de laboratório quanto da comparação entre reatores em escala piloto e escala real em funcionamento. Para fins de dimensionamento das estruturas recomendam-se, por exemplo, de 1 a 4 metros quadrados por ponto de entrada no fundo do reator para garantir uma boa distribuição dos jatos, bem como um diâmetro mínimo de 50mm para evitar entupimentos nos dutos. Como indicativo para cálculo da geometria, recomendam ainda que a velocidade ascensional deve estar entre 0,5m/h a 1,5m/h para evitar a ascensão e quebra das partículas, visto que a velocidade de sedimentação de partículas de lodo apresentam valores desta mesma ordem de grandeza.

Gómez (1998) identifica em seu trabalho divergências no comportamento dos reatores em escala de laboratório e em escala real devido às diferentes capacidades de acumulação de biomassa que estes apresentam. Propõe o seguinte modelo de dimensionamento:

$$L_v \cdot H = \frac{Q \cdot S_o}{A} \quad (3.2)$$

onde:

L_v : carga orgânica volumétrica, ou seja, a massa de DBO por unidade de volume por dia que se aplica ao reator;

H : altura do reator;

Q : vazão a tratar;

S_o : concentração da matéria orgânica, massa de DBO por unidade de volume;

A : área transversal do reator.

Este modelo proposto, segundo o próprio autor, procura minimizar as diferenças de comportamento encontradas entre modelos de laboratório e protótipos em escala real no que diz respeito ao comportamento do crescimento do manto de lodos. Mesmo assim, ele conclui que ainda existe a necessidade de modelos que permitam prever a dinâmica dos reatores perante diferentes vazões e concentrações.

Especificamente sobre os sistemas de distribuição da entrada do afluente no fundo do reator, encontram-se nos trabalhos de Lettinga et al. (1980), Souza (1986) e Vieira e Souza (1992), a preocupação com o dimensionamento relacionada a proporcionar uma adequada mistura entre o esgoto bruto e a biomassa presente no digestor. Esta mistura deve ser de forma eficiente garantindo o contato necessário entre as partes. Além disso, os parâmetros de projetos indicados também buscam evitar o surgimento de caminhos preferenciais, a criação de zonas mortas e o entupimento dos tubos que conduzem o afluente até o fundo do reator.

A produção de biogás que ocorre naturalmente devido à digestão anaeróbia, é citada como fator contribuinte à mistura, podendo, em excesso, vir a instabilizar o meio provocando o arraste de partículas de lodo até a zona de sedimentação. Para efluentes diluídos, como é o caso dos esgotos sanitários, esta produção de biogás se apresenta em níveis muito baixos não podendo ser considerada como elemento efetivo de mistura (Vieira e Garcia, 1992).

Basicamente os parâmetros de projeto para o sistema de entrada do afluente nos reatores limitam-se à indicação do número de pontos de entrada por área superficial do fundo do reator, não apresentando, porém, quais critérios foram adotados para a definição destes valores de projeto. Vieira e Garcia (1992) ainda aconselha uma distância de 20cm entre o ponto de entrada e o fundo do reator.

Adotando uma notação utilizada para saídas de emissários, Maestri e Gimenez (1998) dividem a estrutura em duas regiões (Figura 3.2). A primeira, denominada de campo próximo, localizada ao fundo do reator sob influência direta dos jatos de entrada, apresentando as forças de inércia como as principais forças atuantes nesta região. Na outra, denominada de campo longínquo, as forças predominantes são forças de Arquimedes (empuxo) e o escoamento ocorre por efeitos de plumas. O volume do campo próximo em relação ao volume da campo longínquo é muito pequeno, entretanto nesta zona é que se realiza a etapa inicial da mistura entre esgoto novo e a biomassa ativa presente no DAFA, não

devendo ser desconsiderada, pois quanto maior for a eficiência desta mistura maior será a eficiência do processo como um todo.

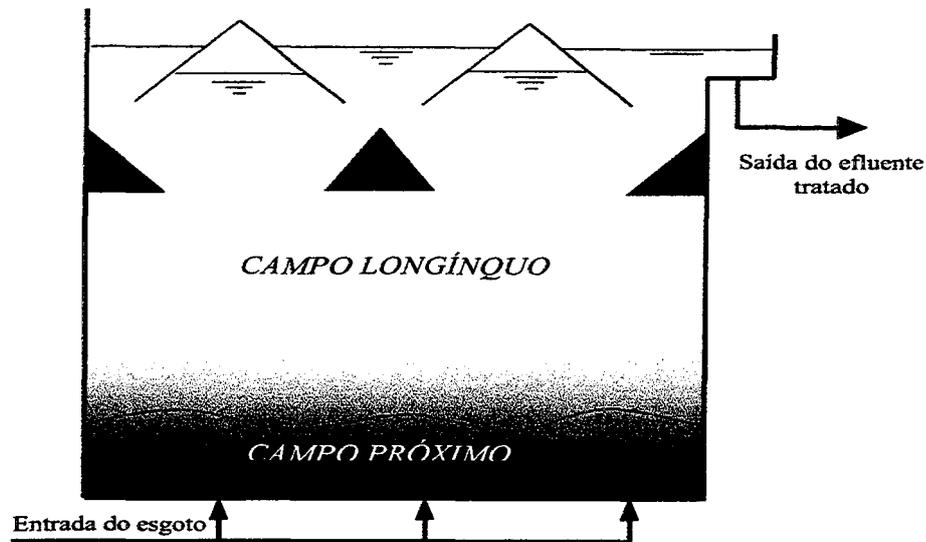


Figura 3.2 - Esquema simplificado das zonas de circulação de um Reator tipo DAFA (Maestri e Gimenez, 1998)

Nassr (2000) apresenta o levantamento e a caracterização de parâmetros físicos como a viscosidade, a tensão superficial e a massa específica encontradas no reator protótipo deste trabalho. Alguns destes parâmetros são de vital importância para a caracterização do comportamento hidrodinâmico presente no protótipo e que, portanto, devem ser respeitados num modelo que o represente.

3.2 Jatos e Plumas

Jatos e plumas são estruturas hidrodinâmicas formadas devido à saída de um fluxo através de um orifício, sendo que nos jatos existe uma preponderância de efeitos inerciais devido a quantidade de movimento adquirida pela saída sob pressão, enquanto que nas plumas a fonte primária de energia cinética e de quantidade de movimento são devidas a forças de Arquimedes (empuxo), por presença de densidades heterogêneas (List, 1982).

Reynolds (1974) e Tennekes e Lumley (1980) fazem uma analogia do comportamento das plumas, revendo o comportamento da emissão de gases através de uma chaminé para a atmosfera. Em fluxos deste tipo, observa-se que a dispersão de matéria se dá inicialmente através de movimentos turbulentos gerados pelos efeitos das forças de inércia proporcionadas pelo jato de emissão da chaminé e, num segundo momento, estes movimentos se dão por efeitos de plumas geradas pela estratificação atmosférica devido às diferenças de

temperatura entre as camadas que fazem com que as forças de Arquimedes sejam preponderantes às de inércia.

Em reatores tipo DAFA (Figura 3.2), ao fundo se tem a entrada do afluyente constituída por jatos mais ou menos eqüidistantes, de forma a homogeneizar o fluxo. A medida que este fluxo vai se afastando do orifício de saída, vai perdendo quantidade de movimento, ou seja, perdendo suas características de jato. os efeitos de pluma começam a ser preponderantes, apresentando uma dependência direta com a geometria de confinamento do escoamento, com a viscosidade do fluido e com outras características termodinâmicas.

Panton (1984) apresenta uma descrição do comportamento e da evolução de um jato com perfil inicial laminar ejetado em um reservatório, Figura 3.3. Neste caso, a turbulência primeiramente fica confinada aos contornos formados entre o fluido do reservatório e o fluido do jato, caracterizando uma região com forte cisalhamento. A medida em que o fluxo do jato se distancia da saída, chegando à região onde ele se encontra completamente turbulento, tem-se a formação de pequenos fluxos gerados no meio líquido do reservatório induzidos por seu próprio fluxo. Quando o jato se torna completamente turbulento a velocidade no eixo deste começa a decair, acompanhada pelo espalhamento do mesmo. O decaimento continua até que toda a energia cinética proporcionada pelo jato seja transformada em energia cinética dos turbilhões. O destino desses turbilhões é o de serem destruídos pela ação da viscosidade e, por fim, essa dissipação viscosa tomaria toda esta energia e a transformaria em movimento molecular aleatório, transformando-a em calor.

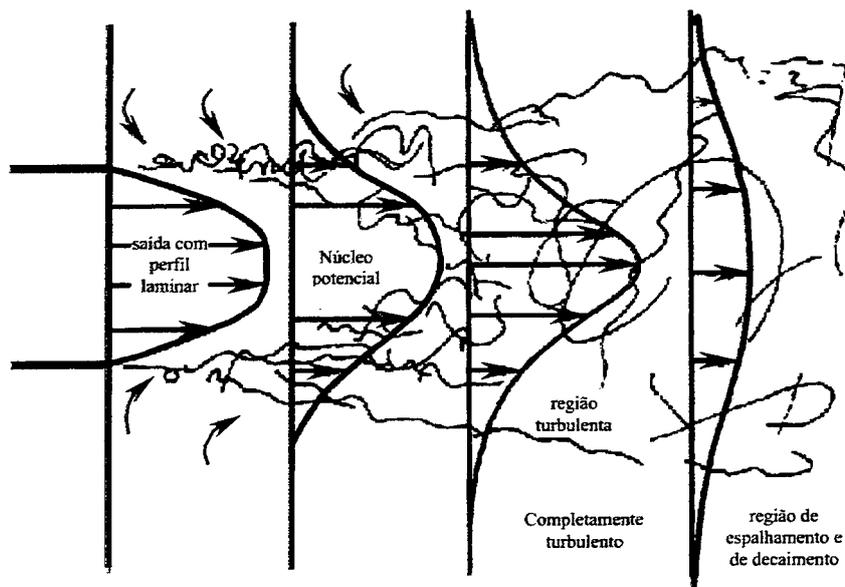


Figura 3.3 - Ilustração mostrando o decaimento de um jato (Panton, 1984).

Verifica-se que o tamanho do jato aumenta estavelmente à medida que se afasta do orifício, existindo um núcleo de fluxo com velocidade praticamente estável U_o . A partir desta seção, a turbulência gerada nos contornos com o meio penetram em direção ao eixo e a velocidade média, neste eixo, começa a decair com o afastamento do orifício. Este núcleo de fluido com velocidade praticamente invariável tem a forma de um cone e é conhecido por cone, ou núcleo, potencial. A região desde o orifício de saída até o fim do cone potencial é conhecida como região de fluxo em desenvolvimento, enquanto que a região iniciada após o fim deste é denominada por zona de fluxo completamente desenvolvido (Rajaratnam, 1976)

Os jatos formados na entrada do afluente, conforme suas velocidades na saída das canalizações, poderão ser laminares ou turbulentos. A presença de um ou outro regime de escoamento (laminar ou turbulento) pode ser caracterizada pelo Número de Reynolds (R_e), dado por:

$$R_e = \frac{U \times d_0}{\nu} \quad (3.3)$$

Onde:

U : velocidade média na saída do jato;

d_0 : diâmetro da saída do conduto;

ν : coeficiente de viscosidade cinemática.

Diversos trabalhos como os de Ricou e Spalding (1961), Abraham (1963), Wygnanski e Fieldler (1969), Rajaratnam (1976), Fischer et al. (1979), List (1982), dentre outros onde o tema envolve o estudo de jatos turbulentos, estabelecem faixas de Número de Reynolds para caracterizar os jatos como turbulentos ou laminares. Generalizando, pode-se dizer que caso esses jatos apresentem valores abaixo de 10^1 a 10^2 haverá uma tendência à formação de um jato laminar, sendo esta existência somente garantida para R_e com ordens de grandeza abaixo de 10^0 ; acima desses valores dependerá da estabilidade do meio. Caso os jatos possuam baixa velocidade, poderá surgir uma zona de transição, onde as instabilidades irão se desenvolver no sentido de gerar características turbulentas. Quanto maior for o R_e do jato, menor será esta zona de transição. Quando o R_e na saída do jato atinge valores acima de 10^4 , os jatos são completamente turbulentos logo após a saída do bocal.

Além disso, estes jatos, nestas condições turbulentas, poderão apresentar características de auto-similaridade, até distâncias de 120 vezes o diâmetro de sua saída,

sendo características auto-similares entendidas como aquelas que entre diversas seções apresentam similaridade entre si, podendo de alguma forma ser correlacionadas. Isto ocorre devido ao equilíbrio interno das componentes turbulentas do fluxo (Wyganski e Fiedler, 1969).

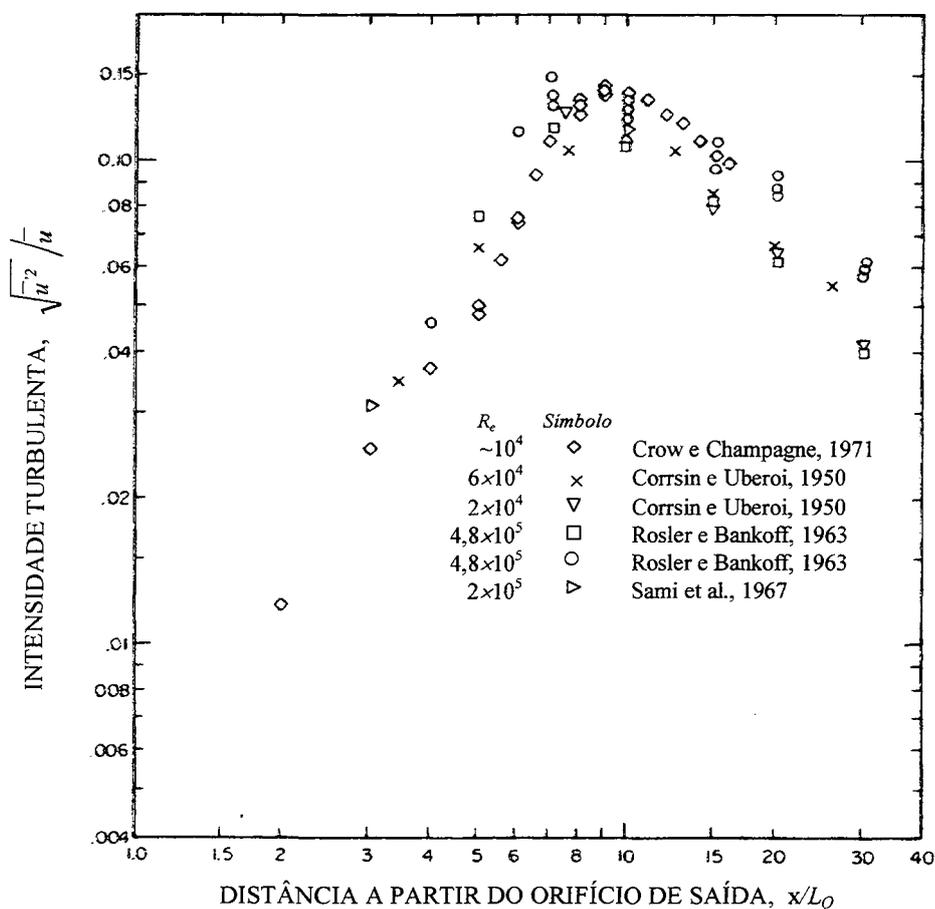


Figura 3.4 – Flutuação da intensidade da turbulência sobre o eixo de um jato turbulento circular (Fischer et al., 1979). Obs.: L_0 conforme definido na equação 3.12.

A região de fluxo em desenvolvimento, onde se tem um perfil de velocidades constante, alcança até seis vezes o diâmetro do orifício de saída e, segundo experimentos realizados por diversos autores, conforme se verifica na Figura 3.4, o fluxo turbulento apresenta um estado de equilíbrio a partir de uma distância de dez vezes o diâmetro do orifício, onde esta turbulência alcança um estado de decaimento estável. Nesta região, denominada então de zona de fluxo completamente desenvolvido, o jato continua a se expandir e as velocidades e concentrações médias decrescem e apresentam-se em perfis auto-similares, sendo que em qualquer seção transversal é possível expressar a velocidade média, ou a distribuição de um traçador, em termos de um valor máximo, medido no eixo do jato, e uma medida no seu comprimento.

Não havendo nenhum obstáculo a sua frente, a auto-similaridade permite que todas as propriedades de um jato puro turbulento possam ser reduzidas a expressões puramente cinemáticas (Figura 3.5). Nestas condições Albertson et al. (1948) estabelece que a vazão carreada pelo jato pode ser determinada pela seguinte expressão:

$$Q = 0,32 \times Q_0 \times \left(\frac{x}{d_0} \right) \quad (3.4)$$

Onde:

x : distância dada a partir da saída do jato pelo orifício;

d_0 : diâmetro da saída;

Q_0 : vazão na saída do jato.

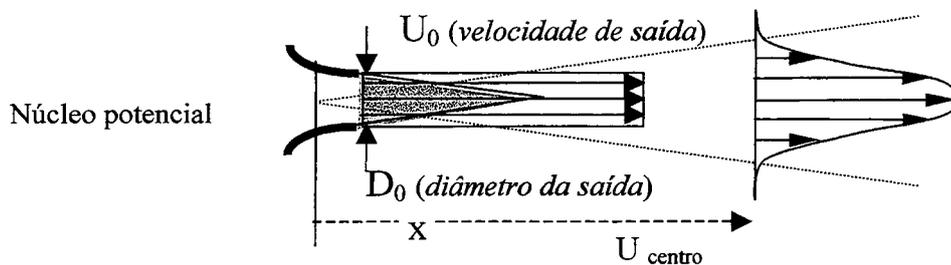


Figura 3.5 - Definições geométricas para um jato livre circular

Nas mesmas condições, Tennekes e Lumley (1980) definem a velocidade no eixo do jato da seguinte forma:

$$U_c = 6,39 \times U_0 \times \left(\frac{d_0}{x} + 0,6 \right) \quad (3.4)$$

onde:

U_c : velocidade média no centro do jato na distância x ;

U_0 : velocidade média na saída do jato pelo orifício;

Os mesmos autores ainda definem que o ângulo de expansão dos jatos livres turbulentos segue uma relação constante de 5:1, ou seja, para uma progressão de vinte unidades o jato se expandirá em oito. Ambas as análises indicadas pelas duas últimas equações são válidas para a região de fluxo completamente desenvolvido e, caso o jato encontre restrições ao seu desenvolvimento, poderão ocorrer variações nessas equações, porém a semelhança cinemática é garantida.

Se houver movimento da massa de fluido em relação ao mesmo ou o jato for confinado, outras relações deverão ser empregadas. Rajaratnan (1976), apresenta soluções para estes dois tipos de jatos. Para jatos em que há velocidade da massa de água diferente de zero as suas características serão função de duas velocidades: velocidade do jato na saída (U_0) e velocidade da massa de água (U_1)

Fischer et al. (1979) classifica como sendo três os principais parâmetros que influenciam o comportamento dos jatos turbulentos:

- ❑ parâmetros intrínsecos do jato;
- ❑ parâmetros do meio;
- ❑ fatores geométricos.

O primeiro grupo inclui a distribuição da velocidade e o nível de turbulência iniciais do jato, o fluxo de massa, o fluxo da quantidade de movimento, e o fluxo de algum eventual material traçador, como o calor, salinidade ou um contaminante qualquer, sendo que, se a concentração de um eventual traçador for suficientemente baixa, de modo que a densidade do jato seja essencialmente igual aos níveis de densidade do meio, então pode-se considerar que a concentração do traçador não apresentará nenhum efeito na dinâmica do jato.

O segundo grupo de variáveis incluem os fatores que podem estar presentes no meio onde o jato está incidindo, como o nível de turbulência, a incidência de correntes e a estratificação por densidade. Estes fatores normalmente irão influenciar o comportamento do jato já a uma certa distância do orifício de saída. No entanto, é necessário considerar-se de antemão sua influência no jato propriamente dito para que se possa encontrar em quais distâncias estes efeitos tornam-se significantes.

Os fatores geométricos que devem ser incluídos para a análise do jato são: a forma do jato, ou seja, a forma do orifício de saída; sua orientação, a proximidade a possíveis jatos adjacentes e/ou contornos sólidos, o comportamento do jato com relação ao seu confinamento ou sua direção (se o jato se apresenta sob efeitos de empuxo negativo ou positivo), se o jato é submerso, e seu relacionamento com alguma superfície livre.

Todos estes três fatores podem estar presentes em um único problema envolvendo jatos e a correlação de cada um dos fatores com todos os outros, envolve um problema complexo ainda não completamente desenvolvido. Quando se depara com um problema deste

tipo, deve-se primeiro avaliar as condições limites e identificar quais fatores são mais significativos para a representação do fenômeno em questão.

3.3 Jatos sob efeito de empuxo

O que normalmente ocorre em problemas práticos é a presença de jatos em um meio estratificado por diferença de densidades, resultando no então chamado jato com efeito de empuxo (Fischer et al., 1979). O fluido que inicialmente é conduzido por um fluxo de quantidade de movimento, pode apresentar densidade diferente a de sua vizinhança, fazendo com que as forças de empuxo também contribuam para o seu desenvolvimento. Próximo à fonte geradora, o fluxo em um jato, ou pluma, normalmente é controlado por condições iniciais como a geometria do orifício, a velocidade média de saída, a diferença de densidades entre o fluido do meio e o fluido do jato, a intensidade da turbulência e a distribuição de velocidades no conduto de suprimento do jato. Quanto mais se afasta, mais estes fatores se tornam sem importância, fazendo com que o fluxo seja dirigido pelas condições do meio e, principalmente, pela diferença de densidades entre as camadas, se houver.

Abraham (1963) descreve que a difusão de jatos em um meio com densidade diferente a do fluido do jato, podem se dar em três regiões. Caracteriza estas regiões de acordo com o Número de Froude densimétrico (F_d) que elas apresentam, sendo este número dado por:

$$F_d = \frac{U_0^2}{\frac{\rho_s - \rho_0}{\rho_0} g d_0} \quad (3.5)$$

onde:

U_0 : velocidade na saída (m/s);

ρ_s : massa específica do ambiente (kg/m³);

ρ_0 : massa específica do jato (kg/m³);

g : aceleração local da gravidade (m/s²);

d_0 : diâmetro do orifício de saída (m).

Quando $F_d = \infty$, está-se na região sem efeito de empuxo e em qualquer ponto o fluxo de empuxo pode ser desprezado. Se $F_d \approx 0$, tem-se a região sob domínio do empuxo e, neste caso, o fluxo da quantidade de movimento inicial pode ser desprezado.

A terceira situação corresponde a um caso intermediário das outras duas, onde então se tem um valor de F_d finito conhecido. Para este caso a quantidade de movimento inicial é predominante na região próxima ao orifício de saída do jato; já em distâncias maiores deste orifício, as forças de empuxo são mais significativas. Assim, para este caso o jato pode ser dividido em uma sub-região sem efeito de empuxo, próxima ao orifício, e uma sub-região com efeito de empuxo, em distâncias mais afastadas do orifício. Estas sub-regiões seriam separadas por uma zona de transição, na qual tanto a influência do empuxo quanto da quantidade de movimento seriam igualmente importantes.

Fischer et al.(1979) ainda conclui que jato com efeito de empuxo é todo aquele no qual sua massa específica inicial difere por um valor $\Delta\rho$ da massa específica do meio. Ele tanto pode apresentar características semelhantes às de um jato puro, dependendo de sua vazão e do fluxo de quantidade de movimento iniciais; como também pode apresentar características semelhantes às de uma pluma pura, dependendo de seu fluxo de empuxo inicial. Ainda assim, em regiões afastadas da fonte geradora, estes jatos sempre apresentarão características de pluma, ou seja, um jato com efeito de empuxo invariavelmente se tornará uma pluma, em uma dada distância da saída.

3.4 Modelagem Física e Análise Dimensional

A complexidade de muitos dos fenômenos que ocorrem na natureza pode tornar impraticável seu tratamento através do uso de métodos matemáticos, sendo necessário recorrer-se ao emprego de técnicas experimentais capazes de permitir a obtenção de soluções práticas. A modelagem física surge como método capaz de sanar quase por completo problemas envolvendo sistemas naturais, onde o grande número de variáveis envolvidas impede o uso exclusivo e confiável de métodos analíticos e/ou empíricos (Vergara, 1995). Esta complexidade está relacionada tanto com a identificação das condições de contorno do problema, quanto com a capacidade de gerenciar um grande número de variáveis condicionantes de uma dada geometria; fatos esses, freqüentes quando se trata com problemas envolvendo sistemas naturais.

Segundo Motta (1972), um modelo físico reduzido para ser utilizado de forma adequada, requer que seu comportamento ocorra de forma semelhante ao do protótipo. Esta busca de similitude entre modelo e protótipo deve garantir que o mesmo fenômeno, considerando as mesmas grandezas físicas, ocorra nos dois sistemas (modelo e protótipo).

Além disto, deve também garantir que para cada categoria de grandeza existam relações constantes bem conhecidas e independentes dos valores absolutos da grandeza em estudo. Assim, experiências em modelos hidráulicos ficam regidas pela chamada Teoria da Semelhança, que por sua vez tem por objetivos os seguintes:

- ❑ Estabelecer o conjunto de princípios a serem obedecidos a fim de projetar, construir, operar e interpretar sistemas (modelos) a partir dos quais se deseja prever o comportamento de outros sistemas (protótipos);
- ❑ Estabelecer as relações de transferência entre modelos e protótipos;
- ❑ Estabelecer o tipo de relação entre as diversas grandezas intervenientes em qualquer fenômeno físico, a fim de poder pesquisar sistematicamente os dados mais significativos.

Assim, o conceito de semelhança física comporta um aspecto qualitativo e outro quantitativo. O aspecto qualitativo está relacionado ao fato de que o mesmo fenômeno envolvendo as mesmas grandezas relacionadas pela mesma lei, se passa tanto no modelo quanto no protótipo. Já o quantitativo está em que existem relações constantes bem conhecidas e independentes dos valores particulares das grandezas entre os valores que ocorrem no modelo e os que ocorrem no protótipo.

Tem-se portanto que respeitar as leis de semelhança para se “reduzir” adequadamente um protótipo, não bastando simplesmente fazer uma redução somente das grandezas geométricas (comprimento, largura e altura ou profundidade), mas sim buscar relações que também preservem semelhança entre as forças atuantes nos dois sistemas (Motta, 1972 e Vergara, 1995).

Para a realização desta pesquisa conta-se com um modelo reduzido de um DAFA, Figura 3.6, construído respeitando a redução das escalas geométricas, ou seja, se tem um modelo geometricamente semelhante ao seu protótipo (Gimenez et al., 1997 e 1998). Há a necessidade agora, de se particularizar o estudo, identificando as variáveis de interesse e, então, buscar relações de semelhança bem definidas que permitam a adequada transferência do fenômeno observado em modelo para quaisquer escalas desejadas de um outro protótipo.



Figura 3.6 – Modelo reduzido de um Digestor Anaeróbio de Fluxo Ascendente (Gimenez et al., 1998).

Abraham (1963) e Fischer et al.(1979) em seus estudos sobre a difusão de jatos, esboçam uma análise dimensional envolvendo os parâmetros mais significativos para a representação deste fenômeno.

Generalizando, Fischer et al. (1979) estabelecem os seguintes fatores como sendo os mais importantes para a descrição do comportamento dinâmico dos jatos:

- a) *Vazão em massa* do jato, ρq , que representa a massa de fluido passando em uma seção transversal do jato por unidade de tempo:

$$\rho q = \int_A \rho u dA \quad (3.6)$$

onde:

A : área da seção transversal do jato;

u : velocidade média do jato na direção do eixo;

ρ : massa específica.

q : vazão específica.

- b) ρm , a quantidade de movimento passando em uma seção transversal do jato por unidade de tempo:

$$\rho m = \int_A \rho u^2 dA \quad (3.7)$$

onde:

m : é a quantidade de movimento específica.

- c) $\rho\beta$, o empuxo ou peso submerso passando através de uma seção transversal do jato por unidade de tempo:

$$\rho\beta = \int_A g \Delta\rho u dA \quad (3.8)$$

onde:

g : aceleração local da gravidade;

$\Delta\rho = \rho - \rho_0$: é a diferença de massa específica entre os fluidos do meio e do jato;

β : é o empuxo local, em analogia à quantidade de movimento específica.

Usam-se as letras Q , M e B para referenciar os valores iniciais para a vazão, para a quantidade de movimento por unidade de massa e para o empuxo local por unidade de massa, respectivamente. Resultando que:

$$Q = U \times A \quad (3.9)$$

$$M = U^2 \times A \quad (3.10)$$

$$B = g'_0 \times Q \quad \text{com} \quad g'_0 = g \left(\frac{\Delta\rho}{\rho_0} \right) \quad (3.11)$$

sendo as dimensões destas variáveis dadas por:

$$[Q] = L^3 / T \quad [M] = L^4 / T^2 \quad [B] = L^4 / T^3$$

Estas dimensões representam as grandezas fundamentais que serão usadas para se proceder a análise dimensional dos jatos, das plumas e dos jatos sob efeito de empuxo.

3.4.1 Jatos e sua análise dimensional

Na análise dimensional para jatos puros, ou seja, para aqueles em que não existe influência de forças de empuxo, Fischer et al. (1979) identificam como grandezas intervenientes as seguintes: distância do jato a partir do orifício de saída, x , e as já definidas vazão inicial, Q , e quantidade de movimento inicial, M . Agrupando as duas últimas, define-se um comprimento de escala característico para o jato, dado por:

$$L_Q = Q/M^{1/2} \quad (3.12)$$

Para jatos com orifício de saída de forma circular este comprimento, utilizando as equações 3.9 e 3.10, reduz-se à:

$$L_Q = \sqrt{A} \quad (3.13)$$

onde A : é a área da seção transversal do orifício de saída do jato.

Este comprimento característico resulta em um valor correspondente à região de influência das características geométricas do jato, ou seja, até a distância L_Q esta geometria é um parâmetro que caracteriza a dinâmica de comportamento do jato.

Fischer et al. (1979) reagrupa então as variáveis anteriores da seguinte forma: x/L_Q , Q e M , colocando-as como grandezas fundamentais utilizadas para se realizar a análise dimensional para os jatos puros. Nesta análise, podem ser encontradas relações, por exemplo, envolvendo a velocidade média no eixo do jato, u_x :

$$u_x \frac{Q}{M} = f\left(\frac{x}{L_Q}\right) \quad (3.14)$$

onde f representa uma função a determinar. No entanto, sabe-se que em jatos puros quanto mais o fluxo se afasta do orifício de saída, menos importante se torna a vazão e mais importante se torna o fluxo da quantidade de movimento. Ou seja, isto significa que para distâncias $x \gg L_Q$ todas as propriedades do jato podem ser definidas em termos de x e de M , ou seja, da função acima descrita resulta uma relação linear:

$$u_x \frac{Q}{M} \rightarrow a_1 \left(\frac{L_Q}{x}\right) \quad \text{para} \quad x \gg L_Q \quad (3.15)$$

Diversos experimentos, conforme demonstrado na Figura 3.7, demonstraram que o valor para a constante a_1 está em torno de $7,0 \pm 0,1$, coincidindo ainda com o valor sugerido nos trabalhos de Chen e Rodi (1976) apud Fischer et al. (1979) a partir da avaliação de outros oito estudos experimentais.

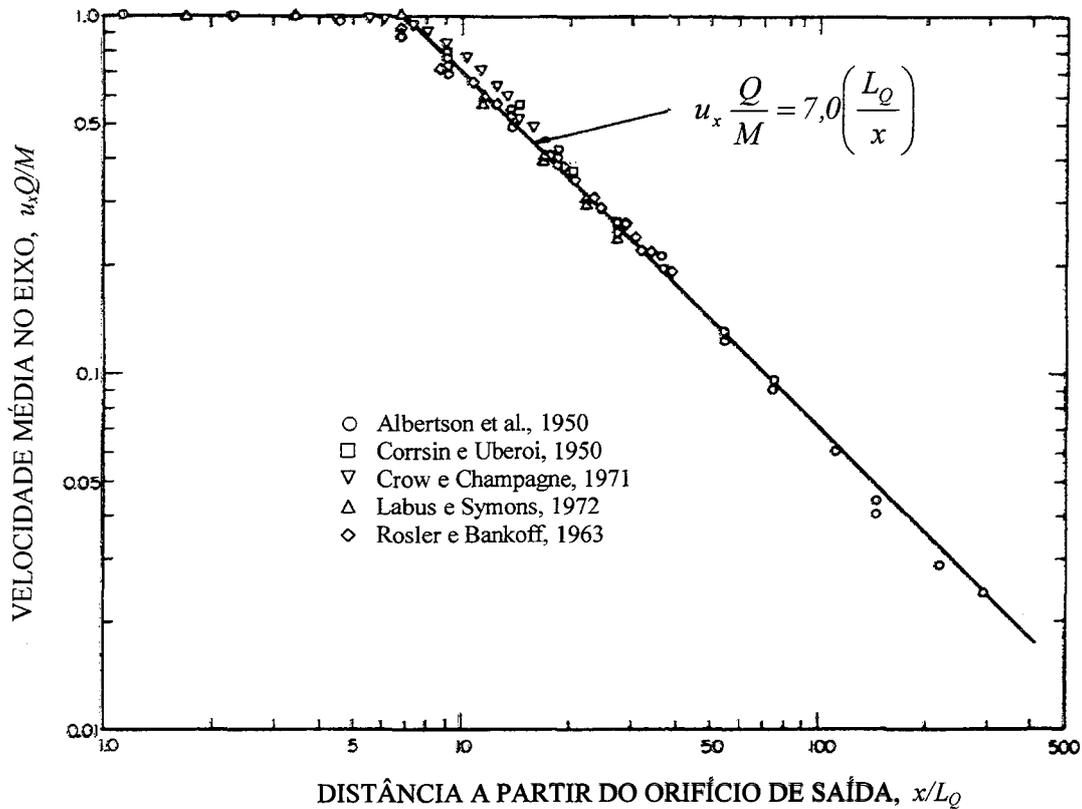


Figura 3.7– Decaimento da velocidade média ao longo do eixo de um jato circular turbulento, onde $L_0 = Q/M^{1/2}$ (Fischer et al., 1979)

Resulta que:

$$u_x \frac{Q}{M} = 7,0 \left(\frac{L_0}{x} \right) \quad \text{ou} \quad u_x = 7,0 \left(\frac{M^{1/2}}{x} \right) \quad (3.16)$$

Correlacionando dimensionalmente a vazão q com as outras grandezas, pode ser escrito que:

$$q = Q \times f \left(\frac{x}{L_0} \right) \quad (3.17)$$

Onde novamente f é uma função desconhecida. Como no caso anterior, sabe-se que para valores de x muito maiores do que L_0 , equívale a afirmar que a influência da vazão inicial Q é insignificante, ou seja, tende a θ . Assim, existe um valor constante relacionando linearmente a equação que, por sua vez, ficaria da seguinte forma:

$$\frac{q}{Q} = c_j \left(\frac{x}{L_Q} \right) \quad (3.18)$$

Onde c_j é denominado como coeficiente do jato e de acordo com os experimentos expostos na Figura 3.8, percebe-se o valor da constante c_j em torno de 0,25, resultando:

$$\frac{q}{Q} = 0,25 \left(\frac{x}{L_Q} \right) \quad \text{ou} \quad q = 0,25 M^{1/2} x \quad (3.19)$$

Este parâmetro, denominado vazão relativa q/Q , é útil para se avaliar a diluição média relativa proporcionada por um jato. Este resultado ainda é similar ao encontrado por Albertson et al. (1948), equação 3.4, sendo que o coeficiente c_j apresenta um valor de 0,03 a mais do que o sugerido por Fischer.

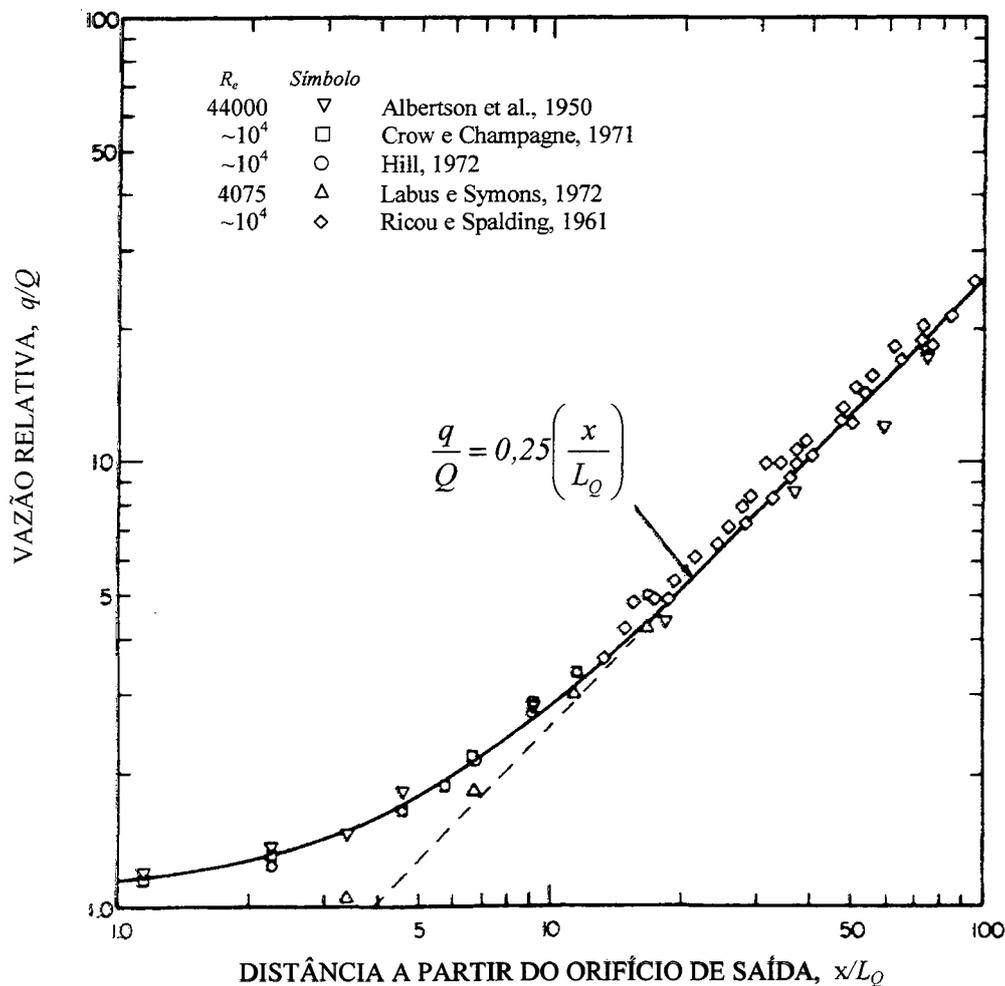


Figura 3.8 – Diluição como função da distância ao longo do eixo de um jato turbulento circular (Fischer et al., 1979).

3.4.2 Plumas e sua análise dimensional

O fluido com comportamento de pluma apresenta densidade diferente da sua vizinhança, podendo esta ser maior ou menor do que aquela, de modo que a força de gravidade atua de forma a interagir com a quantidade de movimento. Esta ação da força da gravidade em presença de um meio com diferentes densidades faz com que as forças de empuxo atuem de modo a incrementar o fluxo da quantidade de movimento ao longo do eixo da pluma. Assim, nas plumas puras, as contribuições iniciais da vazão e da quantidade de movimento são insignificantes perante a influência exercida pelo fluxo de empuxo. Isto significa que todo o fluxo das plumas pode ser representado pelas variáveis B , o fluxo de empuxo inicial; x , a distância desde a origem; e ν , a viscosidade do fluido (Fischer et al., 1979). Analisando dimensionalmente, encontra-se que a velocidade vertical na direção do eixo da pluma é dada por uma relação do tipo:

$$u_x = f(B, x, \nu)$$

Tem-se quatro variáveis envolvidas (u_x , B , x e ν) que, por sua vez, correlacionam duas dimensões básicas: [L] e [T], o que na análise dimensional resultaria na formação de dois grupos adimensionais:

$$u_x \left(\frac{x}{B} \right)^{1/3} \quad e \quad \frac{B^{1/3} x^{2/3}}{\nu}$$

que podem ser correlacionados da seguinte forma:

$$u_x \left(\frac{x}{B} \right)^{1/3} = f \left(\frac{B^{1/3} x^{2/3}}{\nu} \right) \quad (3.20)$$

O segundo membro desta equação tem a forma de um número de *Reynolds*, e desde que ele seja suficientemente grande, o fluxo pode ser considerado completamente turbulento e os efeitos de viscosidade tornam-se ausentes. Este tipo de característica é verificada quando se analisa certa variável e o seu número de Reynolds, identificando-se que em um determinado Número de Reynolds, o valor desta variável tenderá a se aproximar assintoticamente de um valor constante (Ricou e Spalding, 1961; Abraham, 1963; Wagnanski e Fiedler, 1969; Rajaratnan, 1976).

Neste caso, a relação 3.20 assume a seguinte forma:

$$u_x = b_1 \left(\frac{B}{x} \right)^{1/3} \quad (3.21)$$

Experimentos feitos por Rouse et al. (1952) apud Fischer et al. (1979) determinaram o valor 4,7 para b_1 resultando então:

$$u_x = 4,7 \left(\frac{B}{x} \right)^{1/3} \quad (3.22)$$

Nos jatos puros não se consideram diferenças de densidade, as forças da Arquimedes não atuam e, deste modo, sem a influência das forças de empuxo, a quantidade de movimento tende a ser aproximadamente constante ao longo do eixo de um jato. Nas plumas, por sua vez, a quantidade de movimento irá variar com a distância à origem e, numa análise dimensional feita da mesma forma como se fez para a velocidade u_x para o jato, encontra-se uma relação com a seguinte forma para a pluma (Fischer et al., 1979):

$$m = b_2 B^{2/3} x^{4/3} \quad (3.23)$$

onde b_2 foi determinado experimentalmente como 0,35 para plumas circulares. Do mesmo modo, para a vazão q , através da análise dimensional encontra-se:

$$q = b_3 B^{1/2} x^{5/3} \quad (3.24)$$

com b_3 determinado experimentalmente em 0,15.

A partir das duas últimas equações expostas encontra-se uma outra forma de representação da dinâmica das plumas, em uma equação semelhante à do jato (equação 3.19). Dividindo a equação 3.24 pela raiz quadrada da equação 3.23, encontra-se:

$$q = c_p m^{1/2} x \quad (3.25)$$

onde:

$$c_p = \frac{b_3}{b_2^{1/2}} = 0,254$$

c_p é denominado de coeficiente da pluma, análogo ao c_j do jato. Tem-se então que a vazão de uma pluma é dada por uma equação de forma similar à do jato, com a diferença de

que nesse é utilizado a quantidade de movimento inicial, M , enquanto que na pluma utiliza-se a quantidade de movimento local, m . Isto implica que, para grandes distâncias a partir da fonte em uma pluma, o fluxo q (e a diluição) aumenta num fator de potência de $5/3$ em relação a x , devido ao fato de que a quantidade de movimento está constantemente aumentando. Nos jatos, por sua vez, verifica-se que o fluxo q cresce somente com um fator de potência de 1 com relação a x , confirmando que a quantidade de movimento é conservada nestes casos.

Pode ainda ser encontrada uma forma de representar a vazão de uma pluma em termos somente do fluxo de empuxo, B , e da quantidade de movimento local, m , ocultando a dependência com a distância x . Dividindo a equação 3.25 pela 3.24 elevada na potência $5/4$, consegue-se eliminar o fator x e encontrar a seguinte relação:

$$R_p = \frac{qB^{1/2}}{m^{5/4}} \quad (3.26)$$

onde:

$$R_p = \frac{b_3}{b_2^{5/4}} = 0,557 \quad \text{é chamado de número de } \textit{Richardson} \text{ da pluma.}$$

3.4.3 Jatos com efeito de empuxo e sua análise dimensional

Ricou e Spalding (1961) trabalharam com a difusão de jatos axissimétricos turbulentos em meios com diferentes densidades. Os autores identificam como principais variáveis envolvidas no fenômeno a vazão mássica, \dot{m} , a quantidade de movimento, M , a massa específica do fluido injetado, ρ_0 , a massa específica do fluido do meio, ρ_1 , e a distância a partir da origem, x . Com estas variáveis é encontrado numa análise dimensional um grupo adimensional identificado pela constante K_I , a qual, a partir dos experimentos, é buscado o valor. K_I é apresentada com a seguinte forma:

$$\frac{\dot{m}}{x M^{1/2} \rho^{1/2}} = K_I \quad (3.27)$$

No trabalho realizam-se experimentos sob diferentes condições de densidades de injeção, ou seja, diferentes valores de ρ_1/ρ_0 com o objetivo de encontrar as alterações necessárias a se realizar na relação 3.27 de forma que esta consiga contemplar todo o

fenômeno. Ao final do trabalho são esboçadas conclusões sobre a existência de um comportamento duplo no fenômeno, ou seja, um comportamento para a região sob influência do jato e outro para a região sob influência de plumas.

Outra conclusão importante do trabalho anteriormente citado é a de apresentar uma relação entre a vazão local e a vazão inicial incluindo (comparando com a equação 3.4) a razão ρ_1/ρ_0 , relação esta que obteve uma excelente aproximação em todos os experimentos realizados, onde ρ_1/ρ_0 variou de 0,07 à 1. A equação tem a seguinte forma:

$$\frac{m}{m_0} = 0,32 \frac{x}{d_0} \left(\frac{\rho_1}{\rho_0} \right)^{1/2} \quad (3.28)$$

Abraham (1963) apresenta teorias e soluções numéricas para o equacionamento de jatos turbulentos injetados horizontalmente em ambiente com densidade diferente. Jatos com estas características e que são injetados em ambientes mais densos tem seu eixo curvado para cima devido a ação das forças de empuxo, sendo que as coordenadas x e y deste eixo dependem das seguintes variáveis:

s : distância medida a partir do orifício de saída ao longo do eixo do jato;

r : raio, distância medida a partir do eixo do jato;

d : diâmetro do orifício;

u : velocidade do fluido do jato na direção do eixo do jato;

u_0 : velocidade horizontal do fluido do jato em $s=0$;

ρ_0 : massa específica do fluido do jato em $s=0$;

$\rho_s - \rho_0$: diferença de massa específica entre o fluido do jato em $s=0$ e o meio;

x : coordenada horizontal medida a partir do orifício;

y : coordenada vertical medida a partir do orifício.

Após uma análise dimensional, convenientemente é possível agrupar-se os parâmetros adimensionais encontrados de forma a expressar a dependência das coordenadas x e y com as demais variáveis da seguinte forma:

$$\frac{x}{d} = f_1 \left(\frac{s}{d}, \frac{\rho_s - \rho_0}{\rho_0}, F_r, R_e \right) \quad (3.29)$$

$$\frac{y}{d} = f_2 \left(\frac{s}{d}, \frac{\rho_s - \rho_0}{\rho_0}, F_r, R_e \right) \quad (3.30)$$

onde:

F_d : número de Froude densimétrico, conforme a equação 3.5;

R_e : número de Reynolds, conforme a equação 3.3.

Da mesma forma, para expressar a velocidade u e a massa específica ρ , é possível escrever:

$$\frac{u}{u_0} = f_3 \left(\frac{s}{d}, \frac{r}{d}, \frac{\rho_s - \rho_0}{\rho_0}, F_r, R_e \right) \quad (3.31)$$

$$\frac{\rho_s - \rho}{\rho_s - \rho_0} = f_4 \left(\frac{s}{d}, \frac{r}{d}, \frac{\rho_s - \rho_0}{\rho_0}, F_r, R_e \right) \quad (3.32)$$

O termo do lado esquerdo da equação 3.32 é definido como sendo a concentração c do jato.

A curvatura do eixo do jato dependerá da magnitude do módulo de F_d . Para $|F_d| \rightarrow \infty$ o eixo do jato será uma linha reta horizontal e, para $|F_d| \approx 0$ o jato será dirigido verticalmente para cima logo após sua saída pelo orifício. Outra variável pertinente para se avaliar este jato é denominada de β , e representa o ângulo formado entre a tangente ao eixo do jato e o plano horizontal.

Abraham (1963) aplica o princípio da similaridade para obter a descrição do comportamento destes jatos. Este princípio aborda a relação linear existente entre o raio do jato com o afastamento da sua origem. Somente esclarece que para valores de $\beta \approx 0$ esta relação entre o raio e o afastamento é acrescida de até 10% com relação a $\beta \approx \pi/2$.

Baseado neste princípio da similaridade, verifica-se que um perfil que consegue descrever com boa aproximação o padrão de fluxo presente nos jatos mesmo com efeitos de empuxo, é o perfil Gaussiano (Tollmien, 1926 e Schmidt, 1941, apud Abraham, 1963), sendo que um adequado valor para os coeficientes deste perfil devem ser determinados experimentalmente. Assim, os perfis de velocidade e de concentrações são expressos por equações da seguinte forma:

$$\frac{u}{u_m} = e^{-k \left(\frac{r}{s} \right)^2} \quad (3.33)$$

$$\frac{c}{c_m} = e^{-\mu k \left(\frac{r}{s}\right)^2} \quad (3.34)$$

onde μ e κ são coeficientes dimensionais que adequarão este perfil ao padrão de fluxo presente. O sub-índice m indica o valor da variável no eixo do jato.

Para determinar os valores de u_m , c_m , β , além do comportamento evolutivo das coordenadas x e y perante a evolução de s , Abraham (1963) utilizou ainda as equações integrais da continuidade e da quantidade de movimento. Formulado todo um equacionamento teórico, realiza uma resolução numérica onde consegue então sumarizar seus resultados graficamente, conforme as figuras abaixo.

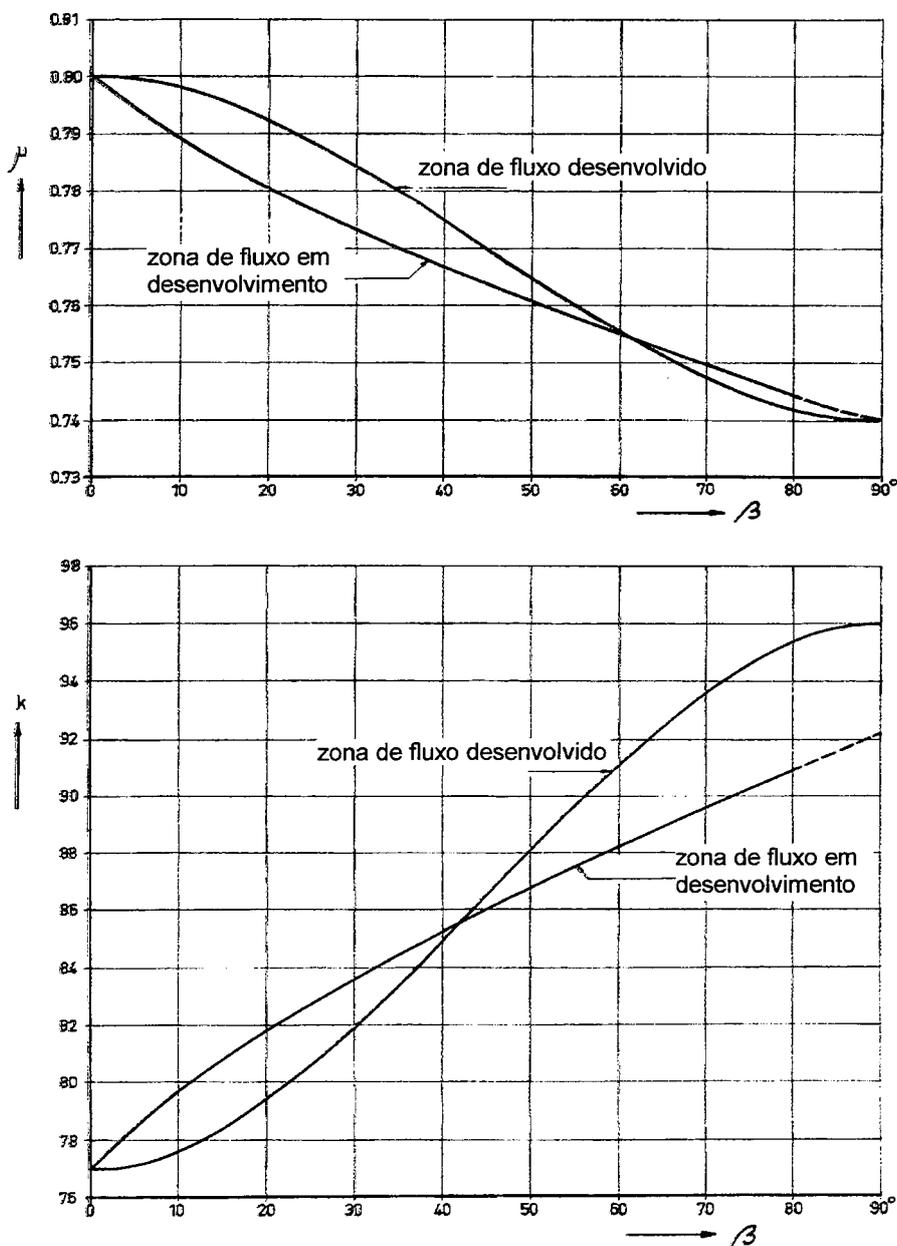


Figura 3.9 – Relação entre μ , κ e β para jatos tridimensionais (Abraham, 1963)

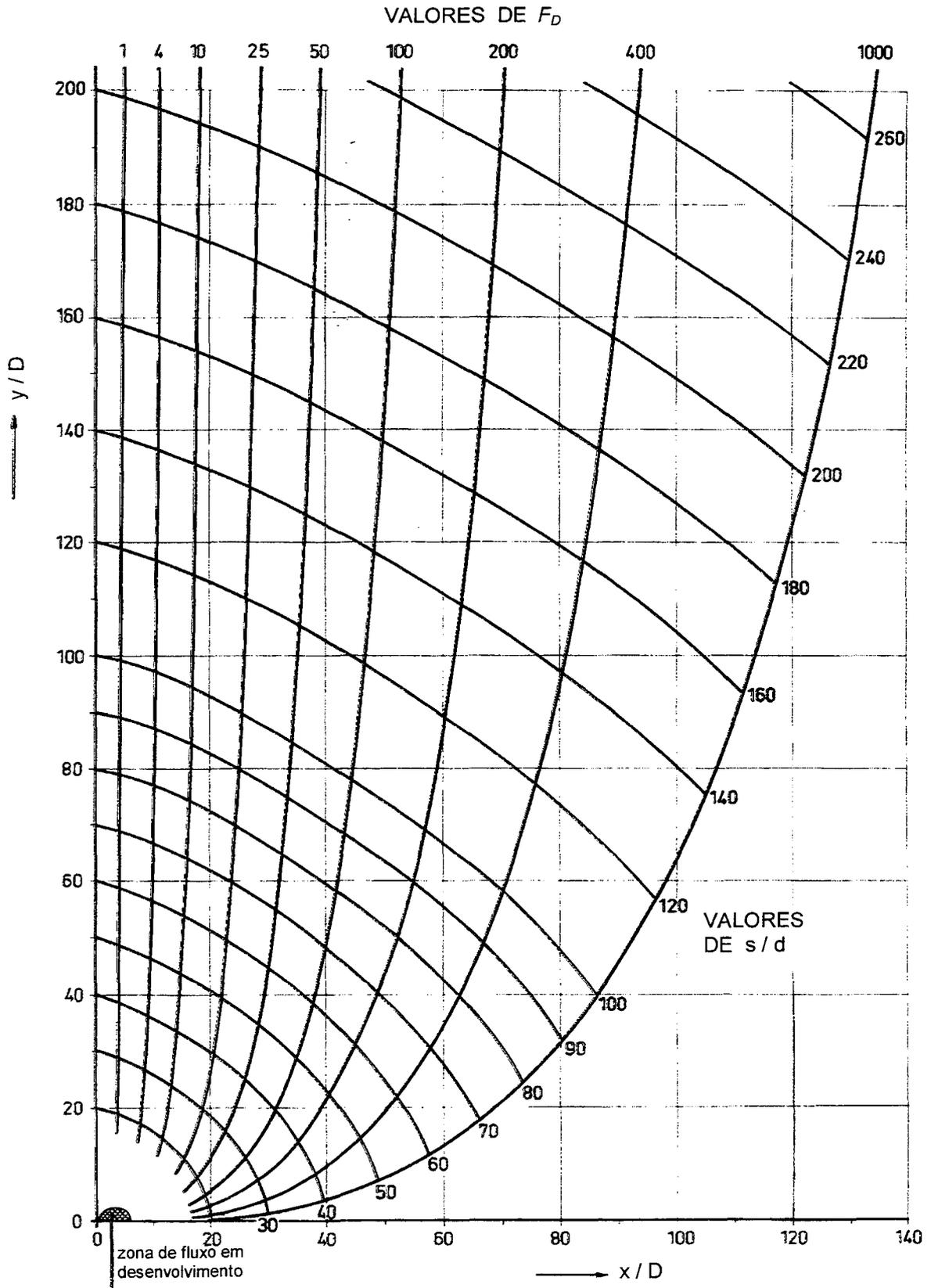


Figura 3.10 – Percurso do eixo de um jato tridimensional (Abraham, 1963)

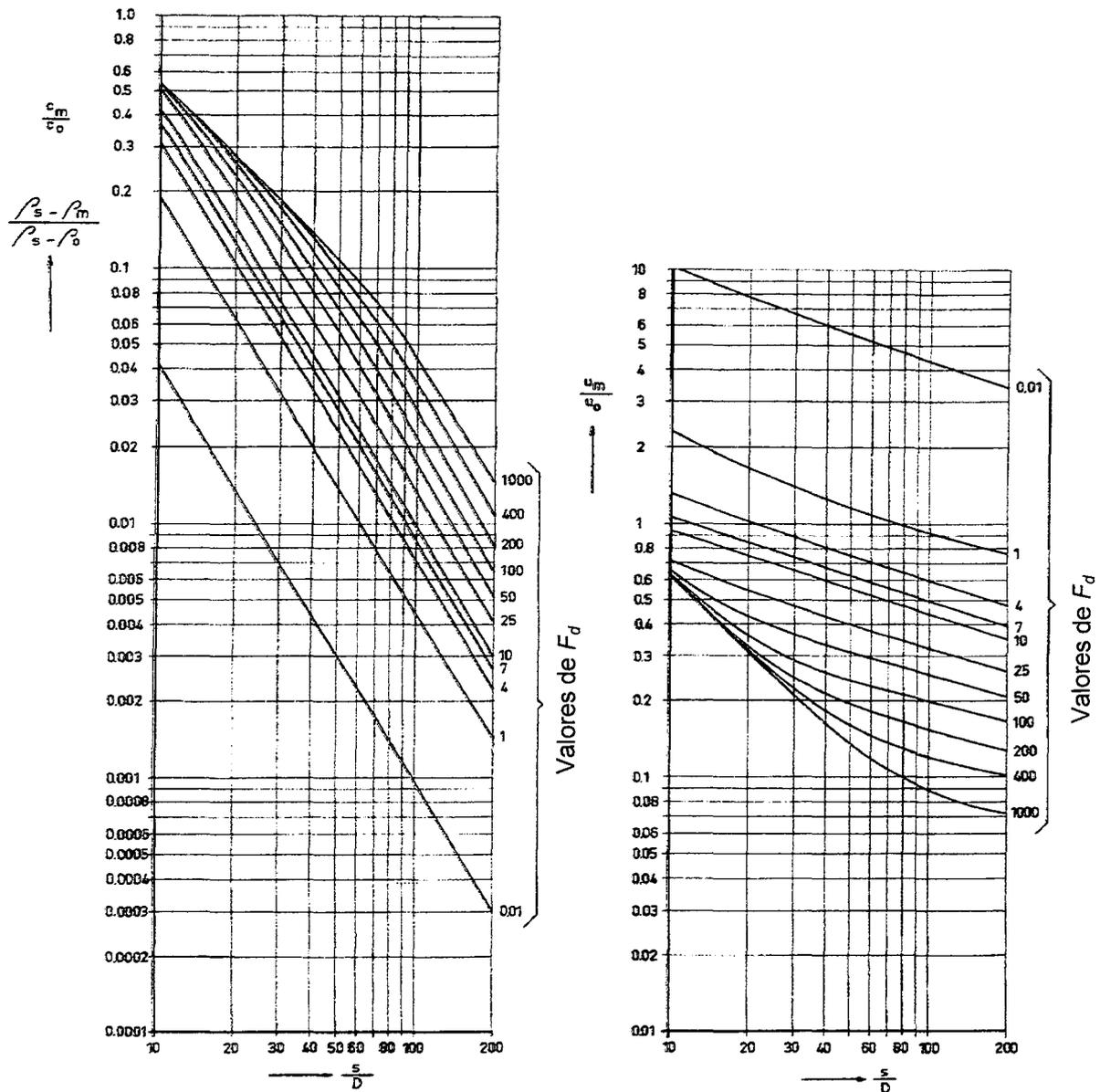


Figura 3.11 – Concentração e velocidade ao longo do eixo de um jato tridimensional (Abraham, 1963)

Como já descrito, jatos com efeito de empuxo podem, ou apresentar características mais semelhantes às de um jato puro, ou características mais semelhantes às de uma pluma. Assim, Fischer et al. (1979) analisa jatos verticais turbulentos sob efeito de empuxo apresentando como variáveis envolvidas a vazão, Q , a quantidade de movimento inicial, M , o fluxo de empuxo inicial, B e a distância a partir da origem, x . Além disto, tem-se o comprimento de escala característico L_Q que relaciona os efeitos de Q e de M desconsiderando B , ou seja, seria um grandeza representativa da região onde o jato sob efeito de empuxo apresenta características mais próximas às de um jato. Propõe outro comprimento de escala característico que relacione as variáveis M e B desconsiderando Q , de forma a encontrar uma grandeza representativa para a região onde as características de pluma dos jatos sob efeito de

empuxo se tornam preponderantes. Define, então o comprimento de escala característico L_M , dado por:

$$L_M = \frac{M^{3/4}}{B^{1/2}} \quad (3.35)$$

Considerando como grandezas fundamentais as variáveis: Q , M , B , x , L_Q e L_M , que por sua vez, são caracterizadas por duas dimensões fundamentais, $[L]$ e $[T]$, é possível em uma análise dimensional encontrarem-se 4 parâmetros adimensionais:

$$\begin{array}{ll} 1: & \frac{M^{1/2}x}{Q} = \frac{x}{L_Q} \\ 2: & \frac{B^{1/2}x}{M^{3/4}} = \frac{x}{L_M} \\ 3: & \frac{Bx^5}{Q^3} \\ 4: & \frac{L_Q}{L_M} \end{array}$$

A partir destes parâmetros adimensionais, Fischer et al. (1979) propõe formas para funções representativas da velocidade de jatos sob efeito de empuxo na direção vertical. Assim, tem-se que a velocidade u_x seria dada por uma relação do tipo:

$$u_x = \frac{M}{Q} f\left(\frac{x}{L_Q}, \frac{x}{L_M}\right) \quad (3.36)$$

onde f não seria uma função adequada para ser avaliada, pois ambos os parâmetros independentes envolvem uma mesma variável, x .

Para melhor avaliar uma solução para o problema, consideram-se condições limites. Assim, considerando um fluxo sem vazão inicial, Q , e somente com os fluxos M e B , encontra-se como expressão representativa da velocidade a seguinte:

$$u_x = \frac{B^{1/2}}{M^{1/4}} f\left(\frac{x B^{1/2}}{M^{3/4}}\right) \quad \rightarrow \quad u_x \frac{M^{1/4}}{B^{1/2}} = f\left(\frac{x}{L_M}\right) \quad (3.37)$$

Desta relação Fischer analisa suas condições limites para o caso de a distância x apresentar valores muito maiores ou muito menores do que L_m , estabelecendo que existem valores constantes que correlacionariam estas duas situações. Deste modo:

$$u_x \frac{M^{1/4}}{B^{1/2}} \rightarrow c_1 \left(\frac{M^{3/4}}{x B^{1/2}}\right) \quad \text{para} \quad x \ll \frac{M^{3/4}}{B^{1/2}} = L_M \quad (3.38)$$

$$u_x \frac{M^{1/4}}{B^{1/2}} \rightarrow c_2 \left(\frac{M^{3/4}}{x B^{1/2}}\right) \quad \text{para} \quad x \gg \frac{M^{3/4}}{B^{1/2}} = L_M \quad (3.39)$$

Fica evidenciada a importância da caracterização dos comprimento de escala L_Q e L_M e verifica-se que a razão x por L_M é o parâmetro de controle para identificar se jato com efeito de empuxo apresenta características predominantes de jato ou de pluma. Com $x \gg L_M$ o fluxo se desenvolve como e de uma pluma e com $x \ll L_M$, se desenvolverá como de um jato.

Considerando somente L_Q , tem-se que para valores de $x \gg L_Q$ o fluxo do jato está completamente desenvolvido, enquanto que para valores de $x \sim (L_Q = 0)$, o fluxo ainda sofre influências do orifício de saída. Assim, para valores de L_M da mesma ordem que L_Q , o fluxo pode ser considerado como uma pluma desde a sua saída do orifício.

O quarto grupo adimensional encontrado, L_Q/L_M , é chamado de *Número de Richardson do Jato*, R_i , assim definido:

$$R_i = \frac{L_Q}{L_M} = \frac{QB^{1/2}}{M^{5/4}} = \left(\frac{\pi}{4}\right)^{1/4} \left(\frac{g'_0 d_0}{U_0^2}\right) = \left(\frac{\pi}{4}\right)^{1/4} \frac{1}{F_d} \quad (3.40)$$

O número de *Richardson* apresenta valores entre 0 e 1, sendo que para escoamentos com R_i próximo à 0 tem-se um comportamento tipo jato, e para escoamento com R_i próximo à 1, o comportamento é mais semelhante ao de uma pluma.

Propostas as soluções assintóticas que permitem identificar as tendências de comportamento dos jatos sob efeito de empuxo, Fischer et al. (1979) estabelecem ainda valores adimensionais para caracterizar a vazão e distância a partir da origem para estes jatos. Fazendo uso dos coeficientes previamente identificados, c_p e R_p , e manipulando com as equações desenvolvidas ele apresenta:

$$\bar{q} = \frac{qB^{1/2}}{R_p M^{5/4}} = \frac{q}{Q} \left(\frac{R_0}{R_p}\right) \quad (3.41)$$

$$\zeta = \frac{c_p}{R_p} \frac{x}{L_M} = c_p \left(\frac{x}{L_Q}\right) \left(\frac{R_0}{R_p}\right) \quad (3.42)$$

Com estes dois parâmetros adimensionais a equação 3.19 que define a vazão no jato puro, adquire a seguinte forma:

$$\bar{q} = \zeta \quad \text{para} \quad \zeta \ll 1 \quad (3.43)$$

Da mesma forma, a equação 3.24 que define a vazão em uma pluma pura, fica:

$$\bar{q} = \frac{0,15 R_p^{3/2}}{c_p^{5/3}} \zeta^{5/3} = \zeta^{5/3} \quad \text{para} \quad \zeta \gg 1 \quad (3.44)$$

Estes dois últimos resultados plotados em um gráfico com escala logarítmica (Figura 3.12) apresentam um importante resultado para os jatos sob efeito de empuxo, pois é possível quantificar a diluição relativa proporcionada por este tipo de jato. Os diferentes valores de R_0/R_p plotados no mesmo gráfico, representam a zona de fluxo em desenvolvimento, sendo possível fazer conclusões como as de que para qualquer fluxo no qual $R_0/R_p \approx 0,5$, no final da zona de fluxo em desenvolvimento se tem uma pluma completamente desenvolvida.

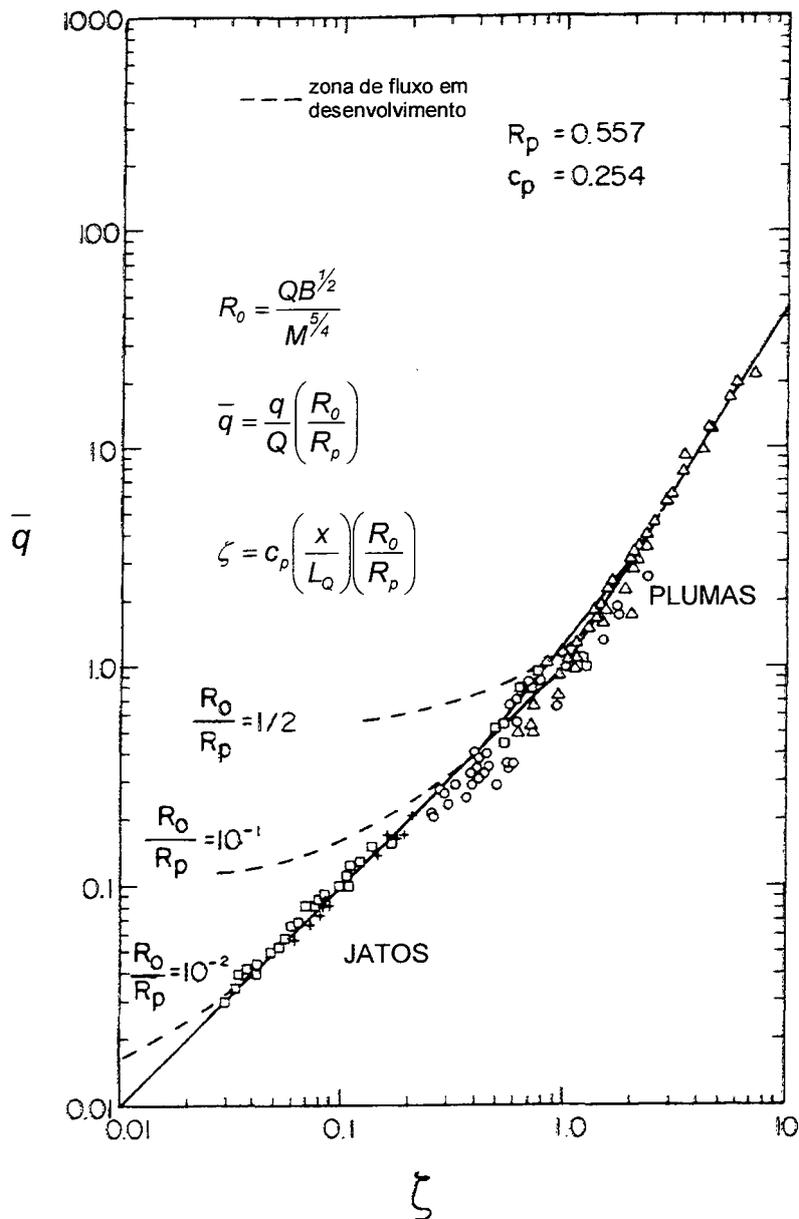


Figura 3.12 – Solução assintótica para a diluição em um jato circular turbulento na direção vertical sob efeito de forças de empuxo, comparado com os valores experimentais apresentados por Ricou e Spalding (1961). (Fischer et al., 1979).

3.5 Visualização de Fluxos

Tritton (1988), cita três diferentes métodos para visualização de fluxo: a introdução de corantes, a introdução de traçadores sólidos e técnicas ópticas a partir da variação do índice de refração do fluido pela alteração da massa específica do fluido associada a mudanças de temperatura e/ou concentração. Em experimentos com visualização de fluxos é extremamente necessário se estabelecer quais características se deseja observar. Os traçadores líquidos, geralmente mostram as linhas de fluxo. Os traçadores sólidos podem ser utilizados, por exemplo, sendo fotografados em intervalos de tempo suficientemente pequenos para gerarem informações sobre as estruturas de fluxo.

Como corantes apropriados para serem utilizados como traçadores líquidos introduzidos em fluxos de água, Tritton cita o permanganato de potássio, a violeta genciana e o azul de metileno. O permanganato de potássio possui a grande vantagem de proporcionar um ótimo contraste, mas pode conduzir a um indesejado incremento da densidade.

Werlé (1973) em um trabalho de revisão sobre a visualização de fluxos hidrodinâmicos, identifica na literatura, o uso de diversos tipos de traçadores. Dentre os traçadores líquidos ele cita o uso de leite condensado por Eden (1911 e 1912); leite diluído, ou melhor, uma mistura de leite, álcool, corante e água no qual a densidade e a viscosidade são as mesmas da água (por Werlé em 1958 e 1963); tinta (por Fage e Preston em 1941); solução de benzina com tetracloreto de carbono (por Macagno em 1969). Com relação aos traçadores sólidos, cita o uso de esferas de poliestireno (por Werlé em 1953 e por Roberson em 1955) como sendo muito utilizadas em água, pois sua densidade é levemente superior à da água. Também a utilização de partículas com formas lamelares apresenta bons resultados por tomarem diferentes orientações em diferentes regiões do fluxo, proporcionando a incidência de luz em diferentes direções daquelas onde serão feitas as observações; esta alternância de regiões claras e escuras possibilita a visualização das estruturas de fluxo. Limalha de alumínio também foi utilizada para visualização de fluxos, principalmente em fluidos viscosos (por Dupin em 1930).

Existe ainda a técnica de medida de velocidade por tomadas de imagens consecutivas de partículas, conhecida como *Particle Image Velocimetry* (PIV). Com esta técnica, o mapeamento do fluxo pode ser obtido através de medidas do deslocamento de partículas

sólidas, neutras aos efeitos de empuxo, originadas de tomadas de imagens consecutivas de um determinado fluxo (Gray, 1992)

O outro método de visualização de fluxo citado por Triton (1988) é o que usa a variação do índice de refração do fluido, mediante a variação de massa específica associada à alteração da temperatura e/ou concentração. É uma técnica recomendada para estudos de fenômenos de convecção e de fluidos estratificados. Baseia-se na observação da deflexão de luzes paralelas introduzidas no fluido onde existe variação do índice de refração deste.

4. METODOLOGIA

4.1 Caracterização do fenômeno

O foco principal desta pesquisa está na análise do comportamento hidrodinâmico da região de campo próximo de um Digestor Anaeróbio de Fluxo Ascendente. Esta região é responsável pelo ingresso da água residuária a ser tratada e caracteriza-se por um conjunto de orifícios de descarga distribuídos uniformemente ao fundo do reator com o objetivo de proporcionar uma adequada mistura entre a água residuária e a massa de bactérias anaeróbias presente no meio.

Esta adequada mistura deve se dar de tal forma a proporcionar uma perfeita homogeneização entre estes dois meios, sendo ainda desejável que isto ocorra o mais próximo ao fundo do reator, na região de campo próximo, evitando que se ultrapasse o manto de lodos, o que poderia vir a provocar a instabilização da região de campo longínquo. Esta instabilização é indesejada a medida que pode favorecer o carreamento de partículas sólidas de lodo junto com o fluxo ascendente, prejudicando o tratamento.

Existe, portanto, um ponto ótimo de mistura deste afluyente com o meio, que é aquele que proporciona uma adequada mistura sem atingir níveis de turbulência que agitem excessivamente o manto de lodo. Esta mistura será função de diversas características do sistema. Uma delas, sem dúvidas, está relacionada a condicionantes hidráulicas da estrutura, outra, é a presença de uma parcela gasosa resultante da digestão anaeróbia que contribui para a mistura entre os meios.

O que se observou na literatura é que a contribuição da parcela gasosa como fator para incrementar a mistura dos meios é pouco significativa quando se trata com efluentes pouco concentrados, como é o caso dos esgotos domésticos. Já em efluentes tipicamente industriais, onde existem altas concentrações de matéria orgânica, a existência desta parcela é de vital importância para a mistura, não podendo ser desconsiderada para o dimensionamento hidráulico do sistema, pois se poderia assim estar contribuindo para um excessivo grau de revolvimento do manto de lodos, fato que prejudica o tratamento.

As condicionantes hidráulicas da estrutura estão relacionadas principalmente com a forma do reator e com o sistema de distribuição do efluente, como o tipo de orifício de saída presente, sua forma, direção, quantidade, distribuição, distância a algum obstáculo, interação

com correntes produzidas por outras saídas, etc. Um dos fatores de maior importância nesta caracterização, está na diferença de densidades existente entre o fluido que está ingressando e o fluido presente no meio (líquido contendo bio sólidos), identificando a presença de um jato sob efeito de empuxo. É sobre este tipo de fluxo, o jato sob efeito de empuxo, que esta pesquisa irá tratar.

Diante das diversas variáveis que podem intervir na caracterização deste fenômeno, verifica-se a necessidade de condicionar algumas simplificações de modo a viabilizar seu estudo. Assim, ter-se-á uma análise mais genérica do fenômeno, mas que não deve implicar em alterações do comportamento do fluxo que realmente está ocorrendo. Estas simplificações impostas são identificadas e melhor detalhadas ao longo do texto.

4.2 O protótipo e o modelo

O presente trabalho foi desenvolvido em função de um modelo físico em escala reduzida de um DAFA, construído com o objetivo de se analisar o comportamento hidrodinâmico da estrutura. Este modelo (Figura 3.6) foi baseado em um reator (protótipo) existente e em funcionamento em um conjunto habitacional atendendo cerca de 12000 habitantes. Na foto abaixo (Figura 4.1) se tem uma vista geral da estação protótipo.



Figura 4.1 – Vista geral da Estação de Tratamento de Esgoto Parque da Matriz – Cachoeirinha/RS – CORSAN

Esta estação é composta por dois reatores DAFA construídos em concreto com seção transversal trapezoidal (Figura 4.2) e paredes inclinadas a 45°. Placas colocadas

transversalmente às paredes inclinadas, têm a função de separador de fases, distinguindo a zona de digestão da zona de decantação. A entrada do esgoto se dá pelo canal central na parte superior, onde o efluente é então devidamente 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 tranqüilo, onde o objetivo é de que as partículas de esgoto que ali chegarem, encontrem uma região que não permita a sua ascendência, sedimentando sobre esta placa e, por sua vez, quando em volume suficiente para vencer o atrito, escorreguem e retornem à zona de digestão. 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. Na representação esquemática da Figura 4.2, se tem uma melhor noção da forma e das principais dimensões deste reator.

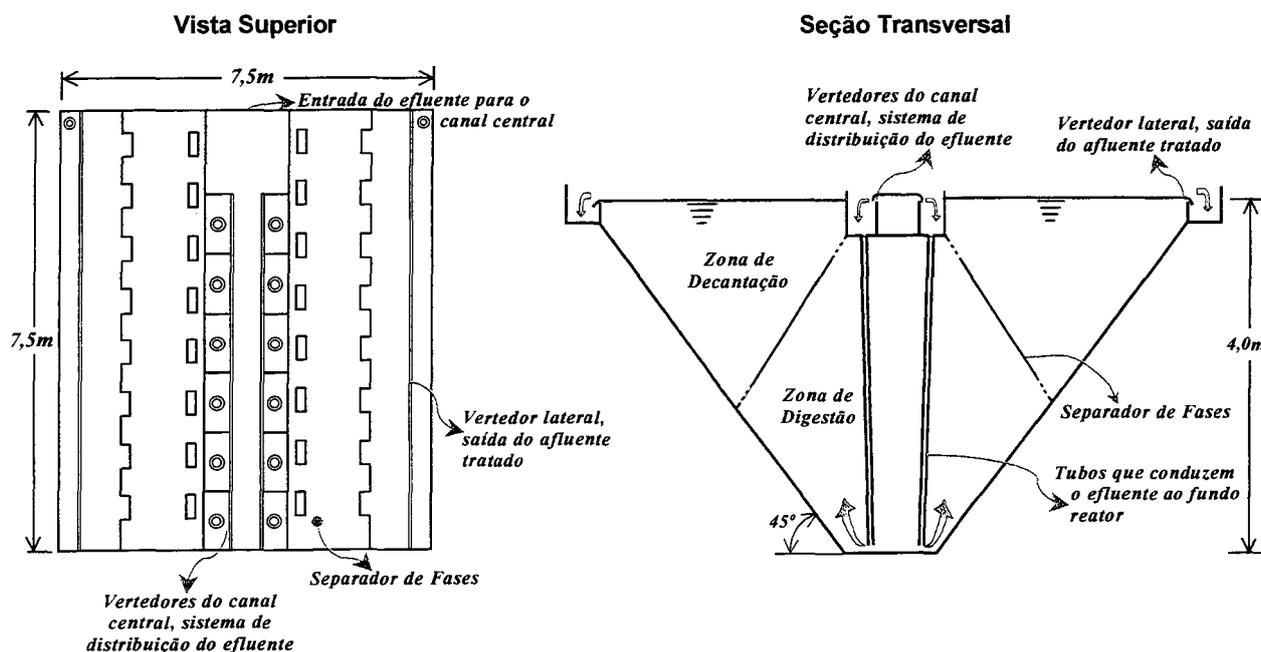


Figura 4.2 – Representação esquemática mostrando uma vista superior e um corte transversal do reator protótipo.

Particularmente foram diversas as razões que motivaram a escolha desta estação para se fazer a modelagem. A primeira seria a disponibilidade da mesma junto a Companhia de Saneamento (CORSAN – Companhia Riograndense de Saneamento) que então permitia o

monitoramento da estação; outra, seria o fato de tratar-se de uma geometria construtivamente econômica, pois existe a possibilidade de estrutura semelhante ser concebida com os taludes laterais em terra sem necessidade de uso de concreto ou qualquer outro meio estrutural.

O projeto e construção do modelo reduzido iniciou-se em 1997 (Gimenez et al., 1997). Com o projeto da estação em escala real, projetou-se o modelo reduzido em escala 1:5 preservando a visualização do escoamento com a utilização de chapas de acrílico transparente com 10mm de espessura em todas as suas faces. As placas representativas do separador de fases também são em acrílico. Os vertedores tanto do canal central de distribuição do efluente quanto os dos canais laterais de saída do líquido tratado, possuem partes móveis que facilitam o controle dos níveis de água na entrada e na saída. Os tubos que conduzem o efluente ao fundo do reator são de mangueiras plásticas semitransparentes (Figura 3.6).

4.3 Instrumentação aplicada ao modelo

O modelo, com um volume total em torno de $1,0m^3$, funciona em circuito fechado com um reservatório auxiliar que abastece o modelo, permitindo a recirculação total da água. Uma bomba centrífuga com $3/4HP$, controlada por um inversor de frequência, abastece o modelo a partir deste reservatório e, a possibilidade de passagem da água por dois rotâmetros independentes, permite o controle da vazão de entrada com uma precisão de $\pm 5\%$. Com relação aos rotâmetros, um opera na faixa de $0,0$ a $0,5\ell/s$ com variação de $0,05\ell/s$, e o outro na faixa $0,0$ a $0,1\ell/s$ com variação de $0,01\ell/s$.

A modelagem utilizou como fluido padrão a água, sendo que para a simulação de um meio com diferente massa específica, utilizou-se uma solução salina com esta água. Uma série de sondas colocadas a diferentes alturas a partir do fundo do reator permitem a leitura da condutividade do meio em um multímetro, sendo esta leitura associada a diferentes valores de massa específica simuladas através da solução com água e sal. A descrição deste equipamento, bem como a de sua calibração e aplicação específica ao estudo de reatores tipo DAFA é descrita na dissertação de Nassr (2000).

Ainda foram utilizados outros instrumentos para controle das características das águas de ensaio, como termômetros e densímetros flutuantes.

4.4 Análise dimensional

Verifica-se que a literatura apresenta estudos relativos a jatos sob efeito de empuxo, apresentando a análise dimensional necessária para se proceder este estudo e identificando os parâmetros adimensionais necessários para caracterizar este tipo de fenômeno sob determinadas condições (Ricou e Spalding, 1961, Abraham, 1963 e Fischer et al., 1979).

Todas as relações apresentadas no capítulo da revisão bibliográfica referentes à análise dimensional de jatos sob efeito de empuxo, são encontradas a partir de estudos de jatos isolados em meios estagnados, ou seja, não há influência de nenhum outro parâmetro no comportamento do fluxo deste jato. Já no caso dos jatos aqui estudados, existem outros fatores que podem influir no seu comportamento, fato este que não desmerece o uso daquelas equações como forma de representação do fenômeno básico que estará ocorrendo, podendo ocorrer algumas diferenças com relação às constantes numéricas apresentadas naquelas relações.

Abraham (1963) faz uma descrição bastante detalhada de todas as variáveis que podem intervir neste fenômeno e apresenta como principal parâmetro adimensional o número de Froude densimétrico do escoamento (equação 3.5), que nada mais é do que o número de Froude, que relaciona as forças de inércia com as forças gravitacionais, agora acrescido de fatores envolvendo termos de densidade para analisar a influência das forças de empuxo.

Fischer et al.(1979) apesar de fazerem um estudo mais restrito, somente analisando as variáveis para o caso de um jato vertical sob efeitos de empuxo, apresenta relações adimensionais importantes para a caracterização do comportamento destes jatos. Os comprimentos de escala característicos L_Q e L_M apresentados pelo autor (equações 3.12 e 3.35) são interessantes na medida que permitem identificar regiões onde as diferentes forças atuantes neste fenômeno, forças de empuxo e forças de inércia, são predominantes perante as demais. Além disso, o autor apresenta de forma mais consistente, o parâmetro adimensional dado pelo Número de Richardson inicial do jato (equação 3.40) como forma de identificar as tendências de comportamento deste jato sob efeitos de empuxo, ou seja, se ele se comporta mais como um jato puro ou mais como uma pluma pura.

O Número de Richardson (R_θ) apresentado por Fischer et al. (1979) apresenta as mesmas relações de grandezas envolvidas no Número de Froude (F_d) apresentado por Abraham (1963), sendo que R_θ é igual ao inverso de F_d multiplicado pelo fator $(\pi/4)^{1/4}$. Optou-

se por trabalhar com a notação apresentada por Fischer et al. (1979), pois esta se torna de compreensão mais intuitiva à medida que se sabe que seus valores deverão variar entre 0 e 1, além disso, pode ser facilmente correlacionado com os comprimentos de escala característico apresentados pelo mesmo autor, que, por sua vez, serviram para análise de diversos outros parâmetros já levantados pela literatura sobre o mesmo tema (apud Fischer et al., 1979).

As relações envolvendo as vazões apresentadas por Ricou e Spalding (1961) na equação 3.28, e Fischer et al. (1979) na equação 3.41, também são importantes, pois dão uma noção da diluição relativa do jato sobre o meio, relacionado com a sua localização.

Assim, da análise das principais variáveis intervenientes neste fenômeno, encontram-se como parâmetros adimensionais que devem ser observados para que se tenha um modelo hidrodinamicamente semelhante ao protótipo, os números de Reynolds, R_e , e de Richardson, R_i (equações 3.3 e 3.40).

A análise do número de Reynolds estabelecerá similitude entre faixas de operação do modelo e do protótipo relativas ao regime turbulento ou laminar, ou melhor, este número deve ser respeitado para garantir que se tenha o modelo trabalhando no mesmo regime que o protótipo. Especificamente sobre o tipo de estrutura e de processo que se está analisando, pode-se afirmar que é indesejável a presença de jatos em regime laminar, pois estes pouco contribuem para a eficiente mistura esperada nesta região do reator. Assim, tem-se que o número de Reynolds deve apresentar valores maiores do que 10^2 (capítulo 3.2) para que se possa garantir o regime turbulento para este jato.

$$R_e > 10^2 \Leftrightarrow \frac{Ud_0}{\nu} = \frac{4Q}{\pi vd_0} > 10^2 \quad (4.1)$$

No protótipo, o diâmetro do orifício é de 50mm, enquanto que no modelo, é de 10mm. Uma característica do esgoto que chega na Estação, é a de que cerca de 99,9% de sua composição nada mais é do que água. Assim, com relação a viscosidade cinemática, considera-se da mesma ordem de grandeza correspondente à da água a 20°C: $1 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$.

A segunda relação de semelhança que deve ser respeitada para que se obtenha a similitude no comportamento hidrodinâmico modelo versus protótipo é a que garante que em ambos tenhamos os mesmos números de *Richardson*, o que identificará a presença dos jatos com efeito de empuxo semelhantes nos dois sistemas. Assim, a semelhança dada pelo número

de *Richardson* do jato, determinará a adequada escala de vazões, e também a escala de massa específica, a serem testadas em modelo de forma a simular o jato que realmente estaria ocorrendo em uma outras escalas. Tem-se o seguinte:

$R_{0p} = R_{0m}$ onde os sub índices m e p referem-se à protótipo e modelo respectivamente. De acordo com a equação 3.40 esta relação resulta:

$$\frac{L_{Qp}}{L_{Mp}} = \frac{L_{Qm}}{L_{Mm}} \Leftrightarrow \frac{Q_p B_p^{1/2}}{M_p^{5/4}} = \frac{Q_m B_m^{1/2}}{M_m^{5/4}} \quad (4.2)$$

a qual para um orifício de forma circular e de acordo com as expressões dadas pelas equações 3.9, 3.10 e 3.11, resulta:

$$\left[\frac{g_0^{1/2} d_0^{5/2}}{Q} \right]_p = \left[\frac{g_0^{1/2} d_0^{5/2}}{Q} \right]_m \quad (4.3)$$

rearranjando:

$$\frac{Q_m}{Q_p} = \left(\frac{g'_{0m}}{g'_{0p}} \right)^{1/2} \left(\frac{d_{0m}}{d_{0p}} \right)^{5/2} \rightarrow \frac{Q_m}{Q_p} = \left(\frac{g_m \left(\frac{\Delta\rho_m}{\rho_{0m}} \right)}{g_p \left(\frac{\Delta\rho_p}{\rho_{0p}} \right)} \right)^{1/2} \left(\frac{d_{0m}}{d_{0p}} \right)^{5/2} \quad (4.4)$$

Considerando que tanto no modelo quanto no protótipo se tem os mesmos valores para a aceleração da gravidade e para a massa específica do jato ρ_0 , a equação 4.4 fica da seguinte forma:

$$\frac{Q_m}{Q_p} = \left(\frac{\Delta\rho_m}{\Delta\rho_p} \right)^{1/2} \left(\frac{d_{0m}}{d_{0p}} \right)^{5/2} \quad (4.5)$$

Verifica-se daí, como se dá a interdependência dos parâmetros vazão, Q , gradiente de massa específica, $\Delta\rho$, e o parâmetro correspondente à escala espacial, o diâmetro do orifício d_0 . De posse desta relação e conhecendo-se o valor dos diâmetros no modelo e no protótipo, é possível inferir-se na equação 4.5 diferentes valores para o gradiente de massa específica e determinar as vazões resultantes no modelo, ou vice versa.

4.5 Traçadores

Foram diversas as tentativas para se encontrar um adequado material traçador, sólido ou líquido, que permitisse uma adequada visualização do fluxo no reator. Buscava-se além de um material que não influísse no comportamento do fluxo, algo que possibilitasse a captura da imagem para posterior tratamento.

Dentre os materiais traçadores sólidos testados, citam-se o pó de café, resíduos de borracha, resinas plásticas, purpurina, micro esferas de vidro, dentre outros; sendo que o melhor material encontrado foi um polímero, o estireno-butadieno, conhecido comercialmente como S6-H. Este, se apresenta sob a forma de pequenas partículas irregulares, com densidade muito próxima a da água, e seu comportamento com relação ao fluxo foi considerado satisfatório para se proceder a visualização de escoamentos. O único empecilho encontrado com relação à utilização deste material ocorre quando da captura e tratamento das imagens geradas, que não apresentaram uma adequada resolução. Isto devido à limitação dos equipamentos e sistemas de iluminação que se dispunham para proceder-se a pesquisa. É necessário um sistema de iluminação bastante intenso e concentrado e/ou um equipamento de captura bastante sensível em ambientes pouco iluminados para se obter bons resultados com este traçador. Ele parece bastante adequado para a utilização em sistemas PIV (*Particle Image Velocimetry*), onde com um feixe de *laser* seria possível criar-se um plano de luz bem definido e com intensidade suficiente para se proceder um captura com melhores condições.

Com relação a traçadores líquidos, testaram-se materiais como o permanganato de potássio e diversos outros corantes, sendo que a condição de visualização do fluxo não foi considerada satisfatória com o uso destes materiais, pois se diluem muito facilmente ao meio, não permitindo o acompanhamento das correntes mais turbulentas. Encontrou-se, no entanto, o adequado material traçador em uma solução a base de tinta PVA (poli vinil acrilato).

A tinta PVA diluída em água e acrescida de álcool permitiu a obtenção de um excelente material traçador, com densidade controlada e bastante permanente em meio turbulento, permitindo o acompanhamento da evolução tanto de jatos quanto de plumas. A base em tinta PVA possui densidade muito maior do que a da água, portanto sua diluição em água termina por aumentar a densidade desta mistura. É com o uso do álcool, material com densidade inferior a da água, que se consegue o controle desta característica. Além disso, é possível conferir cor a este material, simplesmente acrescentando corante específico para

tintas PVA. Este material foi o que melhor se comportou com relação a captura e tratamento das imagens geradas com os meios que se dispunham.

Utilizou-se para a pesquisa esta mistura de tinta PVA e água numa proporção de 8%, ou seja, para cada 8ml de tinta PVA utilizou-se 1l de água, isto para se encontrar uma solução que não apresentasse densidade muito diferente a da água e que garantisse a quantidade de tinta necessária para se promover a visualização. A quantidade de álcool não era exatamente fixa, variava em torno de 1% com relação a mistura de tinta e água. O controle era feito com o uso de um densímetro flutuador conduzindo a mistura final à densidade desejada. Não utilizou-se nenhum corante, pois a cor branca original da base PVA, demonstrou ser a mais conveniente para o tratamento das imagens adquiridas.

4.6 Sistema de aquisição e tratamento de imagens

Para possibilitar a análise dos ensaios previstos para o modelo utilizaram-se técnicas de visualização do escoamento por meio da captura de imagens. Esta captura deveria ser de forma prática e ágil, permitindo certa facilidade quando da repetição dos ensaios. Optou-se pelo uso de câmeras filmadoras tipo VHS que, fixadas em dada posição, permitiam uma adequada tomada das imagens que melhor demonstravam o comportamento do jato.

As câmeras utilizadas foram duas *Panasonic Omni Movie Color* –, onde as imagens são armazenadas em fitas VHS T-120 coloridas no formato padrão NTSC (*National Television Standards Commission*). Uma das câmeras foi posicionada de modo a fazer uma tomada lateral do jato saindo pelo orifício, e a outra fazendo uma tomada superior deste mesmo jato, sendo que esta segunda tomada não era possível de se realizar totalmente de topo com relação ao jato devido a obstrução da visualização causada pelo canal de distribuição central. As câmeras eram sempre colocadas em uma mesma posição relativa com o modelo, fixando-se também a distância focal das mesmas, de modo a permitir uma certa padronização com relação as dimensões espaciais visualizadas nas imagens em vídeo.

As gravações foram feitas utilizando as opções da câmera em foco manual, e o tempo de abertura do obturador fixado em 1/500. O foco manual se fez necessário utilizar visto que, em meio líquido, os sensores de foco automático destes tipos de equipamento se confundem, pois não conseguem identificar a real distância entre a câmera e o objeto que se deseja capturar, fazendo variar constantemente o foco a este objeto. O tempo de abertura do

obturador fixado em 1/500, foi devido ao fato de que este tipo de câmera somente possui três possibilidades de ajustes neste item: automático, 1/500 e 1/1000. Na opção automático, verificaram-se problemas com relação a variação nas intensidades de cor apresentadas pelas imagens capturadas, principalmente quando se observava a saída de tinta branca pelo orifício. Ambos os valores fixos possíveis de se selecionar para a filmagem são demasiadamente altos, exigindo uma iluminação mais intensa do ambiente para uma adequada captura, assim, teve que se optar pelo valor menor, 1/500.

Foi necessário a criação de um ambiente de iluminação adequada para proceder as filmagens. Construiu-se uma estrutura metálica coberta com lonas plásticas de cor preta para impedir o ingresso de qualquer iluminação externa que viesse a provocar reflexos na estrutura de acrílico, pois estes reflexos eram facilmente capturados pelas câmeras, prejudicando a visualização desejada do jato. Utilizou-se para a iluminação um conjunto de 4 lâmpadas halógenas de 1000 Watt cada uma, o que permitiu uma visualização satisfatória mesmo com o tempo de abertura do obturador fixado em 1/500. O posicionamento destas lâmpadas dentro do ambiente de ensaio, tiveram de ser cuidadosamente identificados de forma a também não produzirem reflexos que prejudicassem as tomadas de imagem.

Nas faces externas da estrutura, opostas aos planos de filmagem, colocaram-se anteparos em papel preto com o objetivo de contribuir para a eliminação de eventuais reflexos indesejados e também para melhorar o contraste com o material traçador, de cor branca, nas imagens adquiridas. Junto com este anteparo, colocou-se também, em posição adequada, uma escala de referência composta por uma seqüência de quadrados justapostos de 1cm de lado, um branco e um preto. O objetivo de uso desta escala é de permitir a calibração das imagens posteriormente adquiridas, pois se possui valores de referência tanto para medidas espaciais, de comprimento e largura, quanto para intensidades de cores, em branco e preto, que serão conhecidas e gravadas com cada ensaio.

As tomadas de imagens em vídeo foram digitalizadas com o uso de uma placa de captura de vídeo para posterior editoração. A placa utilizada foi uma *Wave Watcher TV-PCI* que, com o uso do programa que a acompanha, *Video Capture* da *Ulead-Media Studios*, permite o armazenamento dos vídeos no computador em um formato de arquivo de vídeo digitalizado AVI (*Audio Video Interleave*), compatível com diversos programas de tratamento de vídeo e imagens. O formato de arquivo AVI faz o armazenamento de diversos quadros de imagens em seqüência ordenada, gerando assim o que se denomina um vídeo digitalizado.

Com o mesmo programa da placa de captura de vídeo, é possível, depois de gerado o arquivo de vídeo digitalizado, extrair quaisquer quadros desejados, gerando arquivos de imagens em formatos como o TIFF (*Tagged-Image File Format*), utilizado neste trabalho.

Devido a instabilidades do conjunto *hardware/software* utilizados neste processo de transformação dos dados de um meio analógico para um digital, houve necessidade de utilizar um sistema com a seguinte configuração: processador AMD-K6II, 128Mb de memória RAM, disco rígido de 6,4Gb/UDMA, adaptador de vídeo AGP-Pro/8Mb e Windows 98. Este conjunto de características do equipamento permitiu que se procedesse 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 de imagem, utilizou-se o programa *UTHSCA ImageTool (IT)*, desenvolvido no *Health Science Center* da Universidade do Texas em *San Antonio*, Estados Unidos da América, obtido gratuitamente através do endereço na *Internet*: “<http://macorb.uthscsa.edu/dig/itdesc.html>”. Este programa possui uma série de funções de manipulação e tratamento de diversos tipos de arquivos de imagem.

4.7 Descrição do experimento

Foi realizado uma primeira série de ensaios em modelo sem considerar as diferenças de massa específica. Estes serviram para demonstrar visualmente (qualitativamente) a diferença no comportamento de jatos para uma mesma vazão, com e sem a estratificação aplicada. As vazões aplicadas nestes ensaios foram $0,08\ell/s$, $0,11\ell/s$ e $0,15\ell/s$, sendo estas simplesmente escolhidas de forma ilustrativa permitindo a comparação com as vazões determinadas para os ensaio com estratificação.

Para os ensaios com estratificação, identificou-se sob quais valores limites deveria se ensaiar. Como a relação de escalas geométricas entre os diâmetros do orifício no modelo e no protótipo são conhecidas, foram a vazão e a diferença de massa específica as variáveis de controle para a modelagem.

As principais características conhecidas do protótipo necessárias para se proceder a modelagem são a seguir descritas. O mesmo é composto por um grupo de 12 jatos dispostos como na Figura 4.3, sendo a vazão total de entrada igualmente dividida entre estes.

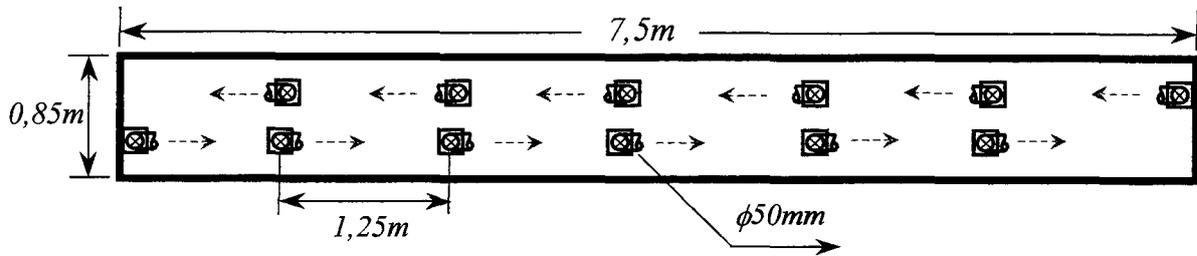


Figura 4.3 – Vista superior mostrando a disposição dos jatos no fundo do Reator protótipo.

A vazão total no protótipo é dada de acordo com o tempo de retenção hidráulica (TRH) e o volume da estrutura, na forma da equação 3.1. Com um volume total de $130m^3$, e TRHs variando na faixa de $9h$ a $3h$, resulta que as vazões totais de entrada no protótipo variam entre $4\ell/s$ a $12\ell/s$ que, por sua vez, para cada jato ($\div 12$) varia entre $0,33\ell/s$ e $1,00\ell/s$. Com estes valores e de posse de outras características fixas, bem como de alguns valores adotados, foram analisadas outras características do protótipo com o objetivo de auxiliar o delineamento dos ensaios em modelo. A Tabela 4.1 resume estes resultados obtidos.

Tabela 4.1 – Parâmetros característicos do protótipo

TRH (h)	Q_t (ℓ/s)	Q_j (ℓ/s)	V (m/s)	M ($\times 10^{-4} m^4/s^2$)	B ($\times 10^{-4} m^4/s^3$)	Reynolds	L_Q (cm)	L_M (cm)	Richardson
9	4,01	0,33	0,17	0,57	0,72	8500	4,43	7,71	0,58
3	12,04	1,00	0,51	5,12	2,17	25500	4,43	23,13	0,19

Obs: os sub índices "t" e "j" significam "total" e "por jato" respectivamente e todos as variáveis em que não aparecem nenhum sub índice, deve-se entender estarem referenciadas "por jato".

As velocidades foram calculadas na forma da equação 3.9, considerando que os orifícios de saída apresentam forma circular com diâmetro $D_p=50mm$. A quantidade de movimento específica, M , foi determinada de acordo com a equação 3.10.

A variabilidade da massa específica no reator, de acordo com medições realizadas no protótipo (Nassr, 2000), apresenta um valor médio de $1020kg/m^3$ para o fluido no fundo do reator (ρ_p), ou seja, para o fluido no qual o jato incidirá logo após sua saída pelo orifício. Para a massa específica do jato (ρ_{op}) considera-se o fato de que 99% da composição de um efluente doméstico é composto de água e que, portanto não existem grandes variabilidades com relação à massa específica da água, assim, considerou-se para a massa específica do jato o valor de $\rho_{op}\approx 998kg/m^3$, correspondente à da água em temperatura de $20^\circ C$. Assim, admitindo-se a aceleração da gravidade local em $g=9,81m/s^2$, tem-se $g'_{op}=0,216m/s^2$ (equação 3.11) que com as faixas de vazões dadas, calcularam-se os fluxos de empuxo específico, B , apresentados na Tabela 4.1.

Para a determinação dos números de *Reynolds* (equação 3.3), considerou-se a viscosidade cinemática correspondente também a da água à 20°C, $\nu=1 \times 10^{-6} \text{m}^2/\text{s}$.

O comprimento de escala característico L_Q de acordo com a equação 3.13 apresenta valor único e dependente somente de características geométricas dada pelo diâmetro do orifício. Já os comprimentos característicos L_M foram identificados de acordo com a equação 3.35. Assim, e de acordo com a equação 3.40 foram determinados os números de *Richardson* do jato para o protótipo

Com relação ao modelo, a Figura 4.3 é exatamente válida com a redução em 5 vezes de todas as escalas indicadas. A determinação das vazões e da diferença de massa específica para os ensaios foram valores que procuraram estabelecer-se entre os limites disponíveis dados pela instrumentação existente, bem como deveriam ser controlados pelo número de *Richardson* calculado para cada situação de ensaio.

Um meio com massa específica diferente àquela do jato foi simulada com o ingresso de uma solução salina ao fundo do reator, onde misturando-se cerca de ½kg de sal em 2 litros de água, foi possível alcançar diferenças de massa específica variando entre 5 a 20 unidades.

Sendo a vazão o parâmetro de mais simples controle no modelo, através do uso dos rotâmetros em conjunto com o inversor de frequências, este foi escolhido como valor a fixar para cada ensaio. Tomou-se a faixa de trabalho identificada no protótipo (Tabela 4.1) para calcular a faixa de trabalho para o modelo (equação 4.5), aplicando variações de massa específica dentre as possíveis de serem consideradas. A tabela abaixo resume estes resultados.

Tabela 4.2 – Determinação da faixa de trabalho para o modelo

$\Delta\rho_m$ (kg/m^3)	Q_{jp} (ℓ/s)	Q_{tm} (ℓ/s)	Q_{jm} ($\times 10^{-3} \ell/\text{s}$)	V ($\times 10^{-2} \text{m}/\text{s}$)	M ($\times 10^{-8} \text{m}^4/\text{s}^2$)	B ($\times 10^{-8} \text{m}^4/\text{s}^3$)	<i>Reynolds</i>
5	0,33	0,034	2,81	3,583	10,08	13,83	358
	1,00	0,102	8,53	10,86	92,60	41,91	1086
10	0,33	0,048	3,98	5,067	20,17	39,12	507
	1,00	0,145	12,1	13,56	185,2	118,6	1535
15	0,33	0,059	4,87	6,206	30,25	71,87	621
	1,00	0,177	14,8	18,81	277,8	217,8	1880
20	0,33	0,068	5,63	7,166	40,34	110,7	717
	1,00	0,205	17,1	21,72	370,4	335,3	2171

O comprimento de escala característico L_Q para ambas as vazões é de 0,89cm. Já o valor do comprimento de escala característico L_M para a vazão de 0,33ℓ/s é de 1,52cm e para a vazão de 1,00ℓ/s é de 4,61cm. Os números de *Richardson* do jato no modelo, de acordo com

a equação 3.40, para cada vazão, respectivamente são: 0,58 e 0,19; iguais aos do protótipo, como era de se esperar.

As duas tabelas de dados anteriores (Tabelas 4.1 e 4.2) servem então para identificar as principais características do protótipo e do modelo, interligando as duas estruturas através do uso da relação adimensional (equação 3.40) representativa do fenômeno em evidência e permitindo estabelecer as faixas de ensaio para o modelo. Desta forma, analisando a quarta coluna da Tabela 4.2, Q_m , que representa a vazão total de entrada no modelo, escolheram-se as faixas de vazões para ensaio. A escolha destas vazões foram vinculadas aos valores de massa específica relacionadas na mesma tabela, apesar de que, na prática, não se consegue fixar exatamente aqueles valores, mas sim iniciar o ensaio em torno do valor desejado e então proceder a leitura das sondas que indicarão o real valor no momento do ensaio.

Numa primeira bateria de ensaios, escolheram-se vazões entre as diferenças de massa específica de 5kg/m^3 e 10kg/m^3 , visto que estas são mais fáceis de se alcançar em modelo. Para a faixa de 5kg/m^3 , ensaiou-se para as vazões de $0,05\text{ℓ/s}$ e $0,11\text{ℓ/s}$; e para 10kg/m^3 , as vazões de ensaio foram as de $0,05\text{ℓ/s}$, $0,08\text{ℓ/s}$ e $0,15\text{ℓ/s}$. Estes valores inteiros para a vazão são adequados para facilitar o controle e a leitura nos rotâmetros. Cada um destes cinco ensaios foram repetidos 3 vezes, permitindo verificar a repetibilidade dos ensaios.

Ao longo destes ensaios preestabelecidos, verificou-se uma certa consistência no comportamento das repetições e, assim, decidiu-se realizar ensaios para diferentes vazões sem repeti-los, de forma a contemplar uma faixa maior de funcionamento, ou seja, extrapolar a simulação em modelo contemplando diferentes tempos de retenção hidráulica para um protótipo. Além disto, este incremento de vazão pode ser encarado como a aplicação de diferentes taxas de recirculação ao sistema, fato que vem sendo analisado em pesquisas recentes sobre o tema onde, através da aplicação de diferentes taxas de recirculação é avaliada a eficiência do tratamento. A Tabela 4.3 resume o plano de ensaios aplicados no modelo.

Os procedimentos de ensaio eram realizados de forma sistemática, tentando minimizar diferentes condições possíveis entre os mesmos, principalmente entre aqueles realizados em dias diferentes. No início de uma série de ensaios se realizava primeiramente a preparação do material traçador e antes de cada um dos ensaios se preparava a solução de água e sal. As câmeras e o sistema de iluminação eram cuidadosamente locados, com o

objetivo de reduzir as diferenças das condições de iluminação e da localização das tomadas de imagem entre um ensaio e outro.

Tabela 4.3 – Plano de ensaios no modelo

$\Delta\rho$ (kg/m ³)	Q_{mi} (ℓ/s)	Q_{pt} (ℓ/s)	TRH_p (h)
5	0,05*	5,86	6,16
	0,11*	12,90	2,80
	0,18	21,11	1,71
	0,36	42,21	0,86
10	0,05*	4,15	8,71
	0,06	4,97	7,26
	0,07	5,80	6,22
	0,08*	6,63	5,44
	0,09	7,46	4,84
	0,10	8,29	4,36
	0,11	9,12	3,96
	0,12	9,95	3,63
	0,13	10,78	3,35
	0,14	11,61	3,11
	0,15*	12,44	2,90
	0,24	19,90	1,81
	0,48	39,80	0,91

* Ensaios repetidos 3 vezes.

Para cada ensaio primeiramente se estabelecia a vazão no modelo e aguardava-se certo tempo para que o fluxo se estabilizasse por todo o reator, após isto, se fazia o ingresso da solução salina pelo canal central de distribuição e, devido ao fato desta solução ser mais densa do que o meio, ela era conduzida até o fundo do reator onde então se criava um “manto” com massa específica diferente do restante do reator. Este manto ia sendo então diluído pela água que continuava circulando no modelo e, assim, se expandia vagarosamente dentro do reator. O valor exato da massa específica presente no fundo devido à presença desta solução salina era monitorado continuamente e quando este valor atingia as proximidades do desejado, procedia-se o ensaio.

O ensaio propriamente dito era caracterizado pelo ingresso do material traçador também pelo canal central de distribuição do efluente que então se dirigia até o fundo. O sistema de iluminação e as câmeras eram acionados para proceder a filmagem, sendo que em média esta filmagem durava cerca de 30 segundos. Todos os procedimentos e as condições de cada ensaio eram devidamente anotadas. Estas condições referidas eram a vazão, a leitura das

sondas condutivímetras, massa específica da água do ensaio, dentre outras relacionadas às condições de filmagem, que pudessem vir a influenciar em algum tratamento posterior.

Realizada a tomada de imagem, o ensaio estava encerrado, descartava-se toda a água do reator, procedia-se a limpeza do mesmo e então o seu reenchimento com água limpa para realizar o próximo ensaio.

4.8 Captura e tratamento das imagens

Como referência de tempo para os ensaios considerou-se como tempo inicial o momento que precedia a primeira ejeção do material traçador pelo orifício, sendo o quadro imediatamente anterior àquele em que se observava o primeiro vestígio de material traçador, considerado como o quadro inicial (tempo zero).

Com o arquivo de vídeo não é possível realizar análises, sendo necessário separar os quadros de interesse que melhor representassem a evolução do jato para uma dada vazão, armazenado-os em arquivos de imagem *TIFF* que possibilitam seu tratamento. Para a extração destes quadros foi necessário adotar um critério padrão que permitisse capturar adequadamente a evolução no tempo de cada jato independentemente da vazão. Pois, se para todos os ensaios fossem capturados os quadros para um mesmo intervalo de tempo, como parece ser mais intuitivo, em certos casos de vazão não seria possível visualizar a evolução do jato adequadamente devido ao fato de que o intervalo de tempo em que se visualiza todo o fenômeno diminui a medida em que a velocidade do jato, ou seja, a vazão, aumenta.

Para a vazão total em modelo de $0,05\ell/s$ e com um $\Delta\rho$ de $10\text{kg}/\text{m}^3$, ou seja, para a situação em que mais se tornam preponderantes e visíveis os efeitos de empuxo, se fez a primeira extração dos quadros adotando um critério que permitisse acompanhar adequadamente a evolução do mesmo. O resultado foi obtido com a captura de quadros a cada 2 segundos após o inicial, ou seja a cada 50 quadros, pois o arquivo de vídeo possui 25 quadros por segundo. Foram gerados assim 9 arquivos de imagem a partir deste ensaio, 8 representando a evolução do jato ao longo do tempo e 1 correspondente a um tempo anterior à saída do jato pelo orifício, imagem esta que será utilizada durante o tratamento (Figura 4.4).

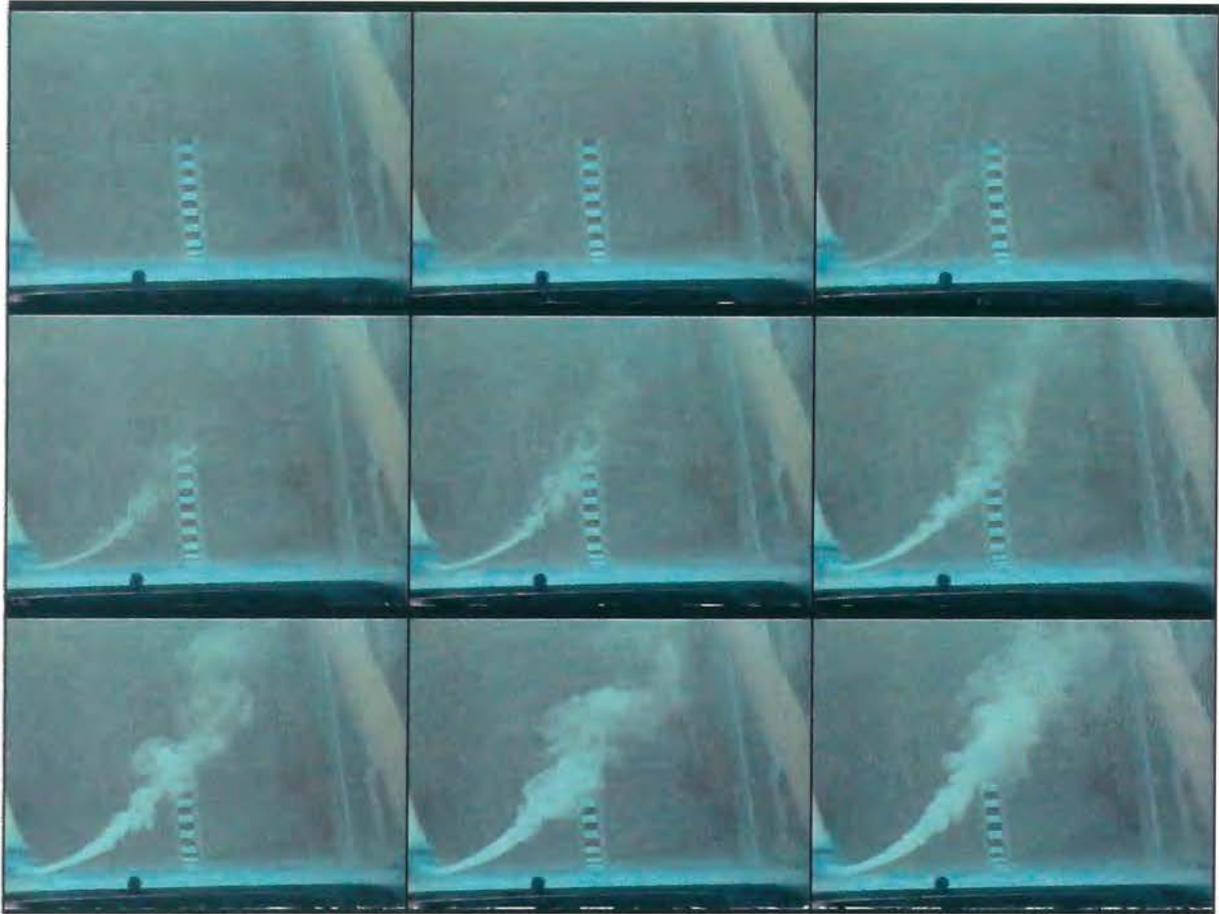


Figura 4.4 – Evolução do jato em imagens seqüenciais extraídas do arquivo de vídeo digital com um intervalo de 2 segundos, correspondente ao ensaio para $Q=0,05\ell/s$ e $\Delta\rho=10\text{kg}/\text{m}^3$, considerado como “padrão” pois apresenta valores onde os efeitos de empuxo são mais importantes.

Para as demais vazões se adotou um critério de redução do intervalo de quadros a serem capturados baseado na vazão do ensaio correspondente e a vazão do ensaio padrão descrito no parágrafo anterior. Este intervalo de quadros era assim determinado:

$$\text{Intervalo de quadros} = \text{Intervalo do 1º ensaio} (2s) \times \frac{\text{Vazão do 1º ensaio} (0,05\ell / s)}{\text{Vazão do ensaio em questão}} \quad (4.6)$$

Com os arquivos de imagem gerados utilizou-se o programa *Image Tool (IT)* para se proceder uma manipulação de forma a melhor adequar estas imagens à visualização e à extração de dados. As nove imagens foram primeiramente armazenadas em “pilhas” no programa *Image Tool*, estas “pilhas” (*stack*) são arquivos que permitem o armazenamento de imagens em seqüência. Sobre cada pilha aplicou-se uma transformação da imagem para escala de cinzas (*color to gray-scale*), pois as informações de cores adquiridas com as imagens não

se faziam necessárias para o tratamento e, além disto, imagens em escalas de cinzas compõem-se de um número menor de informações, facilitando seu tratamento.

Cada um dos ensaios, ou melhor cada uma das pilhas foi calibrada com relação as suas dimensões de comprimento e largura (*measurement calibrate*). Com o auxílio da escala de dimensões conhecidas fixada no modelo e capturada junto com o vídeo, foi possível identificar em cada imagem gerada as reais dimensões percebidas na tela do computador. Este é um recurso que facilita manipulações das imagens que visem extrair resultados baseados nestas dimensões.

A primeira imagem da pilha é aquela correspondente ao tempo zero, onde ainda não se tem vestígios do material traçador. As oito imagens subsequentes foram então subtraídas desta primeira (*background subtraction*) gerando, cada uma, uma imagem correspondente à visualização do jato somente. Estas oito imagens resultantes foram então armazenadas em outro arquivo de pilha como pode ser visto na Figura 4.5.

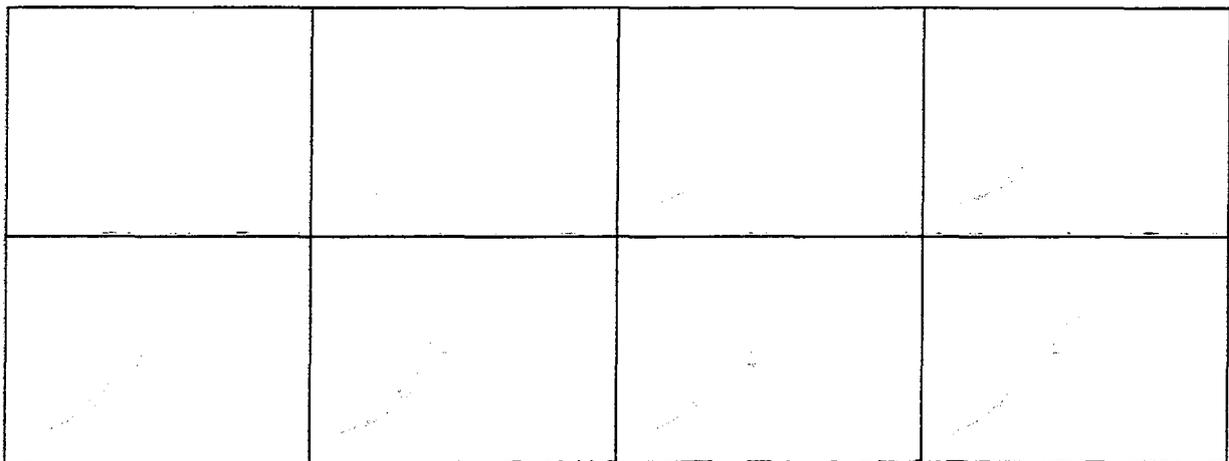


Figura 4.5 – Evolução do mesmo jato apresentado na Figura 4.4, agora mostrando as oito imagens resultantes do processo de subtração da primeira imagem apresentada naquela mesma figura. O resultado é uma imagem do jato, sem a interferência de imagens presentes em segundo plano.

Com o objetivo de melhorar ainda mais a visualização dos jatos propriamente dito, foi aplicado um filtro detetor de contornos (*edge detect*). Este filtro varre a imagem em busca das maiores diferenças de profundidade de cores entre pontos consecutivos relativo à escala de cinzas (entre 0 e 255), e marca esta região encontrada, identificando assim os contornos. Além disto, o resultado gerado neste filtro inverte as intensidades de cores apresentadas na Figura 4.5, ou seja, as intensidades de valor 255, correspondente à cor branca, passam a assumir o valor 0 (zero), correspondente a cor preta, e vice-versa. Sendo assim, é necessária a aplicação de outro filtro (*negative image*) que faça a reinversão destas cores.

Na Figura 4.6 observa-se enfim o resultado de todas as manipulações feitas na imagem original visando obter-se melhores condições de visualização do fenômeno.

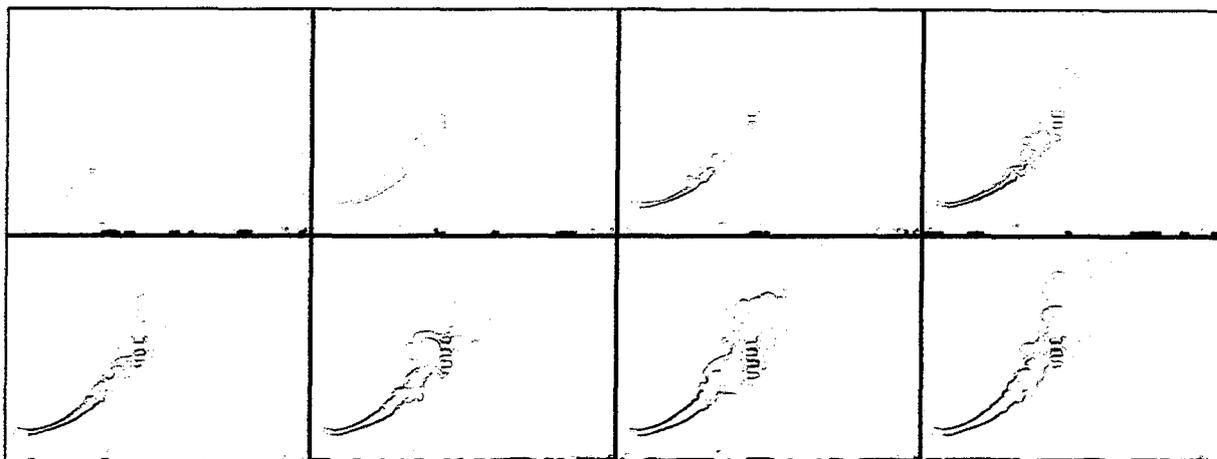


Figura 4.6 – Sequência de imagens mostrando a evolução do jato após passar por filtros de imagem que possibilitaram uma melhor visualização e análise do fenômeno em questão.

Para extração de dados a partir das imagens, tomou-se o último quadro capturado e tratado de cada ensaio, traçando-se manualmente a trajetória percorrida pelo eixo deste jato. Este procedimento também foi realizado com o programa *Image Tool* que, com o recurso de análise de pontos (*analyses point*), permite identificar as coordenadas de quaisquer pontos desejados na imagem. Foi considerado como ponto de origem para todos os jatos aquele correspondente ao eixo do orifício de saída.

Mapeada a trajetória do eixo do jato, transferiam-se estes dados para uma planilha eletrônica (*Microsoft Excel*) de modo a traçar graficamente estes resultados e proceder as análises desejadas.

Resumindo, a técnica de visualização aplicada para o tratamento das imagens capturadas pode ser esquematizada conforme demonstrado na Figura 4.7, na próxima página.

As imagens tomadas pela câmera posicionada superiormente mostraram-se insatisfatórias para a obtenção dos resultados que haviam sido idealizados em um primeiro momento, ao mesmo tempo em que as imagens laterais se demonstraram bastante elucidativas. Assim, para fins de tratamento e análise neste trabalho, decidiu-se descartar as imagens tomadas pela câmera superior, mesmo assim, todas foram devidamente digitalizadas e armazenadas em arquivos de imagem da mesma forma como se procedeu para as imagens tomadas lateralmente, dando possibilidade de que análises futuras possam ser realizadas com as mesmas.

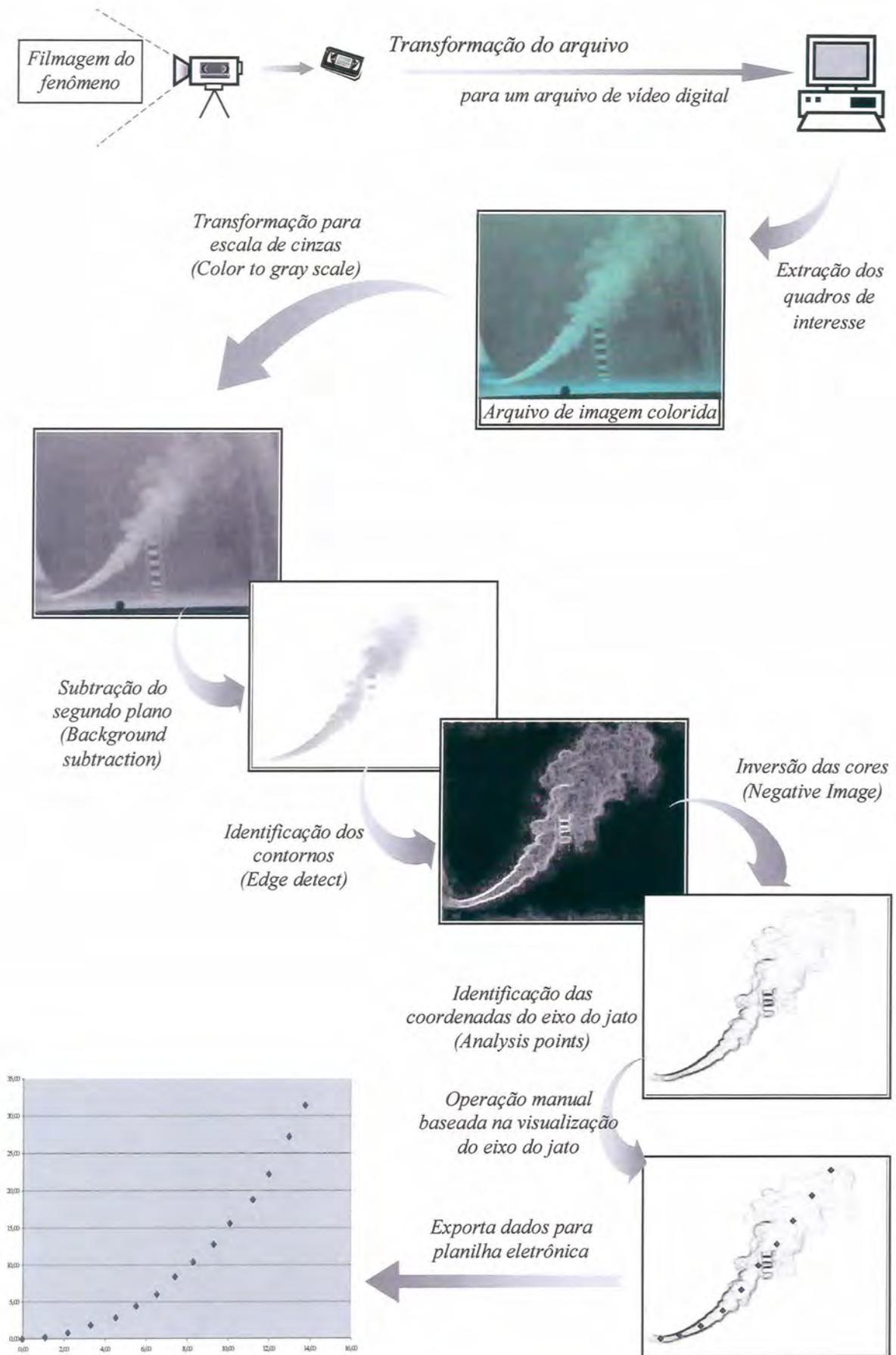


Figura 4.7 – Esquema demonstrando a técnica de visualização aplicada

4.9 Análise de erros

Tratando-se de um estudo experimental em modelo reduzido operado e controlado por dispositivos e instrumentos mecânicos e eletrônicos, são diversos os tipos de erro que podem ser intrínsecos a cada procedimento de ensaio.

O desenvolvimento deste trabalho não avaliou quantitativamente estes erros, mas foram considerados procedimentos para que estes erros não afetassem significativamente os resultados.

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

- controle da vazão de entrada pelos rotâmetros e inversor de frequências, bem como a exata divisão da vazão total de entrada por cada um dos tubos de queda;
- 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 manual do eixo do jato.

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 constatar-los na análise dos resultados e, então excluir este dado gerado das análises finais.

5. ANÁLISE DOS RESULTADOS

5.1 Avaliação do protótipo

Pelas análises ainda feitas com o protótipo, indicadas na Tabela 4.1, verifica-se que para a vazão 1 proposta ($Q_{1p}=0,33\ell/s$), correspondente a um tempo de detenção de 9 horas, tem-se um jato turbulento ($Re_1=8500$) sob condições muito próximas ao limite de ele ser considerado completamente turbulento logo após a saída ($Re < 10^4$), fazendo com que ele possa apresentar ainda, uma zona de transição junto ao orifício de saída. Ao mesmo tempo, não apresenta valores de $x \gg L_Q$ suficientes para se considerar a presença de um jato completamente desenvolvido, pois com $L_Q=4,43cm$ e o correspondente $L_{M1}=7,71cm$, existe uma região muito pequena ($\cong 3,3cm$) para que se dê o completo desenvolvimento de um jato puro e os efeitos de pluma já começam a se desenvolver. Confirmando este fato, tem-se que o número de *Richardson* para este jato ($R_{i1}=0,57$) é ligeiramente maior do que 0,5 dando um indicativo de que este jato com efeito de empuxo apresenta tendências de comportamento mais próximas a de uma pluma. Concluindo, tem-se um jato sob efeito de empuxo em uma faixa de apenas cerca de 3,3cm compreendida entre L_Q e L_{M1} , e a partir de L_{M1} os efeitos de pluma se tornam mais importantes para este jato.

Já para a vazão 2 proposta ($Q_{2p}=1,00\ell/s$), correspondente ao tempo de detenção de 3 horas, tem-se um jato completamente turbulento ($Re_2=25500$) logo após a saída ($Re > 10^4$). Neste, com $L_Q=4,43cm$ e o correspondente $L_{M2}=23,13cm$, existe uma região, com cerca de 18,7cm para se considerar um jato com efeito de empuxo completamente desenvolvido, sendo que os efeitos de pluma somente serão evidentes a distâncias de cerca de 23cm a partir do orifício de saída. Confirmando este fato, tem-se que o número de *Richardson* para este jato ($R_{i2}=0,19$) está mais próximo de 0, dando um indicativo de que este jato com efeito de empuxo apresenta tendências de comportamento mais próximas às de um jato puro.

Uma primeira recomendação baseada nesta análise do protótipo seria a de que se evitem nestas estruturas faixas de trabalho de vazão e/ou diâmetro do orifício que proporcionem os efeitos preditos para a vazão Q_{1p} , pois estas fogem aos objetivos de proporcionar uma adequada mistura entre o afluente que está ingressando no meio mais denso do reator. Isto devido aos efeitos de pluma que se tornam significativos logo após a saída do jato e que então contribuem de maneira pouco efetiva para a diluição deste afluente.

Quando do dimensionamento destas estruturas, propõe-se então que se observem estas tendências, evitando fazer com que o reator trabalhe em faixas de *Reynolds* desfavoráveis. Isto pode ser feito controlando-se três fatores básicos de dimensionamento:

1. Diâmetro do orifício

Sua redução, para uma mesma vazão, proporciona o aumento da velocidade e o conseqüente aumento do *Número de Reynolds*; da mesma forma, o aumento deste diâmetro faz reduzir a velocidade e o *Número de Reynolds*;

2. Número de orifícios de entrada

Para uma mesma vazão, o aumento do número de orifícios vai significar a redução da velocidade por jato e a conseqüente redução do *Número de Reynolds*, bem como a redução do número de orifícios para uma mesma vazão significa o aumento da velocidade e assim do *Número de Reynolds* no orifício;

3. Vazão

Apesar de este ser um parâmetro de dimensionamento dependente das características da população submetida ao tratamento, pode-se incrementar seu valor no reator promovendo a recirculação do líquido tratado, prática que vem sendo bastante utilizada. Este incremento das vazões reflete diretamente no aumento da velocidade nos orifícios de saída, fazendo com que aumente também o *Número de Reynolds*.

A variação dos três parâmetros acima pode tanto ser feita isoladamente, quanto em conjunto, buscando sempre a otimização do tratamento. Deve-se porém, evitar faixas de trabalho que, de ordem prática, afetem a construtividade e/ou operacionalidade do reator.

Limitações de ordem prática a serem observadas quando do dimensionamento destas estruturas estão relacionadas, principalmente, ao diâmetro e ao número de orifícios de entrada.

Diâmetros muito pequenos favorecem o entupimento dos dutos que conduzem o líquido até o fundo do reator. A literatura apresenta um valor tipicamente estabelecido como diâmetro mínimo, o valor de 75mm. Abaixo deste diâmetro, são maiores as possibilidades de obstrução dos dutos por materiais que eventualmente cruzem o sistema de remoção de sólidos grosseiros, previsto antes da entrada do afluente ao reator.

O número de orifícios de entrada é outro valor que na prática deve ser controlado. Poucos orifícios, mesmo que em condições de *Reynolds* favoráveis, podem proporcionar condições de mistura muito localizadas e tendem à formação de caminhos preferências. Já um número de orifícios muito grande também poderá ser desfavorável, pois mesmo que estejam em faixas de *Reynolds* favoráveis, podem dificultar a viabilidade da estrutura do ponto de vista construtivo. A literatura tem apresentado como valores práticos para este dimensionamento o valor de 1 a 4 metros quadrados por ponto de entrada na superfície no fundo do reator.

O gráfico apresentado na Figura 5.1 resume as relações existentes entre o número de *Reynolds*, as vazões e os diâmetros de orifícios circulares; podendo servir de auxílio para o dimensionamento destas estruturas. A área esmaecida em tom de cinza representa a região recomendada para o dimensionamento destas estruturas, tanto com relação às indicações apresentadas para as faixas de *Número de Reynolds*, quanto pelas indicações de diâmetro do orifício apresentadas como limitações de ordem prática de modo a não prejudicar a operacionalidade do reator.

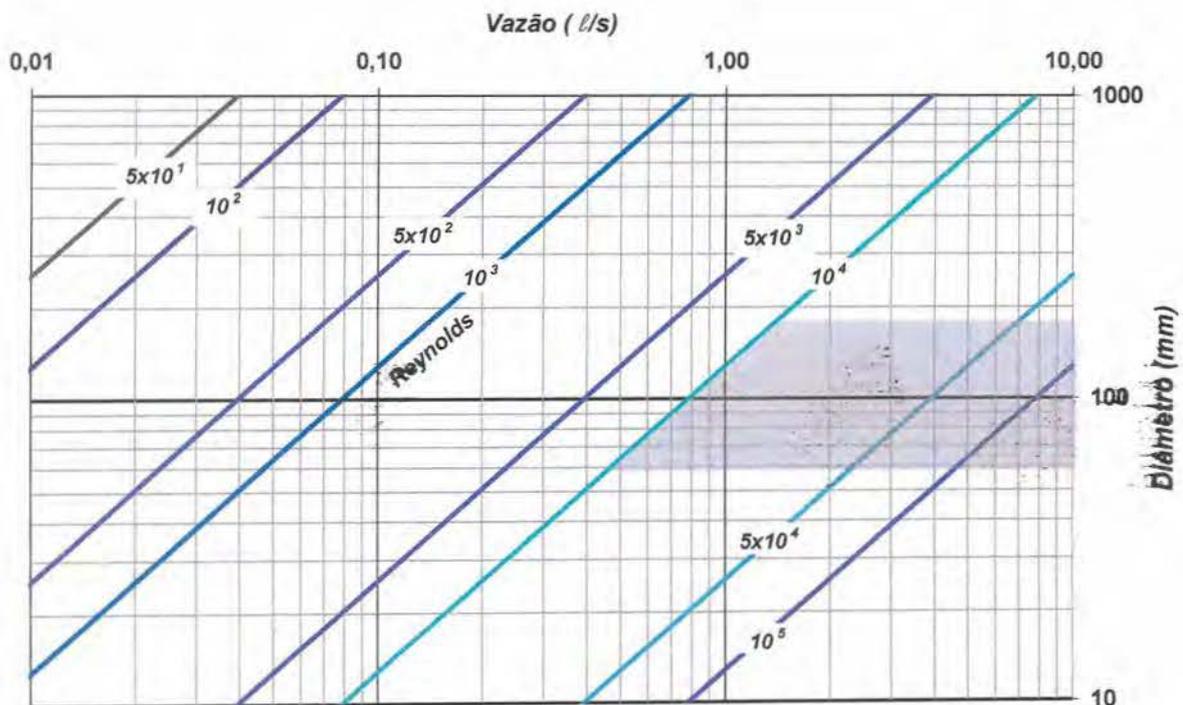


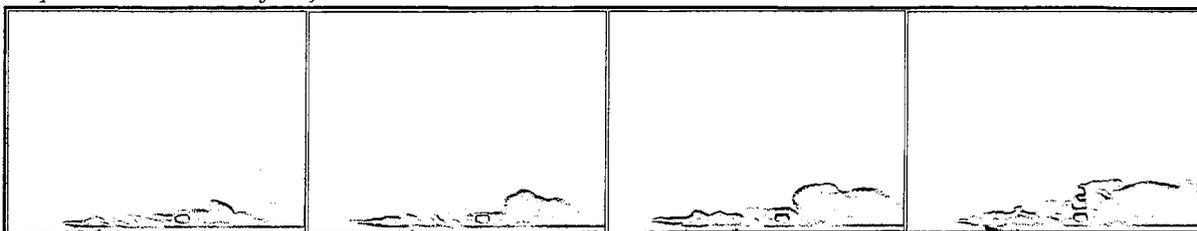
Figura 5.1 - Relações entre vazões e diâmetros para diferentes faixas de *Reynolds*.

5.2 Ensaio sem estratificação

A partir dos ensaios em modelo sem meio estratificado comparados com aqueles em que se promoveu a estratificação, verifica-se outro resultado da pesquisa. Na Figura 5.2 observa-se o comportamento da vista lateral da saída do jato com mesma vazão e para um situação com estratificação e outra sem estratificação.

Comprova-se a partir desta comparação qualitativa que o comportamento do fenômeno para um meio com a mesma densidade do jato é completamente diferente do comportamento que ocorre em presença da diferença de densidades.

Seqüência sem estratificação



Seqüência com estratificação

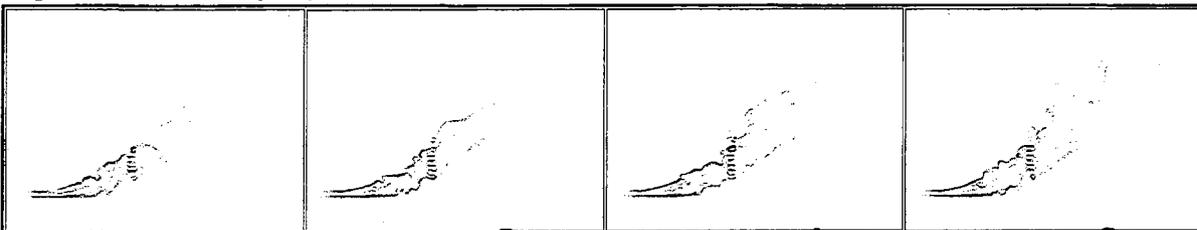


Figura 5.2 – Evolução do jato para uma mesma vazão em uma situação sem estratificação e outra com estratificação.

Assim, pode-se afirmar que qualquer modelagem física do fenômeno que ocorre na região de campo próximo de reatores DAFA, deve necessariamente reproduzir um meio estratificado, pois se assim não o fizer, estará tratando com um fenômeno diferente daquele que realmente ocorre nesta região, não podendo ser garantida relações de semelhança entre um modelo e um protótipo que procurem retratar suas características.

5.3 Ensaio com estratificação

Como dito anteriormente, a aplicação do plano de ensaios descrito na Tabela 4.3, teria um caráter de delineamento dos ensaios em termos da vazão, sendo o valor de massa específica variável em torno daquele indicado, pois seu valor exato seria lido no momento de cada ensaio. Assim, a Tabela 5.1, apresentada a seguir, indica os valores lidos no momento de

cada ensaio e apresenta os parâmetros calculados para o modelo (sub índice m) e para o protótipo (sub índice p) que serviram de base para a determinação do Número de Richardson.

Cabe salientar, que a tabela de ensaios apresenta os 27 ensaios considerados válidos para obtenção de dados. Na realidade, foram realizados mais de 50 ensaios que, além destes 27 apresentados, contabilizam aqueles necessários para os testes dos materiais traçadores, das condições de iluminação e tomadas de imagem e, por fim, daqueles que serviram para se obter a compreensão necessária com relação ao fenômeno que se visualizaria.

Tabela 5.1 – Resultados obtidos no modelo

	Q_{0m} (ℓ/s)	$\Delta\rho_m$ (kg/m^3)	Q_{0ip} (ℓ/s)	TRH (h)	Q_{0jm} (ℓ/s)	Q_{0jp} (ℓ/s)	V_{0m} ($\times 10^{-2}m/s$)	V_{0p} ($\times 10^{-2}m/s$)	M_{0m} ($\times 10^{-8}m^4/s^2$)	M_{0p} ($\times 10^{-4}m^4/s^2$)	B_{0m} ($\times 10^{-8}m^4/s^3$)	B_{0p} ($\times 10^{-4}m^4/s^3$)	L_{Qm} (cm)	L_{Qp} (cm)	L_{Mm} (cm)	L_{Mp} (cm)	Richardson	R_{em}	R_{ep}
1	0,05	6,7	4,83	7,48	0,004	0,402	5,31	20,50	22,10	0,82	27,44	0,79	0,89	4,43	1,95	9,73	0,46	531	10248
2		7,4	4,60	7,86		0,383		19,50		0,75	30,31	0,75			1,85	9,26	0,48		9751
3		7,9	4,45	8,12		0,371		18,87		0,70	32,36	0,73			1,79	8,96	0,49		9437
4		12,7	3,51	10,30		0,292		14,89		0,44	52,02	0,57			1,41	7,07	0,63		7443
5		13,0	3,47	10,42		0,289		14,71		0,43	53,24	0,57			1,40	6,99	0,63		7357
6		13,8	3,36	10,73		0,280		14,28		0,40	56,52	0,55			1,36	6,78	0,65		7140
7	0,06	12,9	4,18	8,65	0,005	0,348	6,37	17,72	31,83	0,62	63,40	0,68	0,89	4,43	1,68	8,42	0,53	637	8862
8	0,07	12,6	4,93	7,32	0,006	0,411	7,43	20,92	43,33	0,86	72,25	0,81			1,99	9,93	0,45	743	10462
9	0,08	12,6	5,63	6,41	0,007	0,470	8,49	23,91	56,59	1,12	82,57	0,92			2,27	11,35	0,39	849	11956
10		13,5	5,44	6,63		0,454		23,10		1,05	88,47	0,89			2,19	10,97	0,40		11551
11		16,0	5,00	7,22		0,417		21,22		0,88	104,85	0,82			2,01	10,07	0,44		10610
12	0,09	12,6	6,34	5,70	0,008	0,528	9,55	26,90	71,62	1,42	92,89	1,04			2,55	12,77	0,35	955	13451
13	0,10	12,3	7,13	5,07	0,008	0,594	10,61	30,25	88,42	1,80	100,75	1,17	2,87	14,36	0,31	1061	15127		
14	0,11	7,4	10,11	3,57	0,009	0,842	11,67	42,90	106,99	3,61	66,68	1,66	0,89	4,43	4,07	20,37	0,22	1167	21452
15		8,0	9,72	3,71		0,810		41,26		3,34	72,08	1,59			3,92	19,59	0,23		20632
16		9,6	8,88	4,07		0,740		37,67		2,79	86,50	1,45			3,58	17,88	0,25		18835
17		12,0	7,94	4,55		0,662		33,69		2,23	108,13	1,30			3,20	16,00	0,28		16846
18	0,12	12,6	8,45	4,27	0,010	0,704	12,73	35,87	127,32	2,53	123,85	1,38	3,41	17,03	0,26	1273	17935		
19	0,13	12,3	9,27	3,90	0,011	0,772	13,79	39,33	149,43	3,04	130,98	1,52	3,73	18,67	0,24	1379	19665		
20	0,14	12,3	9,98	3,62	0,012	0,832	14,85	42,35	173,30	3,52	141,06	1,63	4,02	20,11	0,22	1485	21177		
21	0,15	12,4	10,65	3,39	0,013	0,887	15,92	45,20	198,94	4,01	152,36	1,74	4,29	21,46	0,21	1592	22598		
22		12,6	10,56	3,42		0,880		44,84		3,95	154,82	1,73	4,26	21,29	0,21		22418		
23		14,8	9,75	3,70		0,812		41,37		3,36	181,85	1,60	3,93	19,64	0,23		20685		
24	0,18	7,4	16,54	2,18	0,015	1,379	19,10	70,21	286,48	9,68	109,11	2,71	6,67	33,33	0,13	1910	35104		
25	0,24	11,8	17,47	2,07	0,020	1,456	25,46	74,13	509,29	10,79	231,98	2,86	7,04	35,19	0,13	2546	37065		
26	0,36	6,7	34,77	1,04	0,030	2,898	38,20	147,57	1145,91	42,76	197,58	5,70	14,01	70,06	0,06	3820	73784		
27	0,48	12,1	34,50	1,05	0,040	2,875	50,93	146,41	2037,18	42,09	475,76	5,65	13,90	69,51	0,06	5093	73206		

A simples análise dos resultados apresentados pelos parâmetros na tabela apresenta algumas particularidades já expressas pelas equações que os relacionam, mas que aqui se tornam mais evidentes e visíveis. Nota-se como a velocidade do jato (V_{0m}) aumenta proporcionalmente com sua vazão (Q_{0jm}), bem como a quantidade de movimento inicial (M_{0m}) aumenta proporcionalmente ao quadrado desta velocidade (equações 3.9 e 3.10). Já o fluxo de empuxo (B_{0m}) que varia de acordo com a relação entre a vazão (Q_{0jm}) e o gradiente de massa específica ($\Delta\rho_m$), equação 3.11, percebe-se que em algumas vezes seu valor é da mesma ordem de grandeza que a quantidade de movimento e que, em outras, chega a apresentar valores cerca de quatro vezes menor do que esta quantidade de movimento respectiva.

Percebe-se que nos casos onde o fluxo de empuxo apresenta as maiores diferenças com a quantidade de movimento respectiva, há tendências de que o comprimento de escala característico L_{Mm} (equação 3.35) aumente, ou ainda, como o comprimento de escala característico L_{Qm} (equação 3.12) apresenta um valor fixo, verifica-se que o Número de Richardson dado pela razão entre estes dois comprimentos de escala (equação 3.40), tende a diminuir.

Isto ratifica o fato de que para valores de Número de Richardson mais próximos de 1, o comportamento será mais semelhante ao de uma pluma e, para valores mais próximos de 0, este comportamento será mais semelhante ao de um jato puro. Concorda também com o fato de que quanto maior o comprimento de escala característico L_M , menor será este Número de Richardson, pois este comprimento é um indicativo do local onde os efeitos de pluma de um jato sob efeito de empuxo começam a se tornar mais evidentes.

O Número de Reynolds (R_e) não foi um parâmetro utilizado na modelagem para se obter similitude entre modelo e protótipo em termos exatos, mas sim para estabelecer ou verificar faixas de trabalho compatíveis entres os dois sistemas, evitando que o modelo estivesse trabalhando em regime diferente do que estaria seu protótipo. Apesar disto, a sua relação representativa (equação 3.3) é diretamente proporcional à vazão, fato que se reflete na análise da tabela, de forma a perceber-se certa relação entre os Números de Reynolds e de Richardson.

5.3.1 Análise das imagens

Como exposto no capítulo 4.8 e resumido na Figura 4.7, para cada ensaio realizaram-se todas aquelas etapas, sendo que os dados resultantes das trajetórias percorridas pelos jatos, devidamente calibrados, foram armazenados em arquivos da planilha eletrônica *Microsoft Excel*, juntamente com o cálculo das principais características de cada um, que, por sua vez, estão agrupadas na Tabela 5.1 já apresentada.

As figuras a seguir (5.3 a 5.11) mostram os resultados gráficos obtidos a partir do tratamento e dos cálculos realizados na planilha eletrônica. Os eixos x e y representam a trajetória percorrida pelo jato, adimensionalizada com uma relação à dimensão apresentada pelo diâmetro de saída do orifício do jato; já os pontos traçados que mostram a tendência deste percurso, são relacionados ao adimensional Número de Richardson. Isto torna possível a comparação dos resultados para diferentes situações. Junto à legenda apresentada em cada gráfico, constam figuras (fora de escala) correspondentes às imagens visualizadas e tratadas de cada experimento, bem como seu respectivo Número de Richardson. Após, serão apresentadas duas outras figuras (5.12 e 5.13) mostrando o agrupamento destes resultados em uma mesma escala.

Esta análise do comportamento de um conjunto de resultados semelhantes, ou seja, que apresentam Números de Richardson próximos, permitiu identificar inconsistências entre os dados, provavelmente geradas durante os procedimentos de ensaio. Mais adiante, será apresentado o tratamento que se deu a todos estes dados analisados em conjunto.

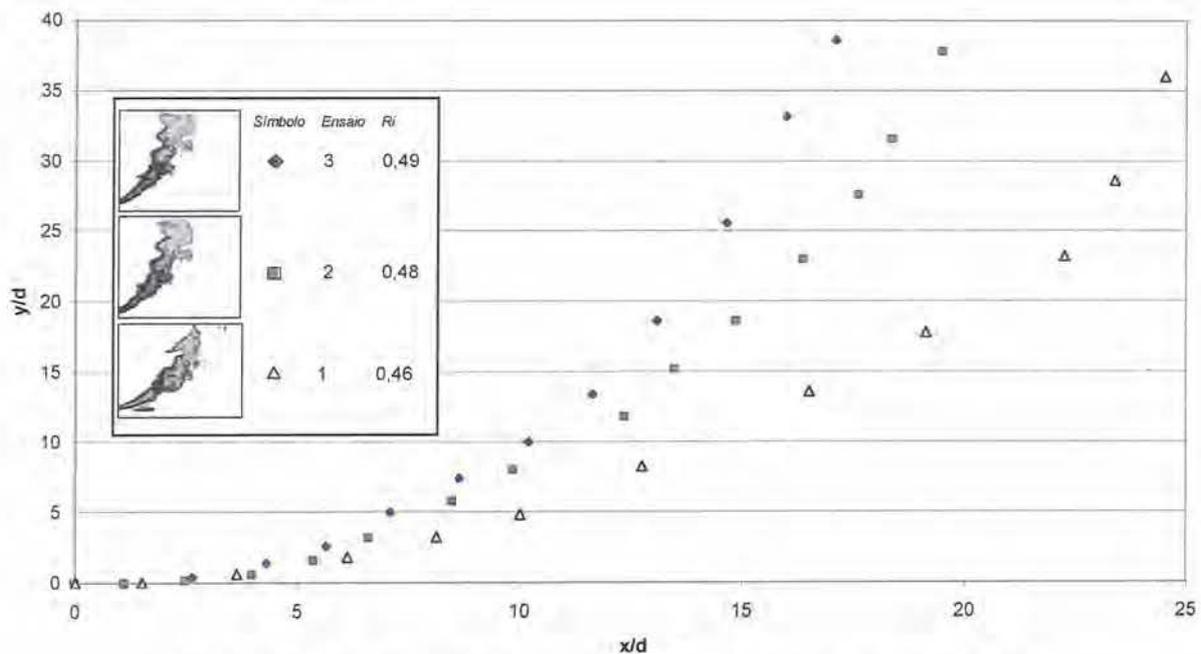


Figura 5.3 – Gráfico mostrando a trajetória dos jatos para os ensaios 1, 2 e 3.

Na Figura 5.3 verifica-se que as tendências de percurso são consistentes com os números de Richardson apresentados. Apesar de pequenas, as diferenças entre um ensaio e outro são suficientes para evidenciar que para os maiores valores de R_i , maior é o ângulo entre o eixo do jato e a horizontal, ou seja, mais acentuada é a trajetória em curva ascendente formada pelo eixo do jato, sendo os efeitos de empuxo os mais importantes.

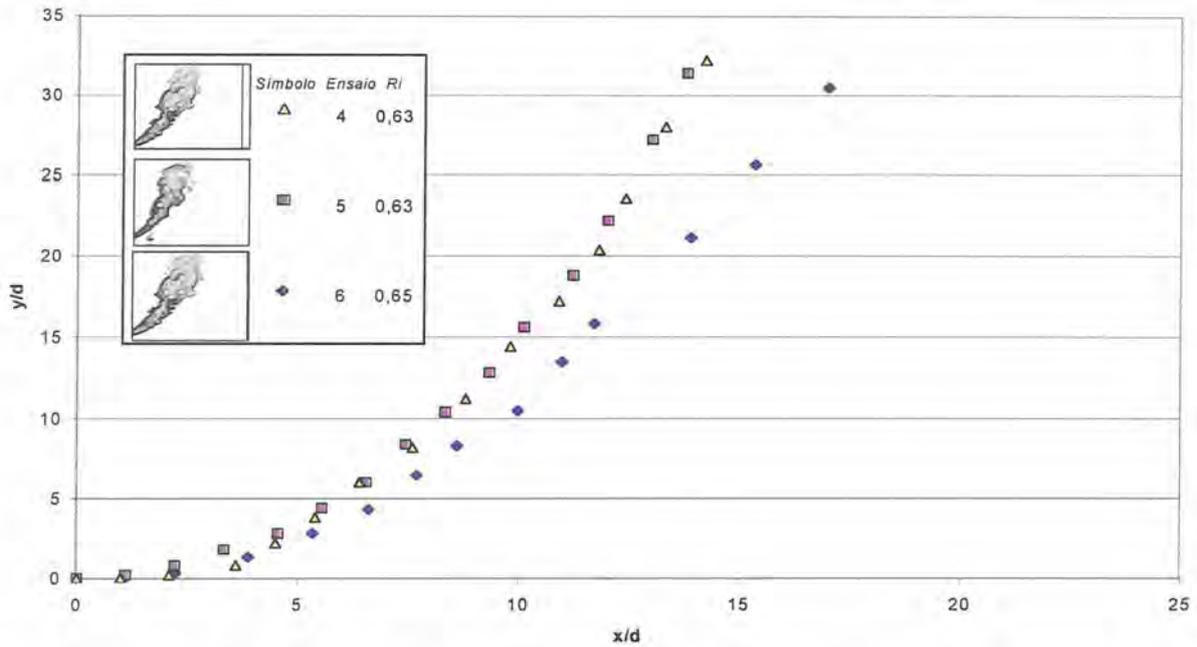


Figura 5.4 – Gráfico mostrando a trajetória dos jatos para os ensaios 4, 5 e 6.

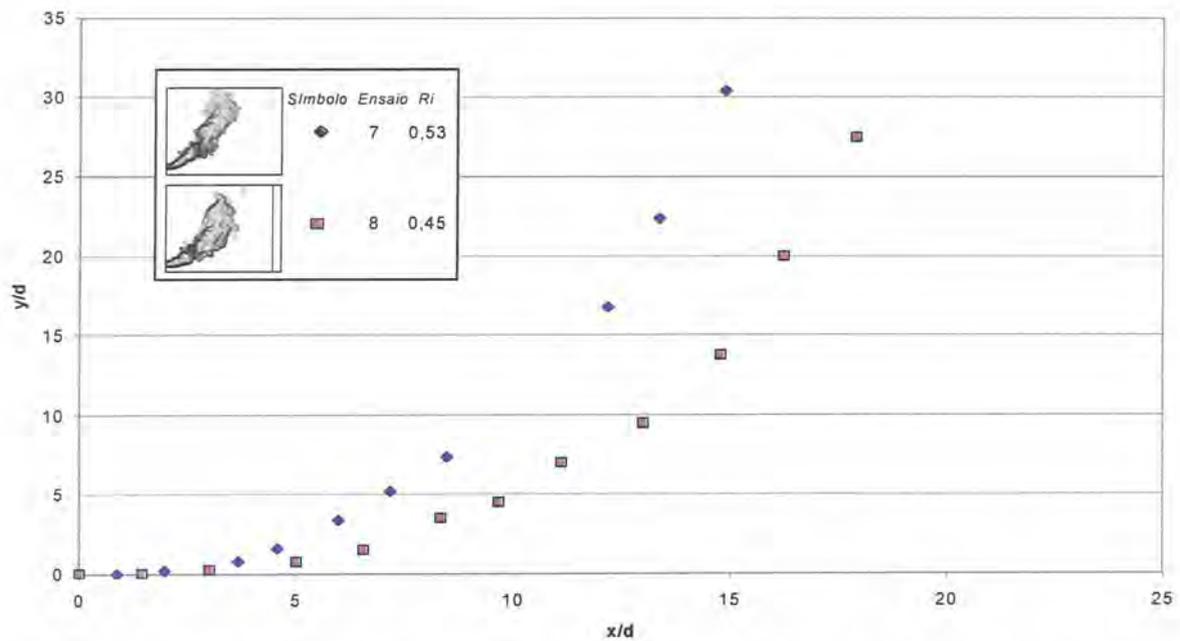


Figura 5.5 – Gráfico mostrando a trajetória dos jatos para os ensaios 7 e 8.

Nos ensaios apresentados na Figura 5.4, nota-se uma pequena inconsistência com relação ao ensaio nº 6, que apesar de apresentar um R_i maior do que os ensaios de nº 4 e 5, tem sua trajetória dada abaixo da trajetória dos demais, contrariando o que era de se esperar. Apesar disto, esta diferença é pequena com relação às escalas de avaliação no conjunto de todos os pontos realizadas mais adiante, não representando nenhum problema quando desse tratamento. Já os ensaios apresentados na Figura 5.5, não demonstraram nenhuma inconsistência significativa.

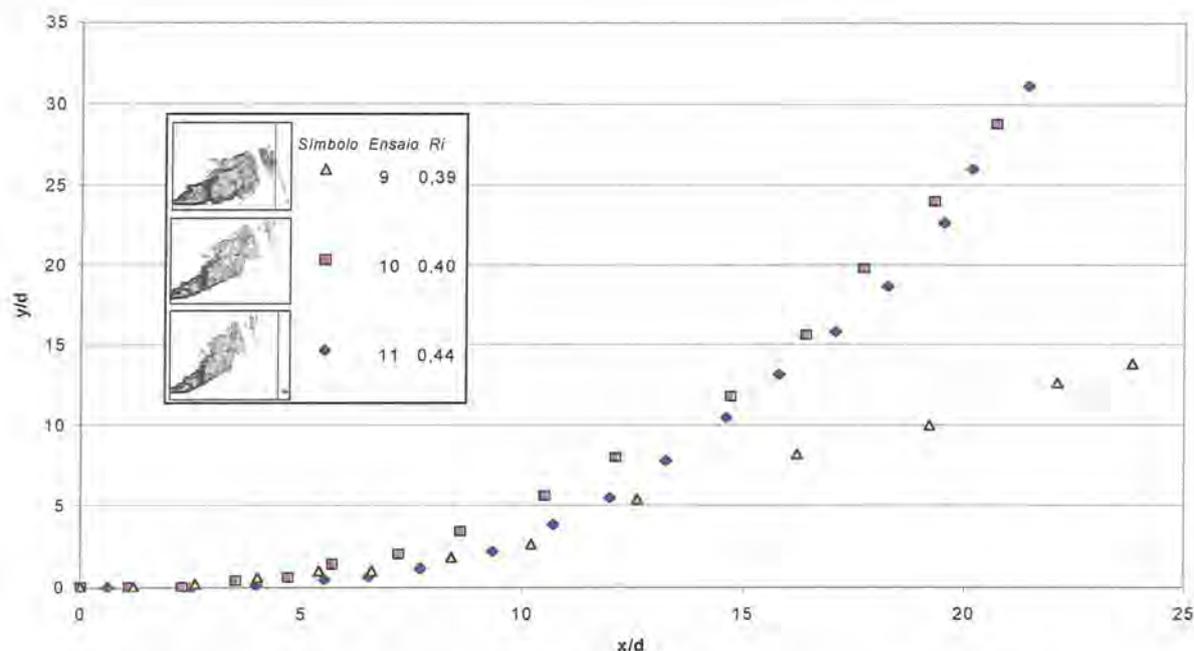


Figura 5.16- Gráfico mostrando a trajetória dos jatos para os ensaios 9, 10 e 11.

O ensaio nº 9, como se pode perceber na Figura 5.6, apresentou resultado bastante discrepante com relação aos demais, principalmente com relação ao ensaio nº 10, que apresenta um R_i bastante próximo ao dele. Para a avaliação global dos resultados decidiu-se por sua exclusão.

Acredita-se que problemas de inconsistência como este, tenham sido gerados em alguma etapa do trabalho experimental durante o ensaio: ou com relação à vazão imposta, ou com relação à leitura da diferença de massas específicas no momento do ensaio.

Os resultados apresentados na Figura 5.7 a seguir, apresentam-se consistentes com relação ao R_i e às trajetórias percorridas pelos eixos de cada jato.

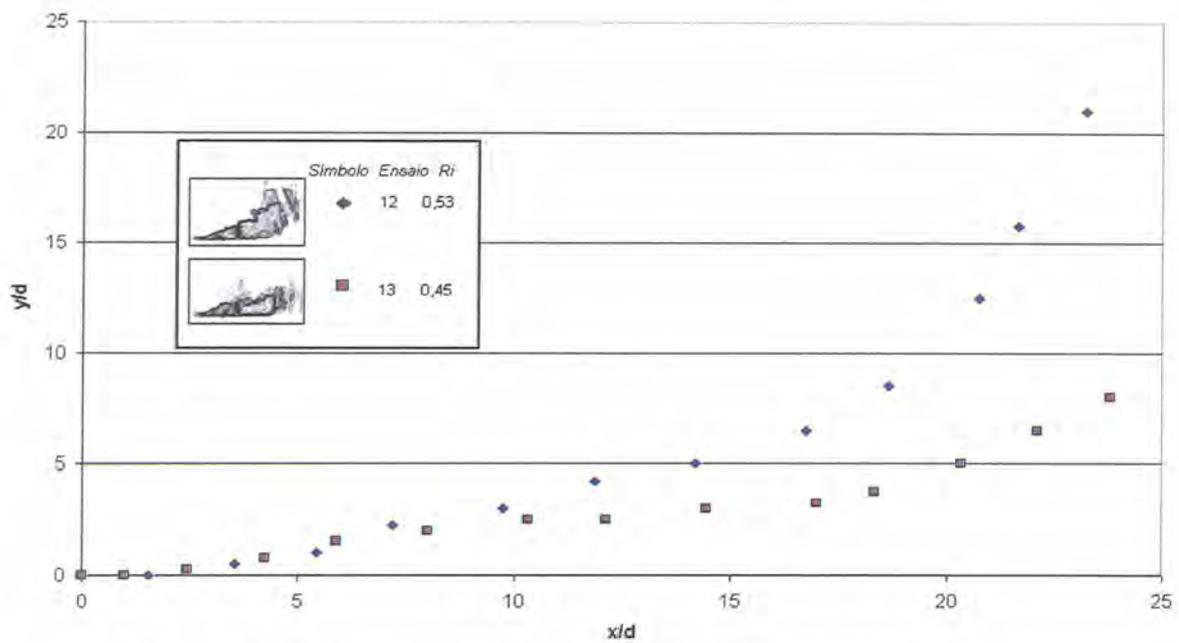


Figura 5.7 – Gráfico mostrando a trajetória dos jatos para os ensaios 12 e 13.

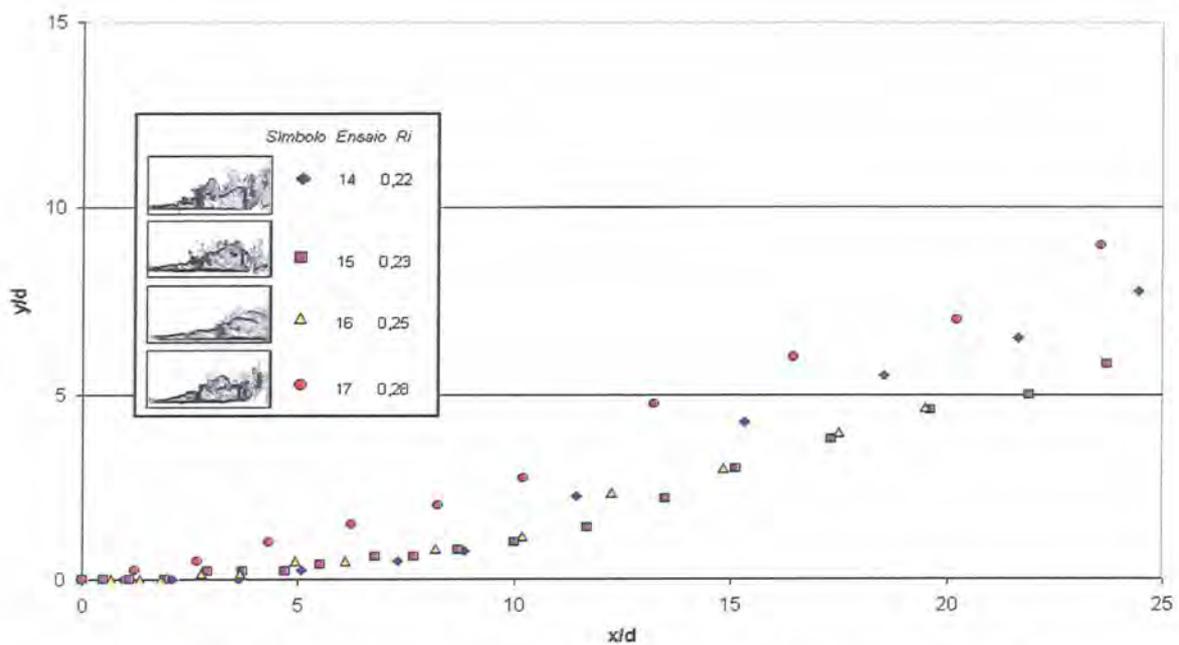


Figura 5.8 – Gráfico mostrando a trajetória dos jatos para os ensaios 14, 15, 16 e 17.

Na Figura 5.8, apesar de os resultados estarem muito aglomerados, percebe-se que, em média, as tendências são coerentes com o R_i que apresentam. A existência de pequenas diferenças com relação a trajetória esperada, não foi suficiente para tomar o resultado como inconsistente.

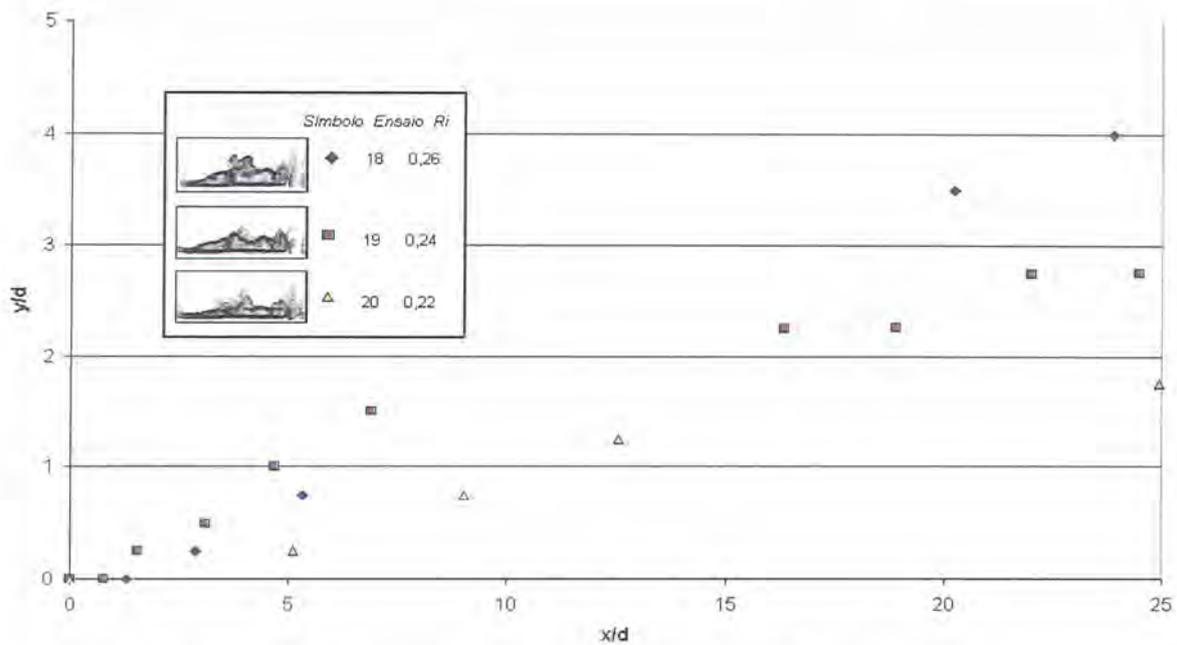


Figura 5.9 – Gráfico mostrando a trajetória dos jatos para os ensaios 18, 19 e 20.

Neste último, percebe-se o cruzamento das trajetórias percorridas pelos jatos, mas, em média, as tendências são coerentes com o esperado de acordo com o R_i calculado.

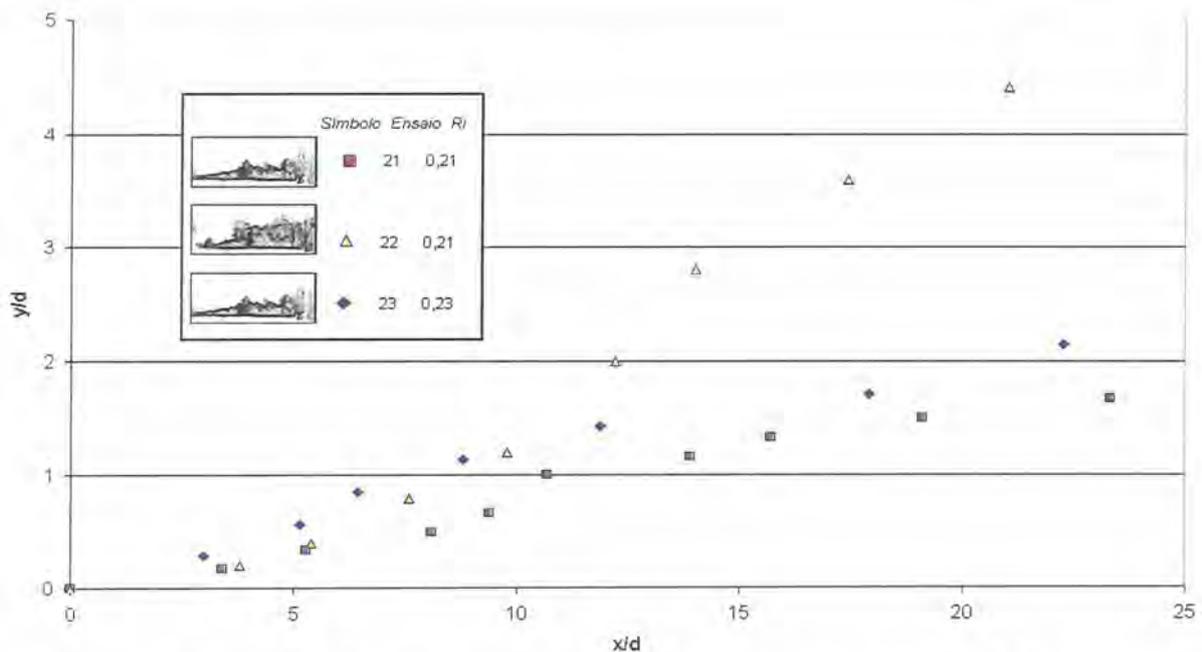


Figura 5.10 – Gráfico mostrando a trajetória dos jatos para os ensaios 21, 22 e 23.

Da mesma forma que o ensaio nº 9, o ensaio nº 22 também apresentou valores muito diferentes daqueles observados em ensaios com R_i semelhantes, tendo sido descartado para as análises posteriores. Acredita-se que isto tenha ocorrido devido a algum erro experimental durante os procedimentos de ensaio

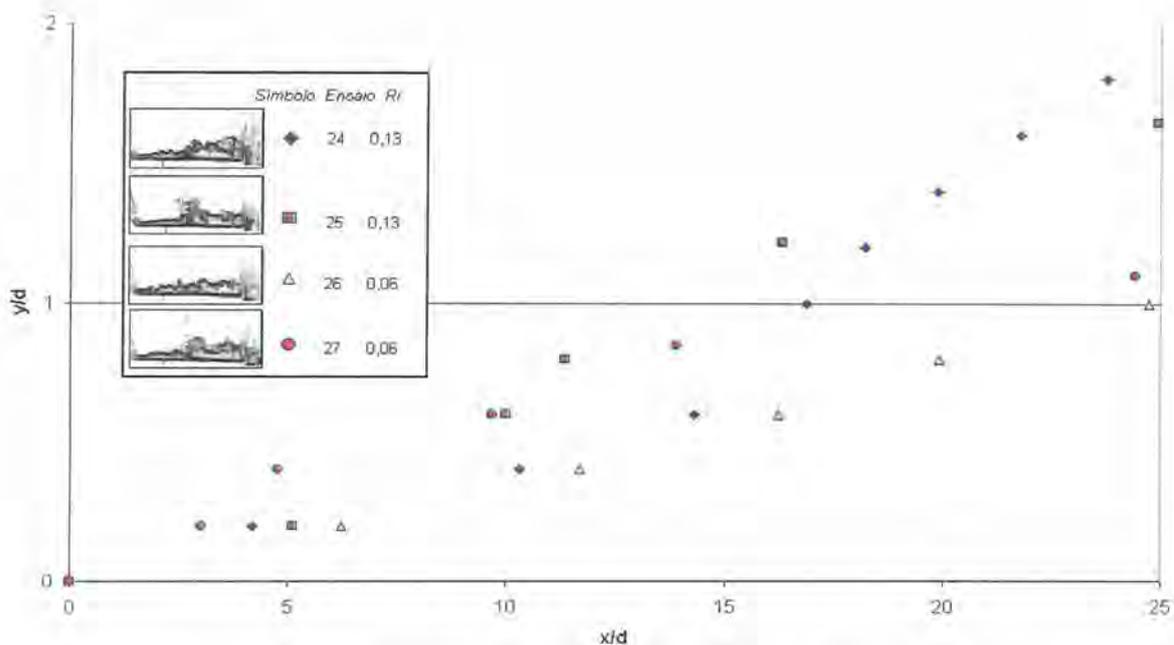


Figura 5.11 – Gráfico mostrando a trajetória dos jatos para os ensaios 24, 25, 26 e 27.

Nesta figura 5.11, percebe-se certa aglomeração dos dados, mas não suficiente para causar o descarte de nenhum dos ensaios pois as tendências são aproximadamente coerentes aos valores de R_i calculados.

Para análise destas inconsistências descritas anteriormente, verificou-se também o comportamento das trajetórias de todos os pontos gerados nos ensaios. Assim, a decisão de descarte de alguns dos resultados, baseou-se não só na análise de grupos semelhantes conforme ilustrado nas figuras anteriores, mas também numa análise global de todos estes dados plotados em um mesmo gráfico.

A Figura 5.12, na próxima página, mostra o agrupamento de todos os pontos dos ensaios apresentados nas figuras anteriores, relacionados aos seus respectivos valores de R_i . Este agrupamento de todos os pontos gerados, graficado agora para um mesmo valor de escalas nos eixos x e y , auxilia a observação do efeito gerado pelas variáveis que definem o Número de Richardson na formação da trajetória de cada jato.

Como forma de melhor visualizar as trajetórias dos eixos dos jatos apresentados na Figura 5.12, fez-se ainda um agrupamento entre aqueles que apresentavam tendências semelhantes. Aplicou-se um ajuste de curvas que melhor representasse estas tendências e tomou-se a média entre os valores de R_i apresentados pelos ensaios que estavam sendo

agrupados, para representar a curva resultante de cada agrupamento. Este resultado gráfico é apresentado na Figura 5.13.

Visualizando estes resultados apresentados nos gráficos (Figura 5.12 e Figura 5.13) em conjunto com os parâmetros calculados, apresentados na Tabela 5.1, percebe-se como se comportam as diferentes formas de um jato sob efeito de empuxo de acordo com o correlacionamento das variáveis que o definem. O Número de Richardson demonstra assim, ser um parâmetro adequado para avaliar este comportamento relacionado com a inclinação que este jato irá apresentar de acordo com suas principais características: vazão, quantidade de movimento e fluxo de empuxo iniciais.

Valores mais altos de R_i , indicam trajetórias cada vez mais inclinadas, associadas à redução do comprimento de escala característico L_M e ao fato de que o fluxo de empuxo inicial B_0 apresenta valores mais altos do que o de quantidade de movimento inicial M_0 respectivo. Além disto, verifica-se a redução do número de Reynolds, que apesar de não ser diretamente associado ao experimento como um número adimensional representativo do sistema em diferentes escalas, tem seu valor reduzido proporcionalmente à redução da vazão, que, por sua vez, é associada com o aumento do R_i .

Já os valores mais baixos de R_i , caracterizam as trajetórias mais horizontais, associado a um comprimento de escala característico L_M com valor mais elevado e com o fluxo de empuxo inicial B_0 com valor mais baixo do que a quantidade de movimento inicial M_0 . E com as mesmas ressalvas apresentadas no parágrafo anterior com relação ao Número de Reynolds, verifica-se que este aumenta devido ao aumento da vazão, que, por sua vez, contribui para a redução do R_i .

Relacionado ao sistema de tratamento de efluentes em questão, uma análise destes resultados permite que se façam algumas afirmações em termos práticos. Para Números de Richardson mais altos percebe-se a influência dos efeitos de pluma que fazem com que o jato apresente uma trajetória curva ascendente mais acentuada, ou seja, uma inclinação elevada do seu eixo com relação ao plano horizontal logo após sua saída pelo orifício.

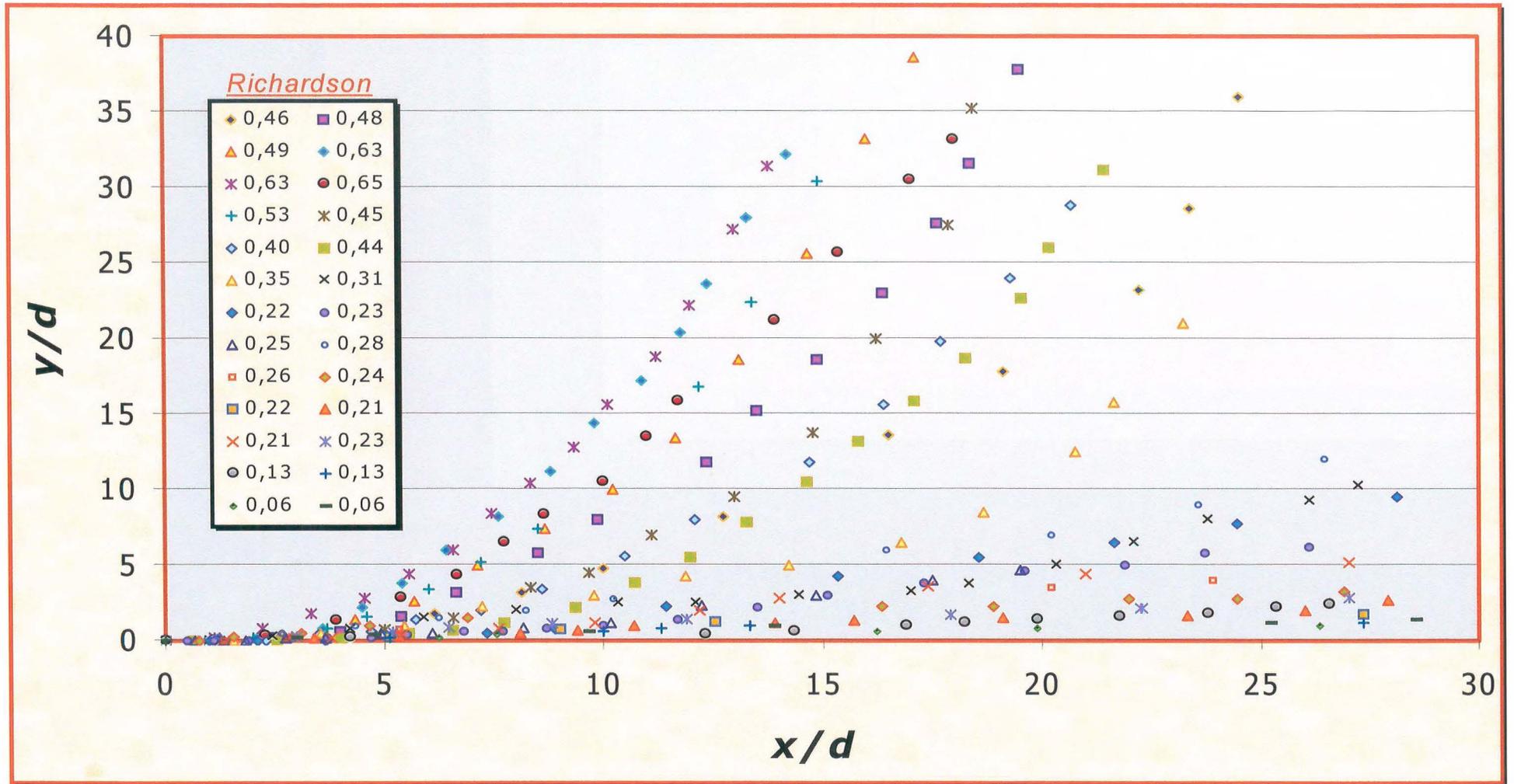


Figura 5.12 – Agrupamento de todos os resultados que descreveram a trajetória percorrida pelo eixo do jato sob diferentes valores do Número de Richardson

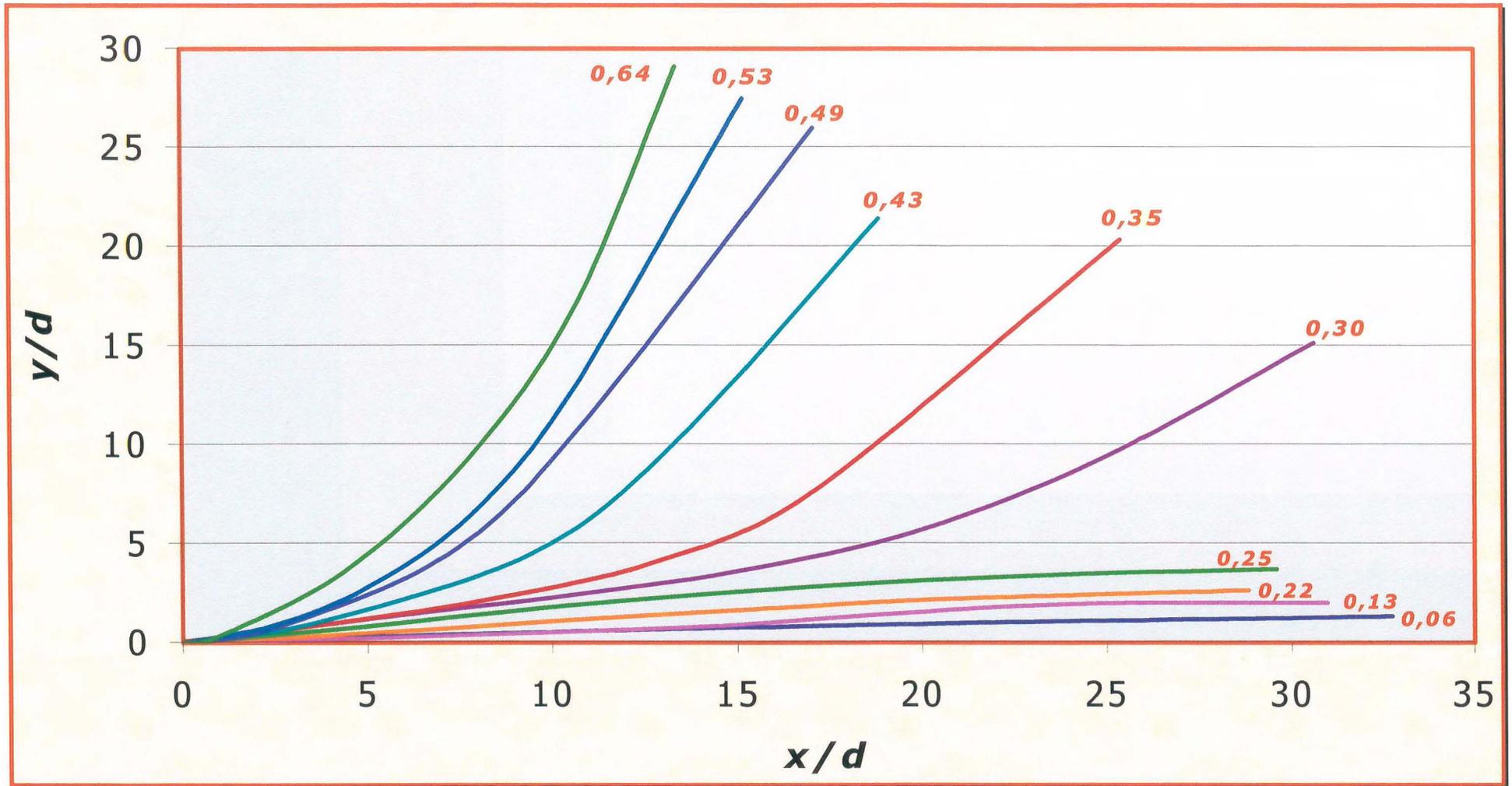


Figura 5.13 – Trajetórias dos eixos dos jatos ajustadas e associadas ao Número de Richardson correspondente.

Analisando os dados apresentados pela Tabela 5.1, percebe-se que o valor de $R_i=0,28$, é o valor limite para a situação em que o fluxo de empuxo inicial B_0 começa a ser maior do que a quantidade de movimento inicial M_0 . Ou melhor, para valores abaixo de $R_i=0,28$, M_0 é maior do que B_0 , o que faz com que as forças de inércia sejam preponderantes às forças de empuxo; já para valores de $R_i \geq 0,28$, B_0 é maior do que M_0 , o que faz com que as forças de empuxo sejam agora preponderantes às forças de inércia, sendo este fato responsável pela formação da trajetória curva ascendente do jato.

Para fins de estabelecimento de diretrizes de dimensionamento para estruturas em escala real, $R_i=0,28$ pode ser visto como um valor limite superior, sendo assim desejável que se evitem valores maiores do que estes para garantir a ausência dos fatores citados, prejudiciais à eficiência hidráulica do sistema na região de campo próximo.

Da mesma forma que sugeriu-se situações de dimensionamento buscando valores de Número de Reynolds que garantissem uma turbulência suficiente na saída dos orifício, é possível agora propor critérios que também procurem colocar os valores do Número de Richardson entre valores eficientes ao sistema de distribuição por jatos.

Assim, o presente trabalho propõe o gráfico seguinte apresentado na Figura 5.14, que faz o cruzamento das variáveis que, de um ponto de vista prático, são utilizadas para o dimensionamento e que podem então ser manipuladas durante o projeto de reatores DAFA.

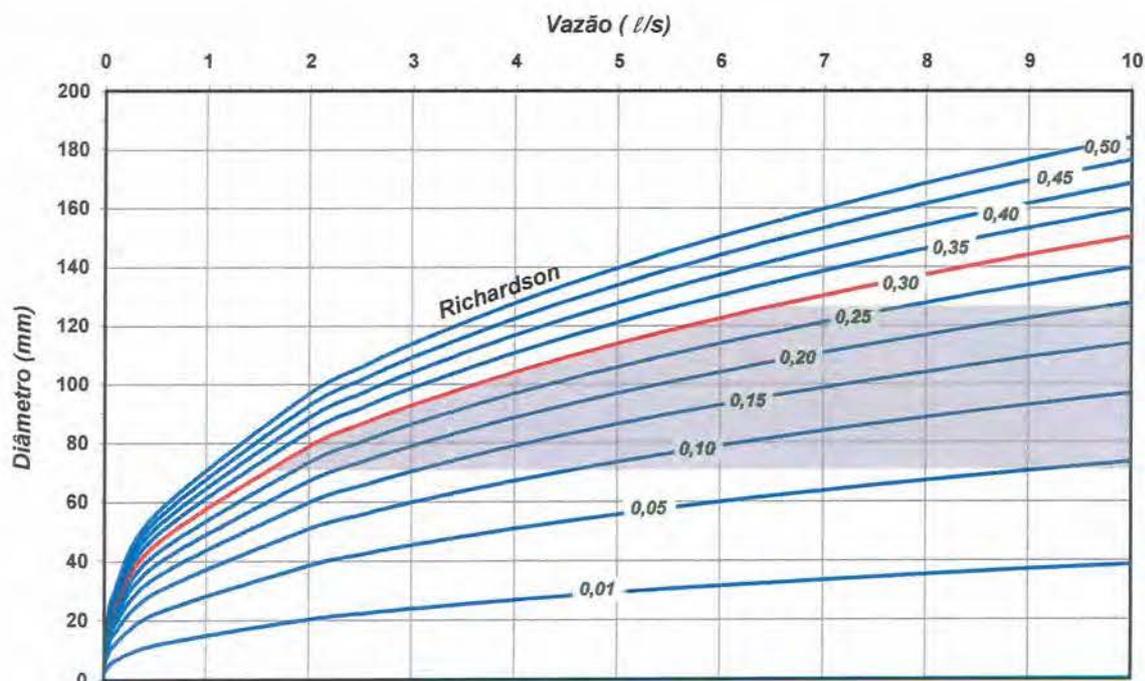


Figura 5.14 – Relações entre vazões e diâmetros para diferentes valores do Número de Richardson.

Além do fato de que fluxos tipo pluma pura não são tão favoráveis à mistura quanto os fluxos tipo jato puro, esta tendência de ascensão da trajetória do jato sob efeito de empuxo acaba por ser prejudicial ao sistema, pois não proporciona o contato entre jatos subsequentes. Esta interatividade entre jatos é esperada como fator favorável à eficiência de mistura hidráulica na região de campo próximo, aumentando a capacidade de mistura do sistema de distribuição. Tem-se ainda que devido a este não contato com algum jato subsequente, associado também com a distância estabelecida entre os orifícios de saída, é favorecido o surgimento de “zonas mortas” no fundo do reator, ou seja, zonas onde ocorrerá depósito de material devido a ausência de fluxo que o revolva.

Verifica-se ainda que quanto mais alto o R_i , menos turbulento se tornou o fluxo, apresentando Números de Reynolds mais baixos. A presença deste fluxo intermitente e menos turbulento, pode ser favorável ao surgimento de caminhos preferencias em meio ao banco de lodos dos reatores, fazendo com que o esgoto que está ingressando, cruze este manto de lodos sem proporcionar uma mistura adequada, desfavorecendo a digestão anaeróbia.

Resumindo, quanto mais alto for o R_i , menor a eficiência alcançada pelo sistema, principalmente devido aos seguintes fatores:

- baixos níveis de mistura e diluição proporcionados pelo fluxos tipo pluma em meio ao banco de lodos;
- não interação entre os fluxos dos demais pontos de distribuição, desfavorecendo a eficiência de mistura hidráulica do conjunto.
- formação de zonas mortas no fundo do reator; e
- formação de caminhos preferenciais.

Quantitativamente, percebe-se no gráfico apresentado pela Figura 5.13, a existência de um valor de R_i entre a curva ajustada para 0,25 e a curva ajustada para 0,30, no qual a trajetória passa de uma situação em que o jato se propaga mais acentuadamente em direção horizontal ($R_i < 0,25$), para uma situação onde é maior a tendência de se formarem trajetórias curvas ascendentes ($R_i > 0,30$). Existe, portanto, um valor intermediário a estes dois que será uma valor característico de R_i para esta situação, a partir do qual os efeitos de empuxo que conduzem a trajetória do jato de forma mais ascendente se tornam preponderantes aos efeitos de inércia promovidos pela quantidade de movimento inicial do jato.

No gráfico (Figura 5.14), a região esmaecida em tom de cinza, representa a zona ótima de dimensionamento, ou seja, ela estabelece os limites recomendados para que em um projeto de um reator DAFA, se possa manipular os parâmetros relacionados mantendo-os sempre dentro daqueles limites preestabelecidos, fato que garantirá a melhor eficiência para o conjunto do sistema de distribuição do reator.

Os parâmetros relacionados no gráfico e a forma como interagem, estão a seguir indicados:

1. Diâmetro do orifício

Sua redução, para uma mesma vazão, proporciona o aumento da velocidade e a redução do *Número de Richardson*; da mesma forma, o aumento deste diâmetro faz reduzir a velocidade e aumentar o *Número de Richardson*.

2. Número de orifícios de entrada

Para uma mesma vazão, o aumento do número de orifícios vai significar a redução da velocidade por jato e o conseqüente aumento do *Número de Richardson*, bem como a redução do número de orifícios para uma mesma vazão significa o aumento da velocidade e assim, a redução do *Número de Richardson* no orifício;

3. Vazão

Lembrando novamente que, apesar de este ser um parâmetro de dimensionamento dependente das características da população submetida ao tratamento, pode-se incrementar seu valor no reator promovendo a recirculação do líquido tratado, prática que vem sendo bastante utilizada. Este incremento das vazões reflete diretamente no aumento da velocidade nos orifícios de entrada e na redução do *Número de Richardson*.

Assim como na avaliação da condicionante de projeto *Número de Reynolds*, a variação dos três parâmetros acima citados pode tanto ser feita isoladamente, quanto em conjunto, buscando sempre a otimização do tratamento. Deve-se também da mesma forma, evitar faixas de trabalho que venham afetar a construtividade e/ou operacionalidade do reator.

Outro fator que ainda pode ser levado em consideração quando do projeto destes reatores, relaciona-se à forma de evolução dos jatos, ou seja, como se comporta a evolução

longitudinal e transversal do jato, com relação à variação de suas demais características. Esta análise pode ser significativa para a avaliação de uma melhor disposição do conjunto de jatos no fundo do reator, identificando situações que poderiam ser mais favoráveis ou desfavoráveis, como seria o caso de excessivo distanciamento entre os pontos de entrada.

A própria conceituação dos jatos sob efeito de empuxo, apresenta um elemento importante para este tipo de análise, o comprimento de escala característico L_M . Este parâmetro dá um indicativo da distância partindo da saída do jato, onde os efeitos de pluma começam ser mais significativos do que os efeitos de inércia, podendo ser considerado como um valor limite para o estabelecimento da distância entre jatos subsequentes.

Ao mesmo tempo em que não é aconselhável um distanciamento entre jatos dentro dos valores encontrados para L_M , também não se aconselha distanciamentos muito maiores do que os valores encontrados. Na primeira situação estaria se provocando uma interferência muito imediata entre jatos subsequentes, não aproveitando a máxima capacidade de carregamento com que cada jato pode individualmente contribuir. Já a segunda situação, com distanciamento muito maior do que o valor de L_M encontrado, poderia estar favorecendo o surgimento de uma zona morta entre estes jatos.

Percebe-se que uma análise de todos os fatores que podem ser manipulados e/ou verificados para condicionar o projeto de um sistema de distribuição por jatos, se torna complexo devido aos diversos parâmetros que podem contribuir favorável ou desfavoravelmente com a eficiência global do sistema de tratamento.

Resumidamente, aconselha-se que para projetos de sistema de distribuição por jatos, como os de reatores anaeróbios de manto de lodo de fluxo ascendente, limite-se a variação dos parâmetros vazão, diâmetro e número de orifícios e comprimento de escala característico L_M , entre valores que não façam com que o *Número de Richardson* ultrapasse valores em torno de 0,28. Com estas determinações, deve-se então verificar a condição de funcionamento do jato individual com relação a sua faixa de trabalho para o *Número de Reynolds*, o qual é desejável que mantenha-se sempre dentro de faixas de escoamento considerado como turbulento, maiores do que 10^4 .

6. CONCLUSÕES

A partir da experiência teórica adquirida com a realização do trabalho de revisão bibliográfica, aliado com o trabalho experimental realizado com o uso do modelo reduzido do DAFA, foi possível alcançar grande parte dos objetivos aos quais este trabalho se propunha.

O desenvolvimento e a aplicação da técnica de visualização do escoamento aqui apresentada, demonstrou ser eficiente com relação aos resultados obtidos. Foi um técnica adaptada a partir de diversas tentativas para se encontrar um material traçador adequado, e aplicada de forma a utilizarem-se os meios que haviam disponíveis, de certa forma baratos e de fácil aquisição. As câmeras filmadoras e o sistema de iluminação empregado são relativamente simples, e a utilização de equipamentos mais sofisticados, poderia até facilitar o trabalho com relação à extração dos resultados, mas acredita-se que a qualidade destes resultados não seria muito diferente da encontrada. Com relação a custos, os maiores ficaram por conta do sistema de captura digital das imagens, cerca de US\$1500,00, composto do microcomputador e da placa de captura de vídeo. Enquanto isto, para o tratamento das imagens o principal programa utilizado foi adquirido gratuitamente através da rede mundial de computadores (*Internet*).

A avaliação do protótipo e a compreensão dos fatores intervenientes na região de campo próximo destes reatores, permitiu que se caracterizasse o fenômeno que ali ocorria, sendo que a análise dimensional das variáveis representativas desta caracterização, identificou os parâmetros necessários a serem respeitados numa modelagem que pretendeu simular seu comportamento. O Número de Reynolds foi apresentado como parâmetro a ser respeitado dentre certas faixas de regime de trabalho no modelo e no protótipo. Já o Número de Richardson foi apresentado como o parâmetro adimensional mais importante para simular no modelo o jato sob efeito de empuxo presente no protótipo.

O adimensional Número de Richardson foi então respeitado tanto no modelo quanto no protótipo, permitindo que se estabelecesse a relação entre as escalas de vazão, de variação de massa específica, e de diâmetro dos orifícios de saída, de forma a garantir a similitude no comportamento do fenômeno presentes na região de campo próximo.

As características que se espera encontrar na região de campo próximo dos Digestores Anaeróbios de Fluxo Ascendente com o intuito de incrementar a eficiência do processo biológico de tratamento em questão, são as seguintes:

- oportunizar um nível de mistura adequado que garanta o contato da forma mais homogênea possível entre a água residuária e o fluido presente no reator;
- evitar a formação de zonas mortas no fundo do reator, que fazem com que parte da biomassa se torne inativa, sem aproveitamento para o tratamento proposto;
- evitar a formação de caminhos preferenciais, que fazem com que se tenha a transposição da água residuária através do manto de lodos sem efetuar o contato adequado com a massa bacteriana anaeróbia que proporcionaria a digestão da matéria orgânica poluente.

Considerando estas características indesejáveis, o trabalho conclui com a proposição de critérios de dimensionamento que fazem com que sejam reduzidas as possibilidades de que elas venham ocorrer.

A Figura 5.14 apresenta um gráfico resultante do trabalho experimental e teórico que relaciona vazões, diâmetros de orifícios e Números de *Richardson*. Propõe-se a utilização das relações estabelecidas entre estas variáveis como diretriz de projeto, considerando que o valor do Número de *Richardson* em torno de 0,30 é um limite superior a ser respeitado. Deve-se então procurar valores de vazão, diâmetro e número de orifícios que não ultrapassem o valor de $R_i = 0,30$.

Outro elemento da teoria dos jatos sob efeito de empuxo que pode ser considerado é o comprimento de escala característico L_M , que serve como um indicativo para a localização do ponto em que os efeitos de empuxo preponderam sobre os de inércia, servindo para avaliar uma melhor disposição para os jatos.

Ainda para o dimensionamento, propõe-se que os resultados obtidos a partir da otimização para o Número de *Richardson*, sejam verificados para faixas de trabalho ótimas com relação ao Número de *Reynolds*. O gráfico apresentado na Figura 5.1 serve como auxiliar para esta verificação e até para tomar alguma decisão com relação à alteração de projeto, caso haja necessidade. O objetivo é o de garantir que cada jato trabalhe na faixa de regime turbulento, $Re > 10^4$, o que contribui para um adequado contato entre os fluidos no fundo do reator.

7. RECOMENDAÇÕES

Como todo trabalho de pesquisa experimental, durante os ensaios foram diversos os aprimoramentos realizados com o objetivo de melhor adequar-se o fenômeno que se pretendia estudar, bem como foram diversos os pontos identificados como limitações do estudo, que não permitiam, pelo menos naquele momento, serem alterados sem prejuízo do cumprimento do cronograma estabelecido. É desta situação, e também baseado na experiência teórica adquirida com a revisão bibliográfica sobre o tema, que surgem as recomendações para trabalhos que pretendam seguir a mesma linha iniciada por este.

A primeira recomendação seria a de procederem-se estudos no mesmo modelo e com a mesma metodologia aqui apresentada, para diferentes sistemas de distribuição dos jatos, sendo possível alterar sua disposição, localização e número de orifícios de descarga, dentre outros fatores. Estas avaliações poderiam conduzir à otimização do sistema com relação a sua disposição, distância mínima e máxima entre saídas subsequentes, direcionamento, enfim, características geométricas que, baseadas no estudo hidrodinâmico considerando a modelagem aqui proposta, pudessem contribuir com a eficiência da mistura hidráulica da região de campo próximo.

Para o caso testado, percebe-se que o valor do Número de Richardson proposto como diretriz de dimensionamento estabelece em modelo um Número de Reynolds na faixa turbulenta. Este fato não necessariamente é verdadeiro para o protótipo, pois podem existir fatores que façam com que esta relação encontre outros pontos de convergência. A relação estabelecida entre os diâmetros para a modelagem ou as diferenças entre as viscosidades cinemáticas da água residuária e do líquido com farta presença de biossólidos encontrado no reator, podem ser fatores que alteram estes resultados.

Assim, seria interessante avaliar em modelo diferentes diâmetros de orifício, pois apesar de se ter encontrado resultados coerentes com o esperado, seria de extremo valor testar-se a modelagem proposta em diferentes situações de diâmetro, avaliando como estas alterações afetariam as relações entre os número de *Richardson* e de *Reynolds*.

Com relação à diferença de viscosidade cinemática dos fluidos, a avaliação do protótipo que serviu de base para este estudo em modelo, apresentada por Nassr (2000), indica diferenças de valores da ordem de 200 vezes, entre as viscosidades da água residuária

que chega no reator e o fluido presente no meio, composto pelo lodo anaeróbio com farta presença de biossólidos. Seria necessário, antes de mais nada, para se validar este resultado, que se procedessem mais ensaios para este tipo de avaliação em outras estruturas como esta que serviu de protótipo. Com isto, ficariam os desafios de se avaliar de que forma esta diferença implicaria na mudança de comportamento do jato sob efeito de empuxo, e como se poderia implantar em modelo esta diferença de viscosidades.

Ainda com relação aos orifícios de saída, além do orifício circular aqui testado, poderia ser verificado em modelo como se daria o comportamento do sistema sob diferentes formas de orifícios. Existem trabalhos teóricos de mecânica dos fluidos que avaliam este tipo de característica. Tentar aplicar estas teorias para este caso prático, complementando ainda com testes em modelo, poderia gerar resultados significativos.

Sem dúvidas, são diversas as possibilidades de ensaios a serem ainda realizados no modelo. O aprimoramento do instrumental instalado seria um dos fatores que contribuiria para isso. Utilizar técnicas de anemometria para se avaliar o comportamento da distribuição de velocidades ou das intensidades da turbulência apresentadas em diferentes pontos, bem como utilizar-se do sistema PIV (*Particle Image Velocimetry*) mapeando o comportamento do fluxo presente em diferentes seções transversais, seriam trabalhos possíveis de serem realizados no modelo, sendo que despenderiam mais tempo, mas que poderiam conduzir a resultados importantes.

Do trabalho desenvolvido aqui, se encontram ainda diversos registros de imagens, devidamente armazenados, que podem servir de base para a continuidade do estudo. Estes registros compõem-se das fitas de vídeo VHS geradas pelas filmagens, dos arquivos digitais gerados a partir da captura das imagens, armazenados em meio magnético, e das anotações pertinentes a cada um dos ensaios. Todo este material se encontra em poder do setor de hidráulica do Instituto de Pesquisas Hidráulicas.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABRAHAM, G. 1963. *Jet Diffusion in Stagnant Ambient Fluid*. Delft Hydraulics Laboratory. N° 29, série 1, grupo 14, seção 14.42.
- ALBERTSON, M. L., DAÍ, Y. B., JERSEN, R. A. e ROUSE, Hunter. 1948. Diffusion of submerged jets. *American Society of Civil Engineers*. Vol. 139, pag. 64.
- 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.
- GNANADIPATHY, A. E POLPRASERT, C. 1993. Treatment of a domestic wastewater with UASB reactors. *Wat. Sci. Tech*. Vol. 27, n° 1, pp. 195-203.
- GÓMEZ, Eugenio Giraldo. 1998. Modelacion matematica del processo de la digestion anaerobia para el tratamiento de aguas residuales industriales. *Fifth Latin American Round Table-Seminar of wastewater anaerobic treatment*. Viña del Mar, Chile, 27-30 de Outubro.
- 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.
- HANDEL, Adrianus C., LETTINGA, Gatze. 1994. Tratamento anaeróbio de esgotos: um manual para regiões de clima quente. Campina Grande: Epgraf.
- HANISCH, Werner Siegfried. 1995. *Modelagem hidrodinâmica de reatores anaeróbios de escoamento ascendente e manta de lodo (UASB)*. Dissertação de mestrado. Escola de engenharia, São Carlos, USP. São Paulo.

- KALYUZHNYI, Sergey e FEDOROVICH, Vyacheslav. 1997. Integrated mathematical model of UASB reactor. *8th International Conference on Anaerobic Digestion*. Vol. 1. Japão.
- KHAN, Nasim A., MEHROTRA, I. 1990. Performance of laboratory-scale upflow anaerobic sludge blanket (UASB) reactors. *Wat. Sci. Tech.* Vol. 22, nº 7/8, pp. 285-286.
- LETTINGA, G. e POL, L. W. Hulshoff. 1986. Advanced reactor design, operation and economy. *Wat. Sci. Tech.* Vol. 18, nº 12, pp. 99-108.
- 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.
- LETTINGA, G., VELSEN, A. F. M., HOBMA, S. W. ZEEW, W. 1980. Use of the Upflow Sludge Blanket (USB) reactor concept for biological wastewater treatment, especially for anaerobic treatment. *Biotechnology and Bioengineering*. Vol. 22, nº4, pp. 699-734.
- LIST, E. J. 1982. Turbulent jets and plumes. *Annual Review of Fluid Mechanics*. 14:189-212.
- 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.
- NASSR, Sandro Concli. 2000. *Modelagem hidrodinâmica de um Digestor Anaeróbio de Fluxo Ascendente: estudo das instabilidades de seu campo longínquo*. Dissertação de Mestrado. Instituto de Pesquisas Hidráulicas – UFRGS. Porto Alegre.
- PANTON, Ronald L. 1984. *Incompressible Flow*. Wiley-Interscience Publication. New York.
- RAJARATNAM, N. 1976. *Turbulent Jets*. Developments in water science, nº 5. Elsevier.
- REYNOLDS, A. J. 1974. *Turbulent Flow in Engineering*. John Wiley and Sons. Londres.
- RICOU, F. P. e SPALDING, D. B. 1961. Measurements of entrainment by axisymmetrical turbulent jets. *Journal of Fluid Mechanics*. Vol. 11, nº I, pp 21-32.

- 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.
- TENNEKES, H. e LUMLEY, J. L. 1980. *A First Course in Turbulence*. MIT Press. Cambridge.
- TRITTON, D. J. 1988. *Physical Fluid Dynamics*. Clarendon Press. Oxford.
- VERGARA Sánchez, Miguel A. 1995. *Técnicas de Modelacion en Hidraulica*. Alfaomega Grupo Editor. México.
- 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.
- WENTZEL, M. C., MOOSBRUGGER, R. E., SAM-SOON, P. A. L. N. S., EKAMA, G. A. And MARAIS, R. 1994. Tentative guidelines for waste selection, process design, operation and control of upflow anaerobic sludge bed reactors. *Wat. Sci. Tech.* Vol. 30, nº 12, pp. 31-42.
- WERLÉ, H. 1973. *Hydrodynamic Flow Visualization*. ONERA, França.
- WYGNANSKI, J., FIEDLER, H. 1969. Some measurements in the self-preserving jets. *Journal Fluid Mechanics*. Vol. 38, nº 3, pp. 577-612.



Impressão: Gráfica UFRGS
Rua Ramiro Barcelos, 2705 - 1º andar
Fone: 316 5088 Fax: 316 5083 - Porto Alegre - RS
E-mail: grafica@vortex.ufrgs.br