

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
INSTITUTO DE PESQUISAS HIDRÁULICAS

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM RECURSOS HÍDRICOS  
E SANEAMENTO AMBIENTAL

## **ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE CORRENTES DE DENSIDADE E JATOS**

**PEDRO LUIZ DA COSTA FERREIRA**

*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 Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental.*

**Orientação:** Prof<sup>ª</sup>. Ana Luiza De Oliveira Borges

**Co-orientação:** Prof. Rafael Manica

**Banca Examinadora:**

Prof. Elírio Ernestino Toldo Jr.

Prof. Alexandre Beluco

Prof. Eduardo Puhl

Porto Alegre, Janeiro de 2013.

## AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi desenvolvido no Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental do Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, sob orientação da Professora Ana Luiza de Oliveira Borges e co-orientação do Professor Rafael Manica, ambos da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Ao longo dos anos, diversas contribuições a esse trabalho foram feitas, seja do ponto de vista profissional, como pessoal. Deixo aqui os meus agradecimento a algumas pessoas com contribuições especiais.

Aos meus pais, José Luiz Pereira Ferreira e Eliane Amália da Costa Ferreira, pelo suporte familiar. Ao longo de um Mestrado, momentos de estresse e ansiedades são comuns, contudo, a eles eu agradeço pelas conversas e palavras de alento. Em especial ao meu pai, por mostrar-me a importância de um Mestrado e incentivar a realização deste, mesmo sendo ele um empresário do mercado privado.

À minha irmã, Martha da Costa Ferreira, por ser um exemplo de estudos e inteligência, sempre servindo como motivação para que eu mesmo evoluísse.

À Professora Ana Luiza de Oliveira Borges, pelo conhecimento, orientação e contribuição na presente dissertação. Pelas leituras e correções, as quais tomaram os seus dias, inclusive finais de semana.

Ao Professor Rafael Manica, por seu conhecimento e contribuições imprescindíveis para o desenvolvimento deste trabalho. Pelo rápido atendimento, auxiliando na agilidade do desenvolvimento desta dissertação.

Ao Professor Rogério Dornelles Maestri, pelas discussões, contribuindo com ideias para o desenvolvimento. Em especial, pela oportunidade única de realizar este mestrado como parte do meu trabalho, podendo conciliar as duas atividades, sem precisar interromper alguma delas.

À empresa PETROBRAS pelo financiamentos das pesquisas realizadas no laboratório NECOD e, em especial, pela oportunidade de trabalhar como pesquisador em seus projetos, podendo transformar esta dissertação em parte do meu trabalho. Ao Geólogo Adriano Viana, pelo interesse em meu trabalho e suporte a ele.

À Engenheira Carolina Holz Boffo e o Engenheiro Richard Eduard Dücker, pelas discussões sobre os resultados encontrados e novas ideias para a execução dos experimentos.

Aos hidrotécnicos Cristian Schenk, Marina de Conto e Rafael Rodrigues pelo auxílio na montagem e execução dos experimentos, sempre dispostos a ajudar nas tarefas.

Ao Professor Benjamin Kneller, pelo conhecimento transmitido em cursos e conversas. Pela disposição para contatos para a transmissão de conhecimento. Pela oportunidade de trabalhar auxiliando-o em seus experimentos, quando presente no NECOD.

Aos demais integrantes e ex-integrantes da equipe do NECOD, que de alguma forma contribuíram para a presente dissertação, Eva Veiga, Thaís Carvalho, Lisiane Cristina Silva, Daniel Bayer, Leonardo Torres, Cristiano Fick, Camila Castro, Eduardo Puhl, Renato Brito, Elton Farina, Marcelo Lopes, Reinaldo Pedroso, Sérgio Rodrigues, Amauri Barcelos e Rafael Gonçalves.

## RESUMO

Buscando compreender melhor os fenômenos envolvidos na geração de correntes de turbidez hiperpicnais e hipopicnais, o presente trabalho abordou o tema apresentando uma análise comparativa com tipos de jatos e plumas. As análises realizadas foram quanto às características geométricas (espessura da corrente), dinâmicas (velocidade), concentração e fluxos (volumétrico, de quantidade de movimento e oriundo da diferença de massas específicas). Através de modelagem física, foram realizados experimentos, majoritariamente, em ambiente salino, contudo, também utilizou-se ambiente de água pura.

Os ensaios foram realizados nas instalações do laboratório NECOD, utilizando um canal de aço e vidro, medindo 1540 cm de comprimento, 40 cm de largura (dividido em duas partes de 20 cm, sendo utilizada somente uma delas) e 100 cm de profundidade. O material utilizado para a geração das correntes foi composto por uma mistura de água e carvão mineral do tipo Cardiff 205, tendo a sua massa específica variando entre 1012 kg/m<sup>3</sup> e 1033 kg/m<sup>3</sup>. Já o fluido ambiente foi composto por água e uma mistura de água e sal, tendo a sua massa específica entre 996 kg/m<sup>3</sup> e 1024 kg/m<sup>3</sup>. Seis seções ao longo do canal foram monitoradas, a 12,5 cm, 50 cm, 110 cm, 315 cm, 520 cm e 720 cm do início do fluxo. Em cada uma, registros visuais possibilitaram a avaliação das espessuras das correntes, enquanto sondas ADV possibilitaram a obtenção das velocidades longitudinais. Em seis ensaios, houveram coletas do material em transporte pela corrente, possibilitando analisar as suas concentrações.

Pôde-se também registrar a transição entre correntes hiperpicnais e hipopicnais, notando-se uma relação entre o ponto de desprendimento e a diferença entre as massas específicas do fluido ambiente e do fluido injetado no canal.

Sobre a espessura das correntes hiperpicnais, observou-se que elas não apresentaram um crescimento constante, como em casos de jatos de parede, e os seus valores foram menores.

O decaimento das velocidades das correntes foi analisado em relação às suas origens real e virtual. No primeiro caso, o decréscimo das correntes foi mais suave e não tão definido, quanto o caso de jatos de paredes. Para o segundo, a sua evolução não foi linear, como esperado, além de apresentarem números de Reynolds iniciais diferentes dos esperados.

A relação de decaimento do fluxo de quantidade de movimento inicial apresentou uma relação semelhante a jatos, porém, em uma ordem de grandeza maior. Já o crescimento do fluxo oriundo da diferença de massas específicas não mostra-se tão linear, quanto jatos, e com valores superiores. Visto as diferenças entre esses dois fluxos, não se pôde classificar as correntes hiperpicnais e hipopicnais como jatos.

Analisou-se a diluição adimensional, a qual não apresentou um comportamento homogêneo, como em jatos e plumas, porém, os seus valores se aproximaram mais de plumas, quanto à ordem de grandeza.

Por fim, considera-se que jatos apresentam a quantidade de movimento constante, enquanto plumas apresentam o fluxo oriundo da diferença de massas específicas constante. Para o caso de correntes hiperpicnais e hipopicnais, nenhum dos dois comportamentos foi observado. Ambos apresentaram-se de forma não definida.

Através das análises realizadas neste trabalho, notou-se que as correntes de densidade geradas em laboratório não podem ser relacionadas diretamente com jatos e plumas, sendo fenômenos distintos. Contudo, a quantidade de movimento inicial e a diluição adimensional apresentam comportamentos característicos para as correntes, merecendo maiores atenções em trabalhos futuros. Por último, pôde-se observar um comportamento padrão para o desprendimento das correntes, passando de hiperpicnal para hipopicnal.

## ABSTRACT

Searching for a better understanding of the phenomenon involved in the generation of hyperpycnal and hypopycnal density current, the currently work shows an analysis comparing it with different kinds of jets and plumes. The analyses were about geometric (thickness), dynamic (velocity), concentration and flux (volumetric, momentum and buoyancy). Using physical modeling, it was made experiments using salt water (in the majority) and fresh water.

The experiments were made in the facilities of NECOD lab, using a steel and glass flume measuring 1540 cm long, 40 cm wide (divided into two parts of 20 cm, which only one of this was used) and 110 cm deep. The material used to create the current was a mix between fresh water and mineral coal Cardiff 205, with its density between 1012 kg/m<sup>3</sup> and 1033 kg/m<sup>3</sup>. The ambient fluid was composed of fresh water, for the majority of the experiments, and salt water, with the density between 996 kg/m<sup>3</sup> and 1024 kg/m<sup>3</sup>. Six section along the channel were analyses: 12.5 cm, 50 cm, 110 cm, 315 cm, 520 cm and 720 cm from the flux source. Each one had a visual register, to measure the geometry, and an ADV probe, to measure its longitudinal velocity. In six experiments it was collected material to analyze the flow concentration.

Analyzing the transition from hyperpycnal flow to hypopycnal flow, it could be noticed a linear relation between the detachment point and the difference of density in the ambient fluid and the initial injected flow.

About the thickness of the hyperpycnal flows, it was observed a non constant growth, as it happens in wall jets case, as well as lower heights.

The decrease of the current velocity was analyzed against the distance from the real and virtual source of it. In the first case, the decrease was smother and not well defined as in wall jets. For the second case, the evolution was non linear, as it was expected, and it present lower initial Reynolds numbers from what was expected.

The decrease of the initial momentum flux shows a similar relation to jets, but in a higher greatness. In the other hand, the growth of the buoyancy flux was non linear and bigger than those in the jets. Thus, it was not possible to classify hyperpycnal and hypopycnal flows as jets.

Analyzing the dimensionless dilution, it didn't show a homogeneous behavior as in jets and plumes. But its values got closer to the plumes greatness.

Bring to an end, jets are considered to have a constant momentum, while plumes have constant buoyancy. For hyperpycnal and hypopycnal flow none of those behaviors were observed. There both had an undefined behavior.

Using the analysis of the currently work, it was noticed that the density currents produced in laboratory cannot be related to plumes and jets. Both are different phenomenon. However, the initial momentum and the dimensionless dilution show a characteristic behavior, needing to be more analyzes in futures works. Finally, it could be observed a standard behavior between the density differences and the detachment points.

## SUMÁRIO

|  |                                      |
|--|--------------------------------------|
| 1. INTRODUÇÃO .....  | 15                                   |
| 2. OBJETIVOS.....  | 17                                   |
| 2.1.Objetivo Principal.....  | 17                                   |
| 2.2.Objetivo Secundário.....   | 17                                   |
| 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....  | 18                                   |
| 3.1.Fluxos Gravitacionais.....   | 18                                   |
| 3.1.1.Conceito e Tipos de Fluxos Gravitacionais .....                                  | 18                                   |
| 3.1.2.Correntes de Turbidez.....   | 20                                   |
| 3.1.2.1.Geometria de Correntes de Turbidez .....                                       | 20                                   |
| 3.1.2.2.Tipos de Correntes de Turbidez .....   | 21                                   |
| 3.1.2.3.Correntes Hiperpicnais e Hipopicnais.....                                      | 22                                   |
| a) Registro da Ocorrência de Correntes Hiperpicnais e Hiperpicnais na<br>Natureza..... | 23                                   |
| 3.1.2.4.Dinâmica das Correntes de Turbidez .....                                       | 24                                   |
| a) Perfil de Velocidades de Correntes Hiperpicnais.....                                | 24                                   |
| 3.2.Jatos e Plumas .....   | 26                                   |
| 3.2.1.Tipos de Jatos.....  | 27                                   |
| 3.2.1.1.Jatos Flutuantes .....   | 28                                   |
| 3.2.1.2.Jatos de Parede .....  | 29                                   |
| 3.2.1.3.Jatos de Particulados .....  | 30                                   |
| 3.2.2.Parâmetros que Definem Jatos e Plumas .....                                      | 31                                   |
| 3.2.2.1.Perfis de Velocidade e Temperatura .....                                       | 31                                   |
| 3.2.2.2.Geometria e Fluxos .....   | 33                                   |
| 3.2.2.3.Comportamento de Jatos e Plumas.....   | 36                                   |
| 3.3.Analogia com Correntes Hipopicnais e Hiperpicnais .....                            | 40                                   |
| 4. APARATOS EXPERIMENTAIS .....  | 43                                   |
| 5. METODOLOGIA DE ENSAIO .....   | 49                                   |
| 5.1.Testes Preliminares .....  | 49                                   |
| 5.2.Ensaio .....   | 51                                   |
| 5.2.1.Metodologia de Ensaio .....  | 52                                   |
| 5.2.2.Metodologia de Tratamento de Dados .....   | 59                                   |
| 5.2.2.1.Espessura das Correntes .....  | 59                                   |
| 5.2.2.2.Velocidade de Avanço .....   | 60                                   |
| 5.2.2.3.Concentração Local.....  | 61                                   |
| 5.2.2.4.Parâmetros Característicos do Escoamento.....                                  | 61                                   |
| 6. RESULTADOS .....  | 64                                   |
| 6.1.Resultados dos Testes Preliminares .....   | 64                                   |
| 6.1.1.Conclusões Parciais .....  | <b>Erro! Indicador não definido.</b> |
| 6.2.Resultados dos Ensaio .....  | 67                                   |
| 6.2.1.Análise Qualitativa .....  | 67                                   |
| 6.2.2.Análise Quantitativa.....  | 72                                   |
| 6.2.2.1.Características Geométricas: espessura da corrente.....                        | 72                                   |
| 6.2.2.2.Características Dinâmicas .....  | 74                                   |
| a) Velocidade Inicial do Fluxo .....   | 74                                   |
| b)Relação Entre a Velocidade de Propagação da Corrente e a Distância .....             | 75                                   |
| 6.2.2.3.Fluxos .....   | 78                                   |
| a) Fluxo de Quantidade de Movimento.....   | 82                                   |
| b) Fluxo de Flutuabilidade (Buoyancy Flux) .....                                       | 84                                   |
| c) Diluição Adimensionalizada .....  | 86                                   |
| d) Comparação entre os Fluxos Locais e Iniciais.....                                   | 87                                   |
| 7. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....   | 91                                   |



|                                    |    |
|------------------------------------|----|
| 8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... | 96 |
|------------------------------------|----|

## INDICE DE FIGURAS

|   |    |
|---|----|
| Figura 3.1: Classificação dos fluxos gravitacionais sedimentares (Manica, 2009). .....  | 19 |
| Figura 3.2: Corrente de turbidez produzida em laboratório, distinguindo as partes da cabeça (e sua ponta, chamada de nariz) e a parte do corpo. Sentido do fluxo é da esquerda para a direita (Puhl, 2006). .....   | 20 |
| Figura 3.3: Tipos de correntes de densidade, sendo $\rho_c$ massa específica da corrente, $\rho_a$ massa específica do fluido ambiente, $\rho_{a1}$ e $\rho_{a2}$ massas específicas de estratificação do fluido ambiente (Mulder e Alexander, 2001). ..... | 22 |
| Figura 3.4: Dois perfis medidos no rio Zaire: (T) temperatura, (S) salinidade, ( $\sigma_t$ ) massa específica e (Tr) transmissividade de luz (Pak & Spinrad, 1984). .....  | 24 |
| Figura 3.5: Perfil de velocidade em um rio com lâmina de água ha (a) e perfil de velocidade (b) e concentração (c) em correntes de turbidez.....  | 25 |
| Figura 3.6: Jato turbulento (Fischer, 1979). .....  | 27 |
| Figura 3.7: Pluma de um vulcão (USGS, 1982). .....  | 27 |
| Figura 3.8: Jato flutuante: fluxo de cima para baixo (adaptado de Fan, 1967 apud Fischer, 1979). .....  | 29 |
| Figura 3.9: Jato de parede (Lauder & Rodi, 1983). .....   | 30 |
| Figura 3.10: Perfis de velocidades do jato de parede sobre superfície lista (esquerda) e superfície rugosa (direita) (Rostamy et al., 2011). .....  | 30 |
| Figura 3.11: Distribuição de Gauss com a indicação do “half-width”. .....   | 31 |
| Figura 3.12: Exemplo de perfil transversal de velocidade ou de temperatura em jatos e plumas em escoamento em um canal (sentido do escoamento dado pela seta). ....   | 32 |
| Figura 3.13: Desenvolvimento da geometria de três correntes, com o número de Reynolds abaixo de 10 (a), igual a 10 (b) e maior que 10 (c). Sentido do fluxo de cima para baixo (Azimi et al., 2012). .....  | 34 |
| Figura 3.14: Esquema experimental de Kotsovinos & List (1977). Sentido do fluxo: de baixo para cima. ....   | 37 |
| Figura 3.15: Diluição adimensionalizada em função da distância adimensionalizada (Kotsovinos & List, 1977). .....   | 38 |
| Figura 3.16: Caracterização de jatos e plumas de acordo com o fluxo da quantidade de movimento (adaptado de Papanicolaou & List, 1988). .....   | 38 |
| Figura 3.17: Comportamento da relação m/M ao longo do escoamento, para o caso de jatos particulados (adaptado de Hall et al., 2010). .....  | 38 |
| Figura 3.18: Adimensionalização da velocidade em função da distância adimensionalizada (modificada Papanicolaou & List, 1988). .....  | 39 |
| Figura 3.19: Correlação da velocidade adimensionalizada para jatos de parede (modificada Rajaratnam, 1976). .....   | 40 |
| Figura 3.20: Variação da velocidade adimensionalizada para jatos de parede (modificada Rajaratnam, 1976). .....   | 40 |
| 2. Imagens das correntes com diferentes diferenças de massa específica, tanto da corrente, quanto do fluido ambiente. Fórmula da variação de massa específica $\Delta\rho = (\rho_c - \rho_a) / \rho_a$ (Boffo, 2010). .....                                | 42 |
| Figura 4.1: Vista geral do Canal Unidimensional de Médio Porte. ....  | 43 |
| Figura 4.2: Dimensões do canal unidimensional de médio porte a ser utilizado. ....  | 44 |
| Figura 4.3: Reservatório (no primeiro plano da fotografia) para a alimentação dos ensaios.....  | 45 |
| Figura 4.4: Medidor de vazão. ....  | 45 |
| Figura 4.5: Difusor. ....   | 46 |
| Figura 4.6: Medidores de velocidade por ultrassom Vectrinos.....  | 46 |
| Figura 4.7: Conjunto UVP (manual – Met-flow). .....   | 47 |
| Figura 4.8: Canal Unidimensional de Pequenas Dimensões empregado nos ensaios preliminares. ....   | 48 |

|  |    |
|--|----|
| Figura 5.1: Distribuição granulométrica do carvão 205 utilizado.....   | 49 |
| Figura 5.2: Imagem do instante inicial do escoamento no canal, apresentando o difusor de saída e as sondas Vectrinos.....  | 51 |
| Figura 5.3: Esquema da colocação dos equipamentos. ....  | 51 |
| Figura 5.4: Croqui das instalações e posicionamento dos equipamentos para os ensaios com ambiente de água clara. Sentido do fluxo é da esquerda para a direita. ....   | 56 |
| Figura 5.5: Croqui das instalações e posicionamento dos equipamentos para os ensaios com ambiente salino. Sentido do fluxo é da esquerda para a direita.....   | 57 |
| Figura 5.6: Croqui das instalações e posicionamento dos equipamentos para os ensaios com ambiente salino com medições próximas à saída do difusor. Sentido do fluxo é da esquerda para a direita. ....             | 58 |
| Figura 5.7: Três instantes de uma corrente hiperpicnal: a) 0 s, b) 5 s, c) 10 s após a sua passagem pelo ponto de medida. ....   | 59 |
| Figura 5.8: Três instantes de uma corrente hipopicnal (na foto em questão, também há a geração de uma corrente hiperpicnal, junto ao fundo): a) 0 s, b) 5 s, c) 10 s após a sua passagem pelo ponto de medida..... | 60 |
| Figura 6.1: Funcionamento da sonda de UVP (adaptado do manual – Met-flow). ....  | 66 |
| Figura 6.2: a) corrente do ensaio E6 (seção do difusor plena) e b) corrente do ensaio E7 (seção do difusor reduzida). Em destaque o aumento da espessura da corrente. ..   | 67 |
| Figura 6.3: Análise do ponto de desprendimento em relação à diferença entre as massas específicas.....   | 69 |
| Figura 6.4: Relação distância pela espessura da corrente. ....   | 73 |
| Figura 6.5: Perfis de velocidade para as vazões: a) 6 l/min, b) 10 l/min, c) 14 l/min e d) 10 l/min com meia seção. ....   | 75 |
| Figura 6.6: Variação da velocidade média de avanço da corrente, no eixo do canal, para os ensaios.....   | 77 |
| Figura 6.7: Relação da distância adimensionalizada e velocidade adimensionalizada comparada com a de Rajaratnam (1976). ....   | 77 |
| Figura 6.8: Relação da distância virtual a origem adimensionaliza e velocidade adimensionalizada comparada com a de Rajaratnam (1976). ....  | 78 |
| Figura 6.9: Variação do fluxo da quantidade de movimento, no eixo do canal, para os ensaios.....   | 83 |
| Figura 6.10: Distância adimensionalizada e relação da quantidade de movimento pela velocidade comparada com a de Papanicolau & List (1988). ....   | 83 |
| Figura 6.11: Variação da massa específica, no eixo do canal, para os ensaios. ....   | 84 |
| Figura 6.12: Distância e relação das concentrações da corrente e inicial, no eixo do canal, para os ensaios. ....  | 85 |
| Figura 6.13: Variação do fluxo oriundo da diferença de massa específica, no eixo do canal, para os ensaios.....  | 86 |
| Figura 6.14: Relação das velocidades medidas e velocidades calculadas por $3,85.B^{1/3}.x^{-1/3}$ .....  | 86 |
| Figura 6.15: Distância adimensional e diluição adimensional. As linhas coloridas representam as tendências de acordo com o ponto de medida. ....   | 87 |
| Figura 6.16: Distância adimensionalizada pela abertura do bocal e Fluxo da quantidade de movimento adimensionalizado. ....   | 89 |
| Figura 6.17: Distância adimensionalizada e Fluxo da quantidade de movimento adimensionalizado. ....  | 89 |
| Figura 6.18: Distância adimensionalizada e Fluxo de flutuabilidade adimensionalizado.....  | 90 |

## INDICE DE TABELAS

|  |    |
|--|----|
| Tabela 5.1: Série de ensaios preliminares executados.....  | 50 |
| Tabela 5.2: Resumo dos ensaios.....  | 52 |
| Tabela 6.1: Resultados da série de ensaios preliminares.....   | 65 |
| Tabela 6.2: Massa específica, número de Reynolds, fluxos iniciais e ponto de desprendimento nos ensaios E <sub>1</sub> a E <sub>15</sub> ..... | 68 |
| Tabela 6.3: Imagens dos experimentos E <sub>1</sub> a E <sub>9</sub> (as imagens não são do mesmo local em todos os ensaios).....              | 70 |
| Tabela 6.4: Imagens dos experimentos E <sub>10</sub> a E <sub>15</sub> (imagens dos mesmos locais em todos os ensaios).....                    | 71 |
| Tabela 6.5: Dados das espessuras das correntes.....  | 73 |
| Tabela 6.6: Resumo dos resultados dos ensaios de Boffo (2010).....   | 73 |
| Tabela 6.7: Dados das velocidades média e máximas avaliadas para o difusor na entrada do canal.....  | 75 |
| Tabela 6.8: Dados das grandezas geométricas e dinâmicas.....   | 76 |
| Tabela 6.9: Dados dos fluxos iniciais e distância característica.....  | 79 |
| Tabela 6.10: Fluxos locais, com ambiente constituído por água pura na região distal do canal.....  | 79 |
| Tabela 6.11: Fluxos locais, com ambiente salino na distal do canal.....  | 80 |
| Tabela 6.12: Fluxos locais, com ambiente salino na região proximal do canal ( $\rho_a = 1024$ kg/m <sup>3</sup> ).....                         | 81 |
| Tabela 6.13: Fluxos locais, com ambiente salino na região proximal do canal ( $\rho_a \sim 1010$ kg/m <sup>3</sup> ).....                      | 82 |
| Tabela 6.14: Relações entre os fluxos de quantidade de movimento inicial e local.....  | 88 |
| Tabela 6.15: Relações entre os fluxos oriundos da diferença de massa específica inicial e local.....   | 88 |
| Tabela 7.1 -Síntese do comportamento dos fluxos.....   | 92 |

## LISTA DE SÍMBOLOS

$A_{\text{difusor}}$  – área difusor [ $L^2$ ]

$B$  – fluxo inicial oriundo da diferença de massa específica [ $L^4/T^3$ ]

$\beta$  – fluxo específico oriundo da diferença de massa específica [ $L^4/T^3$ ]

$C_o$  – concentração volumétrica inicial [-]

$D$  – diâmetro do jato [ $L$ ]

$d$  – tamanho da partícula [ $L$ ]

$F_o$  – número de Froude densimétrico da partícula [-]

$g$  – aceleração da gravidade [ $L/T^2$ ]

$g'$  – aceleração da gravidade reduzida [ $L/T^2$ ]

$h$  – altura da corrente [ $L$ ]

$h_a$  – lâmina de água [ $L$ ]

$h_o$  – abertura do difusor [ $L$ ]

$L_{\text{canal}}$  – largura do canal [ $L$ ]

$L_{\text{difusor}}$  – largura do difusor [ $L$ ]

$L_m$  – distância característica [ $L$ ]

$L_Q$  – comprimento característico de geometria [ $L$ ]

$M$  – fluxo inicial de quantidade de movimento [ $L^4/T^2$ ]

$m$  – fluxo específico de quantidade de movimento [ $L^4/T^2$ ]

$\mu$  – viscosidade dinâmica [ $M/L.T$ ]

$Q$  – fluxo inicial de volume [ $L^3/T$ ]

$q$  – fluxo específico de volume [ $L^3/T$ ]

$R_o$  – número de Richardson inicial [-]

$R_p$  – número de Richardson local [-]

$\Re_p$  – número de Reynolds local [-]

$\Re_s$  – número de Reynolds da partícula [-]

$\rho_a$  – massa específica do fluido ambiente [ $M/L^3$ ]

$\rho_c$  – massa específica da corrente [ $M/L^3$ ]

$\rho_w$  – massa específica da água [ $M/L^3$ ]

$\rho_s$  – massa específica do sedimento [ $M/L^3$ ]

$\rho_o$  – massa específica da mistura [ $M/L^3$ ]

$V$  – velocidade da cabeça da corrente [ $L/T$ ]

$v$  – velocidade local do fluxo [ $L/T$ ]

$v_m$  – velocidade na linha central do fluxo [ $L/T$ ]

$v_o$  – velocidade inicial do fluxo [L/T]

$v_s$  – velocidade de queda da partícula [L/T]

$x$  – eixo longitudinal [L]

$x_o$  – ponto inicial do fluxo [L]

$x'$  – distância à origem virtual do jato [L]

$\xi$  – distância adimensional [-]

$y$  – eixo transversal [L]

$y_m$  – altura da corrente para a velocidade máxima [L]

$y_{1/2}$  – altura da corrente para metade da velocidade máxima [L]

$\psi$  – diluição adimensional [-]

## 1. INTRODUÇÃO

A alguns fluxos na natureza dá-se o nome de fluxo gravitacional. Tais fenômenos levam esse nome por apresentarem diferença de densidade entre dois fluidos, a qual causa uma ação diferencial de forças gravitacionais, gerando o movimento dos fluidos envolvidos. Exemplos disso podem ser dados pelo encontro de duas massas de ar com temperaturas diferentes, avalanches, gases expelidos por erupção vulcânica, rios entrando no oceano de água salgada, entre outros.

Podemos destacar quatro tipos de fluxos gravitacionais: o fluxo de grãos, o fluxo de detritos, o fluxo de liquefação e o fluxo de turbidez. Esse último, também chamado de corrente de turbidez, é um dos principais geradores de depósitos sedimentares no oceano, os quais podem ou não acabar por se transformarem em reservatórios de hidrocarbonetos (se alcançarem as ideais condições de composição de materiais, temperatura e pressão).

A chegada de um rio ao oceano gera, através do aporte de sedimentos, uma formação de depósitos sedimentares, os quais apresentam diferentes características. Em função da capacidade de transporte do rio e dependendo das características hidráulicas deste rio, ele transporta sedimentos que variam desde siltes, argilas e matérias orgânicas, até areia, cascalhos e grandes fragmentos de rocha. O material mais grosso tende a se depositar mais próximo à saída do rio, enquanto o restante gera um delta, logo na sua desembocadura ou continua a se movimentar, por ação de correntes de densidade, para partes mais distantes. O material mais fino tende a seguir, até mesmo, quilômetros oceano adentro, depositando-se mais adiante, gerando pacotes sedimentares.

Assim, certas frações de sedimentos (mais finas), ao entrarem no oceano, podem gerar uma corrente de turbidez, a qual pode se deslocar no meio do fluido ambiente (tipo mesopical), junto ao fundo (tipo hiperpical) ou se desprender em determinado ponto, passando a se deslocar junto ao topo do fluido ambiente (tipo hipopical), cada uma apresentando características distintas. As condições para a ocorrência dos dois últimos tipos é, até hoje, motivo de divergência entre diversos autores. Muitos afirmam que a forma como uma corrente de turbidez evolui no meio é uma questão de diferença de densidade entre os fluidos, onde, se o fluxo de entrada (o rio, no exemplo anterior) apresenta uma densidade menor que o fluido ambiente (oceano, no exemplo), acabará por gerar uma corrente junto ao topo da superfície líquida. Contudo, o trabalho de Boffo (2010), por exemplo, mostra casos em que a situação ocorrida foi inversa, ou seja, o aporte sólido pode evoluir junto ao fundo. Em uma tentativa de compreender melhor o ocorrido neste trabalho, buscou-se a definição de

jatos e plumas, os quais são fluxos regidos pela quantidade de movimento e flutuabilidade, respectivamente, procurando uma possível analogia entre os fenômenos.

Para a formação de fluxos gravitacionais em laboratório, em trabalhos como esse, utilizam-se difusores na entrada de canais. Tais estruturas buscam suavizar a entrada dos fluxos, reduzindo a sua quantidade de movimento, logo, a semelhança do seu comportamento com o de um jato, contudo, sem se assemelhar a uma pluma, que é regida pelo fluxo oriundo da diferença de massa específica.

Buscando traçar um paralelo entre os jatos e plumas com as correntes hiperpicnais e hipopicnais, uma vez que esses fenômenos são regidos pela quantidade de movimento, pelo fluxo oriundo da diferença de massa específica e pela descarga, o atual trabalho pretende explorar um pouco mais a temática através de esclarecimentos sobre os fatores envolvidos nos fenômenos. Enquanto jatos são regidos pelo fluxo de quantidade de movimento, plumas são regidas pelo fluxo oriundo da diferença de massa específica. Desta mesma forma, busca-se verificar se as correntes hiperpicnais e hipopicnais são regidas mais fortemente por um desses fluxos ou pelo outro. Com isso, procura-se encontrar uma explicação para a formação observada em Boffo (2010), onde correntes, com densidade inicialmente menor do que a do meio ambiente, deslocaram-se junto ao fundo, enquanto esperava-se o oposto.



## **2. OBJETIVOS**

### **2.1. Objetivo Principal**

Este trabalho tem por objetivo principal gerar fluxos hiperpicnais e hipopicnais através de modelagem física, buscando estabelecer uma analogia entre a sua formação e a teoria de jatos e plumas, ou seja, buscando analisar se as correntes de turbidez geradas através da injeção de mistura, por meio de difusores, se portam à semelhança de um jato ou à uma pluma ou se, realmente, se portam como fluxos gravitacionais. Para tanto, pretendeu-se identificar nos fluxos os parâmetros equivalentes àqueles que caracterizam os jatos e plumas, traçando-se um paralelo entre eles.

### **2.2. Objetivo Secundário**

Os objetivos secundários deste trabalho são:

- desenvolver uma metodologia experimental para o estudo desse fenômeno;
- avaliar o efeito da velocidade de injeção sobre os parâmetros cinemáticos da evolução da corrente;
- avaliar o efeito da diferença de concentrações (ambiente e corrente) sobre a evolução do fluxo;
- avaliar as características geométricas das correntes hiperpicnais, comparando-as com as encontradas em jatos;
- estabelecer parâmetros que caracterizem correntes hiperpicnais e hipopicnais.

### 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1. Fluxos Gravitacionais

##### 3.1.1. Conceito e Tipos de Fluxos Gravitacionais

Os fluxos gravitacionais, também chamados de corrente de densidade, se caracterizam pela diferença de massa específica (e, conseqüentemente, densidade) entre fluidos. Sob a ação dessa diferença, a força gravitacional passa a agir nos fluidos, disparando o movimento entre eles. Esta situação pode ocorrer na presença de diferentes temperaturas, diferentes concentrações de sedimentos ou diferentes tipos de fluidos (água clara e água salina, por exemplo).

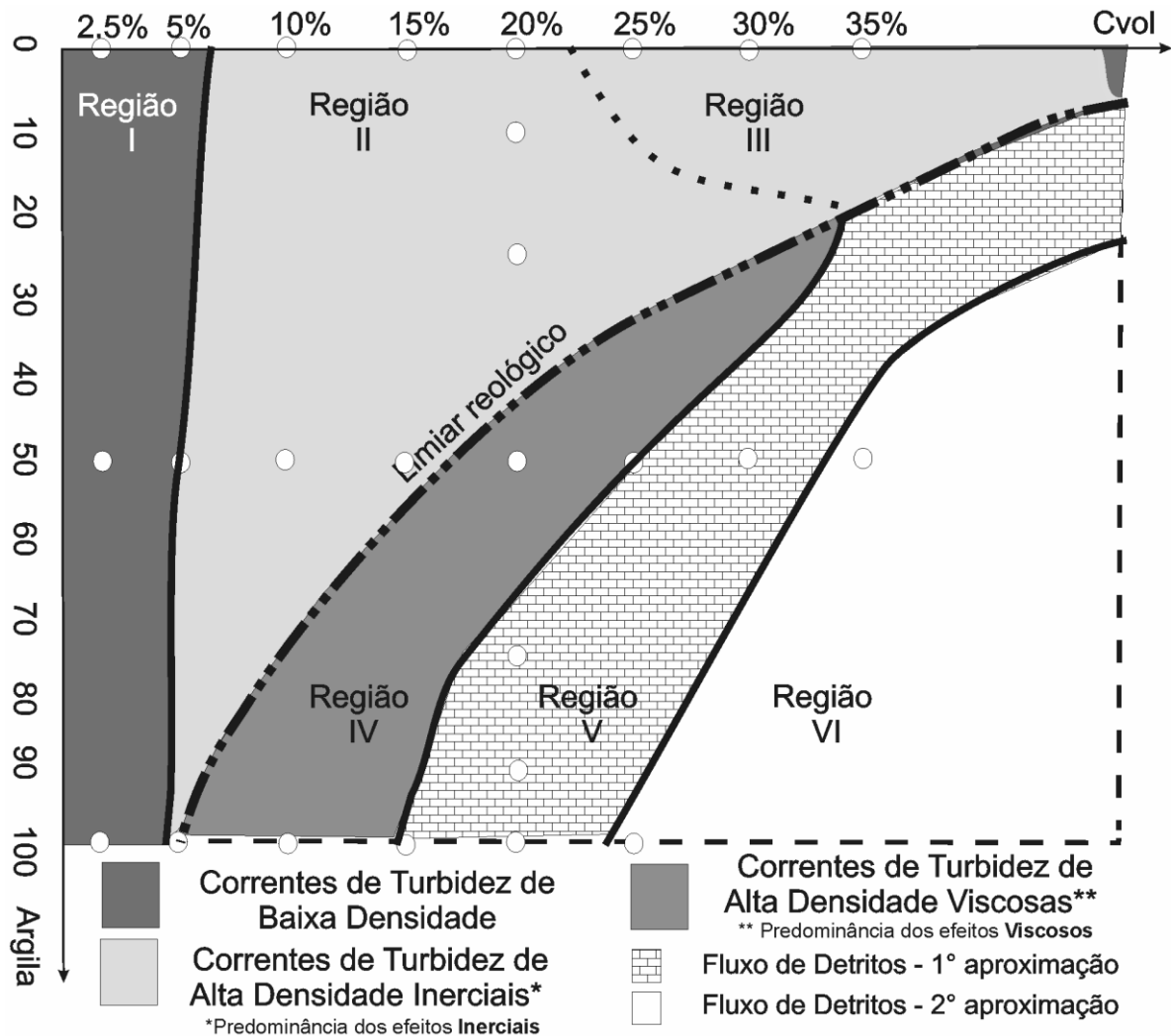
Uma vez disparado o mecanismo de movimentação da corrente de densidade, observa-se a possibilidade de geração de quatro tipos de fluxos (Middleton & Hampton, 1976):

- (i) O fluxo de grãos, característico de terrenos com elevada declividade. Os sedimentos são mantidos em suspensão devido à colisão entre eles, uma vez que a mistura não apresenta uma matriz coesiva, aumentando o atrito interno;
- (ii) O fluxo de detritos ocorre através da formação de uma matriz coesiva com grande viscosidade, sendo composta pelo fluido intersticial misturado com as partículas mais finas. Essa matriz transporta grãos maiores, sendo que o escoamento é mais próximo do laminar e apresenta pouca variação de velocidade interna;
- (iii) O fluxo liquefeito dá-se pelo escape de fluido intersticial. Nesse tipo de fluxo encontra-se elevada poro-pressão e movimento ascendente do líquido intersticial, apresentando um suporte parcial dos sedimentos;
- (iv) O fluxo de turbidez apresenta partículas em suspensão, sendo que o movimento ocorre pela diferença entre a massa específica desta mistura com partículas em suspensão e a do fluido ambiente.

Segundo Shanmugam (2006), existem diversas formas de classificações dos fluxos gravitacionais, como a partir da “densidade do fluido (concentração de grãos); mecanismo de suporte dos grãos; estado do fluxo; comportamento reológico; tamanho e composição do grão”. Contudo, ele considera essas definições inconsistentes, pois todas as propriedades citadas influenciam-se mutuamente.

Manica (2009) propôs uma classificação dos fluxos gravitacionais baseada em diversas características, como as reológicas, a concentração volumétrica do fluxo e a presença de material coesivo. Foram estabelecidas seis diferentes regiões de classificação do fluxo, assim nomeadas: região I - correntes de turbidez de baixa densidade; região II e III (leve

diferença entre elas, como no perfil de velocidades e no perfil de fluxo de sedimentos, entre outros) - correntes de turbidez de alta densidade inercial; região IV - correntes de turbidez de alta densidade viscosa; região V - fluxos de detritos; região VI - fluxos de detritos, contudo apresentando diferenças de propriedades hidrodinâmicas com relação à região V (Figura 3.1).



**Figura 3.1: Classificação dos fluxos gravitacionais sedimentares (Manica, 2009).**

A região I apresenta correntes com altura de cabeça maior (região frontal da corrente) do que a do corpo (região logo após a cabeça), enquanto que as regiões II a IV apresentam cabeça e corpo com alturas iguais e as regiões V e VI apresentam uma preponderância da altura do corpo. Os fluxos das regiões I a III apresentam comportamento reológico de fluidos newtonianos, enquanto os demais apresentam comportamento não-newtoniano. Sobre as velocidades, as regiões I e II possuem velocidades da cabeça superior ao do corpo, enquanto o oposto é visto nas outras regiões. Outras características podem ser observadas, porém não serão descritas aqui. Estas diferentes regiões de classificação dos fluxos gravitacionais,

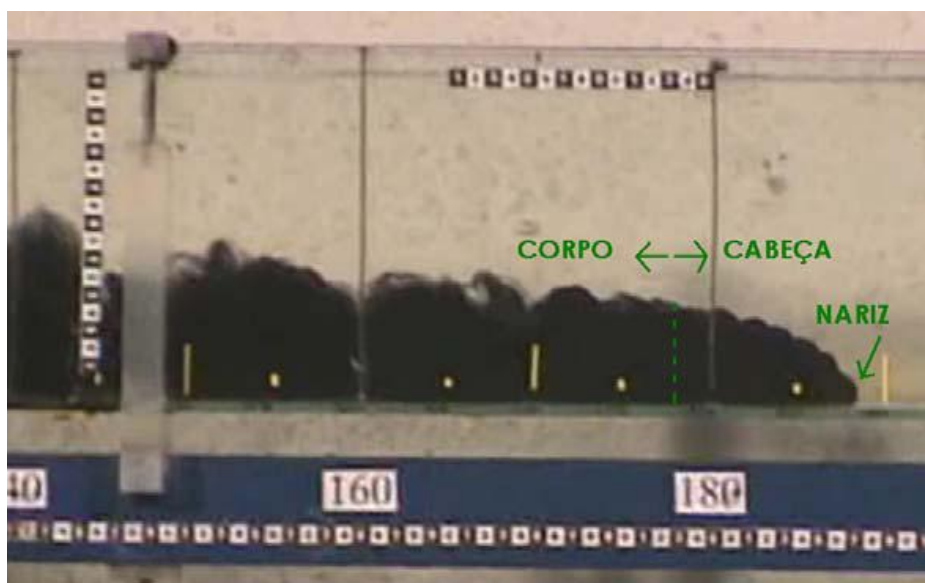
referenciadas à presença de material coesivo (teor de argila) e à concentração volumétrica, podem ser vistas na figura 3.1.

### 3.1.2. Correntes de Turbidez

Conceitualmente, uma corrente de turbidez é aquela gerada pela diferença de densidade entre o fluido ambiente e o fluido na corrente, sendo que este último existe pela mistura de sedimentos em suspensão devido à turbulência no seu interior. Esses dois elementos (sedimentos em suspensão e turbulência interna) acabam por tornar a dinâmica das correntes de turbidez um estudo extremamente complexo (Kneller & Buckee, 2000).

#### 3.1.2.1. Geometria de Correntes de Turbidez

Ao longo do desenvolvimento da corrente, o sedimento pode ser depositado ou ressuspensão, por efeito de erosão da própria corrente no fundo onde ela passe (caso das correntes hiperpicnais, somente). Cada um desses processos de erosão ou sedimentação tem uma região preferencial na corrente para ocorrer. As correntes de turbidez são divididas em três regiões básicas: cabeça, corpo e cauda. A figura 3.2 apresenta as duas primeiras, sendo que a parte da cauda refere-se ao final do corpo, o qual não aparece na ilustração.



**Figura 3.2:** Corrente de turbidez produzida em laboratório, distinguindo as partes da cabeça (e sua ponta, chamada de nariz) e a parte do corpo. Sentido do fluxo é da esquerda para a direita (Puhl, 2006).

Sendo a cabeça responsável pelo avanço da corrente, ela sofre a resistência do fluido ambiente, além da resistência do próprio fundo e da interface entre os fluidos. O fluido ambiente necessita ser deslocado e acaba sendo acelerado, com isso a cabeça passa a apresentar uma espessura maior para compensar essa resistência (Middleton, 1993).

A região seguinte refere-se ao corpo, onde a espessura pode apresentar valores que sejam até inferiores a metade da espessura da cabeça (Middleton, 1993). Como a cabeça apresenta uma espessura mais elevada e é mais diluída do que o corpo, este tende a aumentar a sua velocidade para compensar a diluição, apresentando, portanto, uma velocidade mais elevada do que a da cabeça, sendo 30% a 40% maior (Kneller & Buckee, 2000).

Enquanto na cabeça desenvolvem-se, preferencialmente, processos de erosão, o corpo apresenta processos de deposição de material (Middleton, 1993). Isso ocorre pelo fato mencionado acima, onde o corpo, apresentando uma velocidade maior, acaba por fazer com que a cabeça eroda o material do fundo, para dissipar a energia nela inserida pelo corpo da corrente.

O corpo é dividido em duas partes: uma inferior, onde a concentração de sedimentos é maior e que se desloca de forma quase homogênea; e uma superior, com alto índice de turbulência, onde os processos de mistura com o fluido ambiente ocorrem, carreando o mesmo para dentro da corrente (Simpson & Britter, 1979).

Por último, à parte final do corpo dá-se o nome de cauda. Ela é o prolongamento do corpo, apresentando velocidades mais baixas e espessura menor, devido aos processos de deposições no corpo.

### **3.1.2.2. Tipos de Correntes de Turbidez**

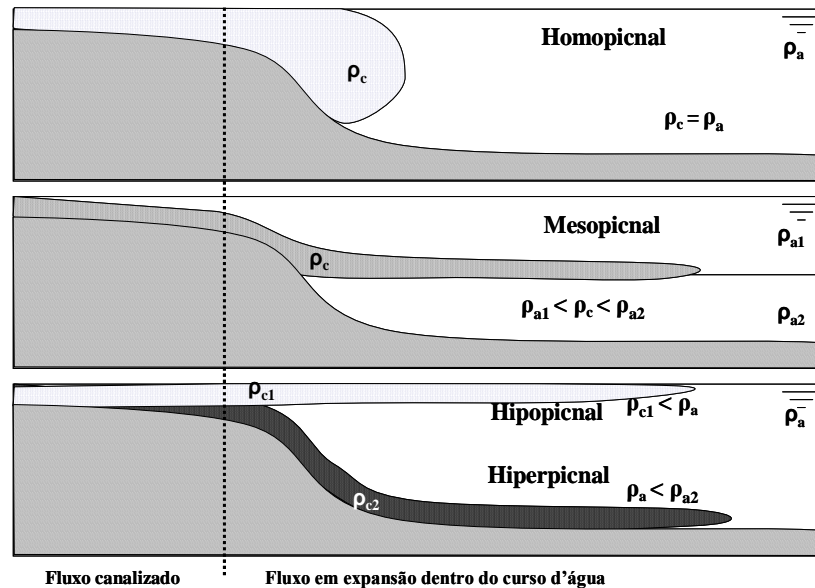
O aporte sólido de rios afluentes a um reservatório, lago ou oceano, que possuem certa massa específica, pode gerar correntes de turbidez, as quais, neste caso, passam a ser classificadas em função da relação entre a massa específica do fluxo e a massa específica do fluido ambiente. Elas são, então, divididas de quatro formas distintas (figura 3.3): homopical, mesopical, hiperpical e hipopical, conforme apresentado por Bates (1953) apud Mulder & Alexander (2001).

Na corrente homopical, tanto o fluido ambiente, quanto o fluido da corrente têm a mesma massa específica.

Na corrente mesopical, quando o fluido ambiente apresenta-se estratificado, têm-se duas regiões com massas específicas distintas uma da outra (a própria diferença de temperatura, à medida que a profundidade de um fluido aumenta, pode gerar isso) e a corrente apresenta um terceiro valor de massa específica, o qual está entre os dois valores apresentados pelo fluido ambiente. Quando isso ocorre, a corrente acaba por se desenvolver na interface da estratificação.

Por fim, temos os dois tipos que serão focados neste trabalho: hiperpical e hipopical. Na corrente hiperpical, segundo a figura 3.3, a massa específica da corrente

apresenta-se maior que o fluido ambiente, fazendo com que a corrente se desenvolva junto ao fundo. Já a corrente hipopícnal apresenta uma massa específica menor que o fluido ambiente, fazendo com que se mova junto ao topo.



**Figura 3.3:** Tipos de correntes de densidade, sendo  $\rho_c$  massa específica da corrente,  $\rho_a$  massa específica do fluido ambiente,  $\rho_{a1}$  e  $\rho_{a2}$  massas específicas de estratificação do fluido ambiente (Mulder e Alexander, 2001).

### 3.1.2.3. Correntes Hiperpícnais e Hipopícnais

Ao aportar no mar, os rios geralmente geram correntes hipopícnais e/ou hiperpícnais. O primeiro caso ocorre mais facilmente, pois necessita de concentrações de sedimento e de granulometria menores. Já no segundo caso, autores como Mulder & Syvitski (1995), por exemplo, acreditam que a sua geração está fortemente ligada à concentração de sedimentos na fonte.

Os rios podem gerar estes dois tipos de correntes simultaneamente, pois eles apresentam perfis de concentração estratificados, cuja parte inferior, por possuir maior concentração, pode gerar uma corrente hiperpícnal, enquanto que sua parte superior, com concentrações menores, pode gerar uma corrente hipopícnal.

Mulder & Syvitski (1995) calcularam o período de retorno (tempo de recorrência) para a geração de correntes hiperpícnais nos maiores rios do mundo. Chegaram à conclusão que, em quase metade deles, o período de retorno seria de 100 anos ou menos. Contudo Kneller & Buckee (2000) contestam essa análise, pois apontam que somente foi considerada a concentração média dos rios (o que é uma simplificação) e afirmam que, para gerar a corrente hiperpícnal, somente deve ser considerada a sua massa específica, verificando-se no final se ela é maior que a massa específica do mar/corpo receptor. Uma vez que tais corpos de água apresentam perfis estratificados, muitos eventos podem ter concentração de sedimento junto

ao fundo suficiente para gerar correntes hiperpicnais, ocorrendo ao mesmo tempo em que ocorrem correntes hipopicnais.

Para Bhattacharya & MacEachern (2009), plumas alimentadas por rios podem gerar correntes hiperpicnais, desde que as declividades sejam maiores que  $0,7^\circ$  (Bentley, 2003, apud Bhattacharya & MacEachern, 2009). Já no caso de declividades menores do que  $0,3^\circ$ , faz-se necessária a ocorrência de ondas ou marés para haver este fenômeno. Eles também colocam que a sedimentação, ocorrendo nas correntes hipopicnais, pode alimentar as correntes hiperpicnais, ajudando na sua sustentação e causando uma interação à jusante de ambas.

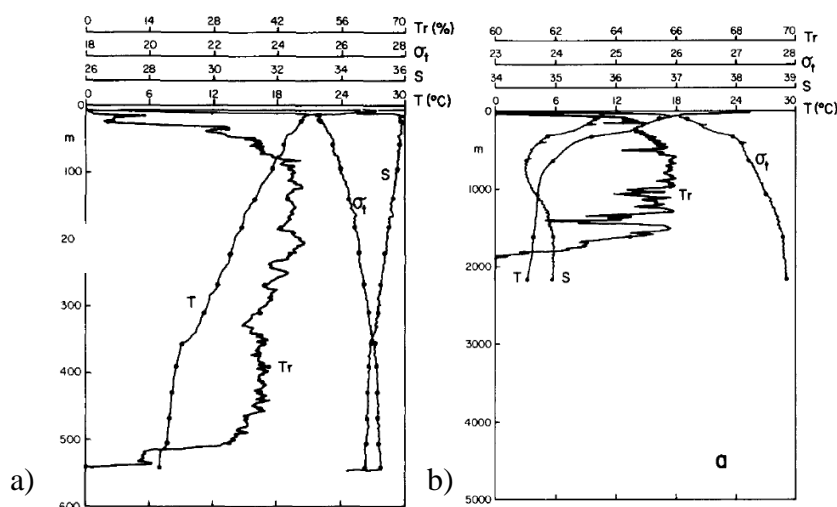
#### **a) Registro da Ocorrência de Correntes Hipopicnais e Hiperpicnais na Natureza**

Mesmo que correntes de turbidez sejam eventos relativamente comuns na natureza, determinar o local exato onde um evento de grande porte ocorrerá é muito difícil. Com isso, há dificuldade em monitorar o seu desenvolvimento e obter dados. Além disso, a força de correntes como essas é muito grande, podendo causar estragos em diversos equipamentos de leitura. Isso tudo demonstra a dificuldade em se registrar os eventos com precisão na natureza e o porquê de atualmente realizarem-se diversos experimentos em laboratórios.

Em um caso notório uma corrente foi “monitorada” através de cabos de comunicação no fundo do oceano que foram sendo rompidos à medida que ela progredia. Isso se deu no terremoto de “Grand Banks”, em 1929, quando ele deflagrou uma provável corrente de turbidez, a qual, segundo Pipper et al. (1988), chegou a uma velocidade de mais de 18 m/s, sendo medida através das diferenças de tempo entre os rompimentos dos cabos. Acredita-se que o fluxo tenha sido gerado pelo desprendimento de parte de um talude. A esse tipo de mecanismo de alimentação, em que o material é “injetado” no ambiente de uma única vez, pode-se chamar de pulso.

Um caso de campo onde há registro de correntes de turbidez é na saída do rio Zaire (fronteira da República Democrática do Congo com Angola). O estudo de Pak & Spinrad (1984) foi realizado nesse rio, tendo as leituras de turbidez da água realizada em diversos pontos e em diversas épocas do ano. O objetivo era estudar a dispersão de matéria sólida no oceano, provinda do rio. As medições mostraram que a pluma do rio pode chegar a mais de 800 km da costa. Foram encontradas camadas, junto à superfície líquida, de pluma com até 500 m de espessura, seguidas por uma camada de água pura e então uma camada de sedimentos em suspensão junto ao fundo. Na região do talude e do cânion (topografia encontrada na região), foram registradas também zonas intermediárias de turbidez (Pak & Spinrad, 1984). A figura 3.4 apresenta um perfil de medições realizado no rio Zaire, o qual

deve ser tomado de forma qualitativa, uma vez que os autores não mencionam as unidades da massa específica e da salinidade apresentadas.



**Figura 3.4: Dois perfis medidos no rio Zaire: (T) temperatura..., (S) salinidade, ( $\sigma_t$ ) massa específica e (Tr) transmissividade de luz (Pak & Spinrad, 1984).**

Outros dois estudos de casos na natureza foram realizados por Fan (1986) apud Middleton (1993) e Fan & Morris (1992) apud Middleton (1993), onde correntes de turbidez foram medidas em reservatórios chineses. Eles encontraram correntes compostas majoritariamente por siltes, chegando a concentrações de 10% em peso na origem (rio) e 5% nos fluxos gravitacionais. As correntes chegavam a ter 15 m de espessura e desenvolver velocidades acima de 1 m/s.

Já no cânion de Monterey, na Califórnia, Xu et al. (2002) realizaram um estudo em que foi identificado o oposto do observado nos reservatórios chineses (Fan, 1986, apud Middleton, 1993, e Fan & Morris, 1992, apud Middleton, 1993), com relação à granulometria. O depósito no interior do cânion era composto por silte e areia fina, tendo a predominância da areia. Os autores mencionaram que, no caso do silte, eles podem ser facilmente ressuspensos, sendo que encontraram concentrações relativas dos mesmos em correntes (100 metros acima do fundo do cânion) de 85%, quando as velocidades estavam acima de 2 cm/s, e 75%, quando as velocidades estavam acima de 1 cm/s. Para o caso da areia fina, mesmo com velocidades de 2 cm/s, pouco material foi encontrado em suspensão (2%), devido a sua alta velocidade de queda.

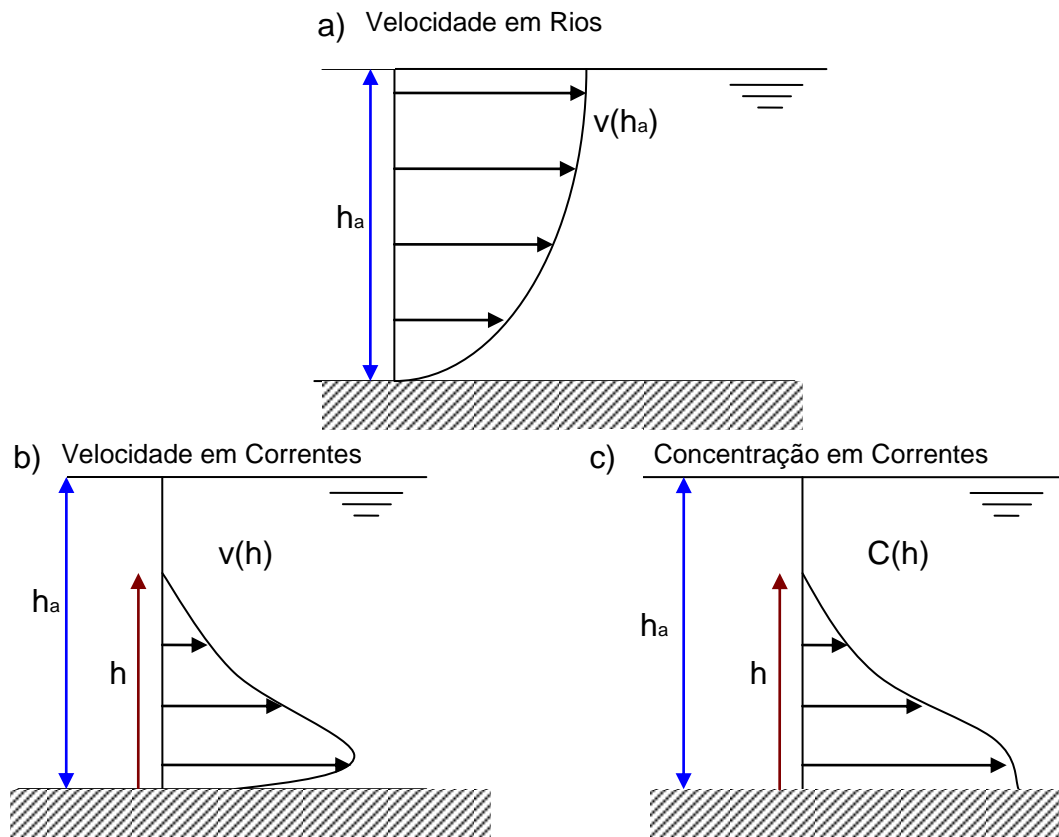
### 3.1.2.4. Dinâmica das Correntes de Turbidez

#### a) Perfil de Velocidades de Correntes Hiperpicnais

Normalmente, rios seguem perfis de velocidades que são crescentes à medida que se aproximam da superfície da água (figura 3.5a). Contudo, correntes de turbidez seguem perfis relativamente invertidos, onde velocidades maiores são encontradas próximas ao fundo



(figura 3.5b). Segundo Middleton (1993), o perfil de velocidades das correntes de turbidez está diretamente ligado à concentração da mesma, sendo as regiões de maiores concentrações as mesmas de maiores velocidades, conforme se nota em figura 3.5b e figura 3.5c.



**Figura 3.5: Perfil de velocidade em um rio com lâmina de água  $h_a$  (a) e perfil de velocidade (b) e concentração (c) em correntes de turbidez.**

A velocidade das correntes pode se apresentar quase constante, em alguns casos de correntes geradas por pulso, como por exemplo, no episódio de Grand Banks, onde cabos submarinos foram sendo rompidos (Kneller & Buckee, 2000).

Em muitos experimentos, Altinakar et al. (1996) mencionam que a velocidade máxima, a qual é regida pela razão entre as forças de arraste das regiões superior e inferior, foi registrada entre  $0,2 h$  e  $0,3 h$  da base da corrente, sendo “ $h$ ” a espessura da corrente.

A velocidade das correntes é dependente da sua descarga, da diferença entre a sua massa específica e a do fluido ambiente e, em alguns casos, da declividade do fundo. Para ângulos menores que  $2,3^\circ$ , a velocidade é independente da declividade. Já entre  $5^\circ$  e  $90^\circ$  ela é levemente influenciada, pois há um aumento nas forças gravitacionais, o qual é contraposto por um aumento da tensão de cisalhamento junto à interface superior da corrente, o que ocasiona o ingresso de fluido ambiente (Middleton, 1966).

Britter & Linden (1980) afirmam que, para declividades acima de 0,5°, a velocidade da cabeça se torna constante. Eles também determinaram a seguinte expressão para a velocidade de avanço da cabeça, com declividades variando no intervalo de 5° a 90°:

$$\frac{V}{(g' \cdot Q)^{1/3}} = 1,5 \pm 0,2 \quad (3.1)$$

Onde: V = velocidade da cabeça [L/T];

$g' = g(\Delta\rho / \rho_a)$  gravidade reduzida [L/T<sup>2</sup>];

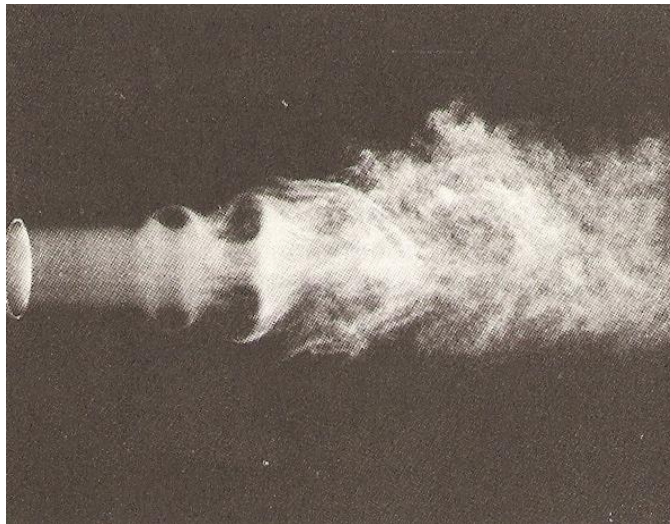
Q = vazão [L<sup>3</sup>/T].

### 3.2. Jatos e Plumas

A importância de jatos e plumas passa por diferentes setores de estudos. O mais notório é no setor ambiental, onde eles são associados com a descarga de poluentes na atmosfera e no oceano. Por exemplo, chaminés de indústrias emitindo fumaça, efluente de termoelétricas descarregados no oceano ou a emissão de águas cinzas em corpos d'água. Todas essas formas de eliminação de efluentes são projetadas segundo a necessidade da diluição inicial. Elas podem partir de tubulações simplesmente abertas em suas extremidades ou até de difusores com diversas saídas ao longo da tubulação.

Crapper (1977) define plumas como sendo fluxos com a flutuabilidade sendo alimentada de forma contínua. Enquanto que jatos são fluxos com a quantidade de movimento sendo alimentada continuamente pela fonte. A quantidade de movimento, em jatos, permanece constante ao longo das linhas de fluxo centrais, em qualquer seção transversal, enquanto que, em plumas, há o aumento gradativo, porém mantendo a flutuabilidade constante. Ambos os fluxos expandem lateralmente, através da incorporação do fluido ambiente.

Salienta-se que a diferença entre um jato e uma pluma não passa pela turbulência. Ambos podem ter comportamento tanto turbulento quanto laminar. As figuras 3.6 e 3.7 apresentam exemplos de jatos e plumas, respectivamente.



**Figura 3.6: Jato turbulento (Fischer et al., 1979).**



**Figura 3.7: Pluma de um vulcão (USGS, 1982).**

### **3.2.1. Tipos de Jatos**

Os jatos podem ser de diferentes tipos, tais como: jatos redondos, jatos planos, jatos flutuantes e jatos de parede. Os *jatos redondos* são aqueles provindos de orifícios circulares, sendo simétricos em relação ao seu eixo central. Tais jatos produzem uma camada laminar de cisalhamento nos seus limites com o fluido ambiente, a qual é instável. De tal camada desprendem-se vórtices, os quais promovem uma troca entre o fluido do jato e o fluido do ambiente (List, 1982).

No caso de *jatos planos*, eles provêm de orifícios onde uma de suas dimensões é preponderante em relação às outras, como um orifício retangular, por exemplo. List (1982) menciona que os mesmos vórtices observados em jatos circulares ocorrem no caso de jatos

planos, contudo o escoamento tende a ser em duas dimensões, ao contrário do escoamento circular, que é tridimensional.

Os *jatos de parede* se desenvolvem junto a limites sólidos. Os seus perfis verticais de velocidade são mais semelhantes aos perfis de correntes de densidade, como será mostrado adiante. Esse tipo de jato será abordado de forma mais detalhada, a seguir, dada a sua importância para o assunto desenvolvido no presente trabalho.

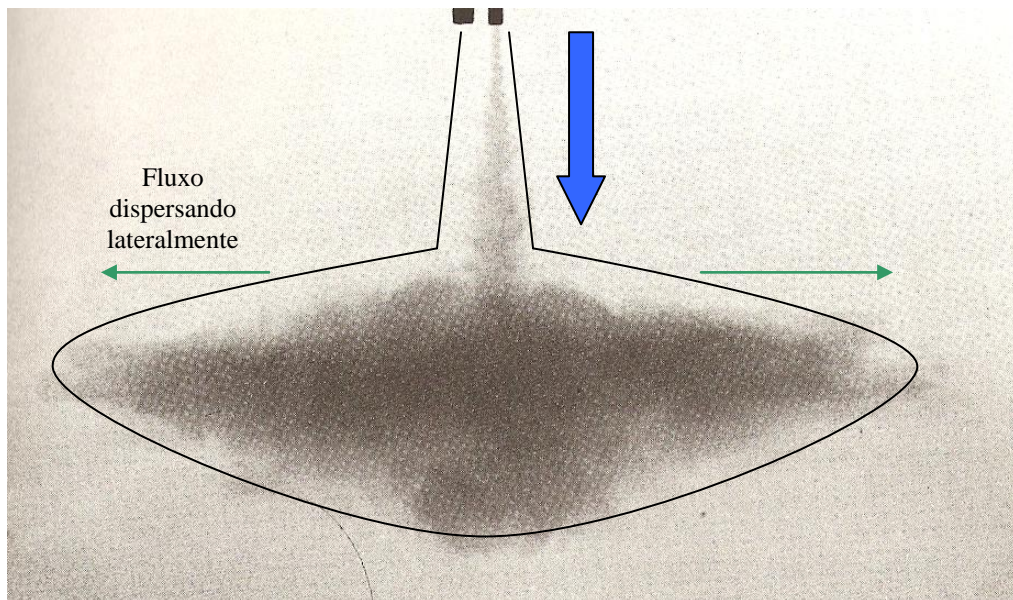
Os *jatos flutuantes* são uma mistura de jatos e plumas. Inicialmente, eles se portam como jatos, passando a ter comportamento de plumas, à medida que se afastam da origem. Este tipo de jato independe da geometria do elemento que o causa (fonte) ou da proximidade a um limite sólido. Também, devido a sua importância para este trabalho, esse jato terá seu comportamento mais detalhado, adiante.

Os estudos abordando os diferentes tipos de jatos citados costumam considerar uma diferença entre o fluido ambiente e o fluxo, sendo ela gerada por diferença de temperatura ou de massa específica (pequenas diferenças), sem a presença de sólidos suspensos. Dentre os estudos mais recentes que foram realizados com *jatos particulados*, destaca-se o estudo de Azimi et al. (2012), que aborda o efeito de jatos de areia em meio aquoso, mantendo partículas sólidas em suspensão. O jato particulado não é um tipo específico dos jatos, sendo uma característica comum entre os diferentes tipos de jatos citados.

### **3.2.1.1. Jatos Flutuantes**

Também chamados de plumas forçadas, os jatos flutuantes são um tipo de jatos e plumas, onde os escoamentos são regidos tanto pela quantidade de movimento (característica dos jatos) quanto pelo empuxo (característica das plumas). Inicialmente o fluxo é regido pela quantidade de movimento, sendo que, à medida que progride, passa a se comportar mais como uma pluma (figura 3.8). É importante ressaltar que o fluido, junto à fonte do jato, pode ter densidade tanto menor quanto maior que a do fluido ambiente para que isso ocorra (Fischer et al., 1979).

A água com sedimentos, aportada pelos rios aos mares, pode gerar plumas, resultando em correntes hipopícnais. Contudo, logo no começo, na entrada do mar, esses fluxos são governados por forças gravitacionais (e.g. empuxo), o que pode indicar um comportamento mais semelhante a jatos flutuantes (Gravine, 1982).

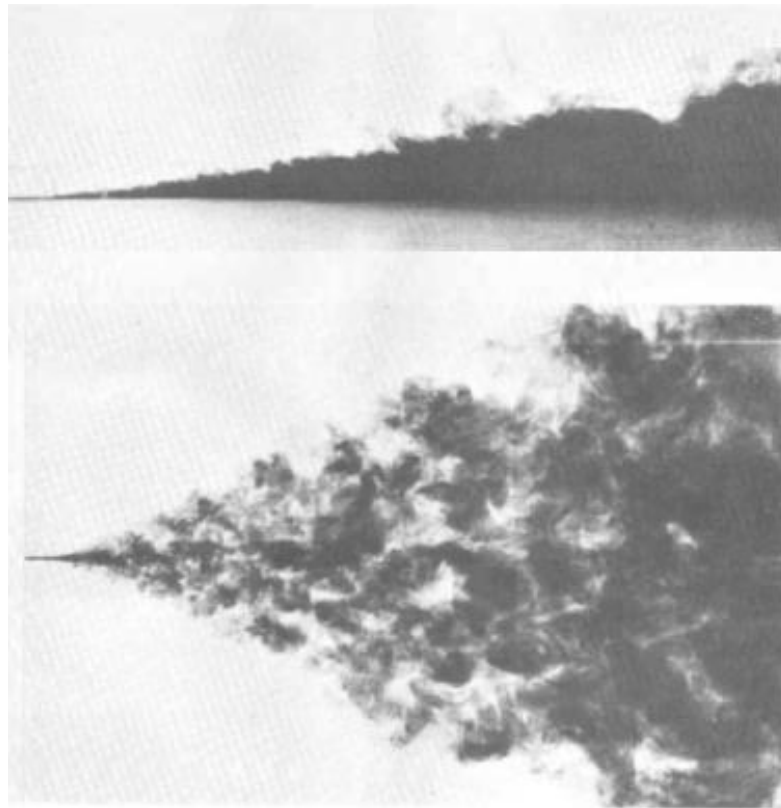


**Figura 3.8: Jato flutuante: fluxo de cima para baixo (adaptado de Fan, 1967 apud Fischer et al., 1979).**

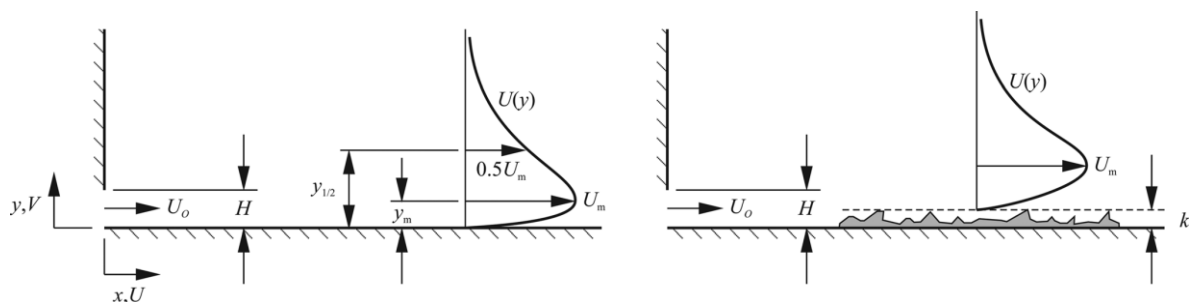
### 3.2.1.2. Jatos de Parede

Um tipo particular de jato são os chamados jatos de parede, definidos por Launder & Rodi (1983). Esses fluxos podem ser definidos como “uma camada limite onde, por consequência da quantidade de movimento inicial, a velocidade ao longo do escoamento dentro do fluxo é maior do que a velocidade no exterior”. Eles são jatos que se desenvolvem junto a limites sólidos, tais como paredes, por exemplo (figura 3.9). A sua aplicação pode ser encontrada na aerodinâmica de carros e aviões, problemas de aquecimento, resfriamento e ventilação de estruturas.

Segundo Launder & Rodi (1983), os jatos de parede podem ser divididos em duas partes, de acordo com o seu perfil de velocidade: uma região, chamada de interna, entre o contorno sólido e a altura de velocidade máxima  $y_m$ ; e uma região, chamada de externa, entre a altura de velocidade máxima  $y_m$  e o limite superior do jato. A primeira região apresenta similaridade com os fluxos tradicionais em camadas-limite turbulentas (e.g. rios e tubulações). Já a segunda apresenta características da camada de cisalhamento mais parecidas com a de escoamento sem contato com limites sólidos. Como se pode observar na figura 3.10, o perfil de velocidades deste tipo de jato tem uma forma semelhante à apresentada em correntes hiperpicnais.



**Figura 3.9: Jato de parede (Launder & Rodi, 1983).**



**Figura 3.10: Perfis de velocidades do jato de parede sobre superfície lista (esquerda) e superfície rugosa (direita) (Rostamy et al., 2011).**

Launder & Rodi (1983) afirmam que  $y_{1/2}$  (altura do fluxo onde a velocidade é igual à máxima velocidade) e  $z_{1/2}$  (largura do fluxo onde a velocidade é igual à metade da velocidade máxima) crescem linearmente à medida que se afastam da origem. Eles também indicam taxas de variação de  $dy_{1/2}/dx = 0,048$  e  $dz_{1/2}/dx = 0,26$ . Hofer (1979) apud Launder & Rodi (1983) encontrou uma variação no ângulo de dispersão do jato (ângulo com que a espessura do jato aumenta), à medida que o número de Reynolds subia de 800 para 4400. Já Newman et al. (1972) apud Launder & Rodi (1983) não encontraram variações neste ângulo, à medida que o número de Reynolds subia de 2800 para 16400.

### 3.2.1.3. Jatos de Particulados

Os jatos particulados são compostos por duas fases distintas: o fluido do jato e as partículas sólidas a ele adicionadas em suspensão. O seu perfil de velocidades também segue

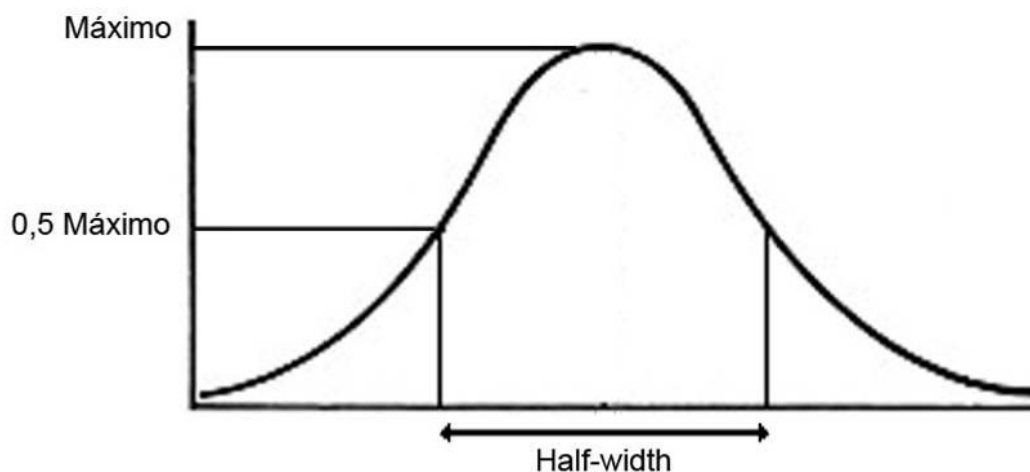
uma distribuição gaussiana (Singanetti, 1966, apud Hall et. al., 2010), assim como os casos anteriores. Bush (1962) apud Hall et. al. (2010) observou que a taxa com que a velocidade e a quantidade de movimento aumentam, nesse caso de jatos, é uma função do tamanho das próprias partículas. Qualquer jato que possua partículas sólidas em sua composição pode ser considerado como jato particulado.

### 3.2.2. Parâmetros que Definem Jatos e Plumas

Somente a partir da década de 70 é que pesquisas com medições de dados de plumas e jatos começaram a ser realizadas de forma substancial. Até então, pouquíssimos trabalhos eram conhecidos. A partir delas, puderam-se determinar as suas características de velocidades, fluxo de quantidade de movimento, fluxo oriundo da diferença de massa específica, vazões locais e geometrias.

#### 3.2.2.1. Perfis de Velocidade

Os estudos de perfis de velocidade e de temperatura em jatos e plumas partem da consideração de que eles seguem um padrão de distribuição gaussiana (Rostamy et al., 2011, Agrawal & Prasad, 2003, Azimi, Zhu & Rajaratnam, 2012). Um parâmetro na análise de jatos e plumas é o “*half-width*”, o qual representa a largura da curva de distribuição de Gauss na qual seus extremos equivalem à metade do valor máximo (figura 3.11).

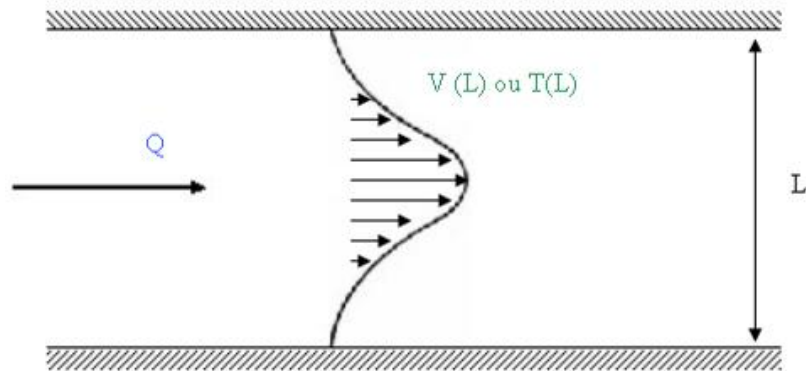


**Figura 3.11: Distribuição de Gauss com a indicação do “half-width”.**

No caso de jatos e plumas, Kotsovinos & List (1977) e Agrawal & Prasad (2003) mostram que as medições de perfis de temperatura e velocidade no sentido transversal ao escoamento seguem uma distribuição de Gauss (figura 3.12). Outro autor a mencionar tal perfil é Crapper (1977), o qual também considera que o perfil de massas específicas segue essa distribuição. Para o caso de jatos de areia em meio aquoso, Azimi et al. (2012) afirmam



que, em caso de partículas de grande tamanho, os perfis vertical e transversal apresentam as velocidades de avanço da porção inicial do fluxo igual a da parte posterior.



**Figura 3.12: Exemplo de perfil transversal de velocidade ou de temperatura em jatos e plumas em escoamento em um canal (sentido do escoamento dado pela seta).**

Uma diferença entre jatos e plumas, no que se refere aos perfis, está na comparação entre os perfis de velocidade e temperatura. Plumam apresentam um “*half-width*” maior no caso de perfis de velocidades em relação aos perfis de temperaturas. No caso de jatos, ocorre o oposto (maior para o caso de temperatura), bem como em jatos ou plumas que tenham uma simetria axial (Kotsovinos & List, 1977).

Morton, Taylor & Turner (1956) apud Crapper (1977) colocam que os perfis de velocidade média e de massa específica, em jatos e plumas, não apresentam grandes variações em suas formas ao longo do escoamento, sendo tais perfis similares (auto-similaridade). Eles também afirmam que a diferença de massa específica entre os fluidos pode ser desprezada, exceto no termo do empuxo, presente na equação da quantidade de movimento (onde o termo fornece a força motriz, “*driving force*”) e presente na equação da conservação de diferença de massas específicas.

Para o caso de jatos particulados, segundo Azimi et al. (2012), que trabalharam com jatos de areia em meio aquoso, a velocidade de avanço em uma nuvem de partículas de jatos e plumas é dependente de:

- distância em relação à fonte ( $x$ );
- geometria da saída do fluxo ( $D$ , para o diâmetro de saídas de seções circulares, e  $h_0$ , para a altura de saída de seções retangulares);
- tamanho das partículas no fluxo ( $d$ );
- velocidade inicial do fluxo ( $v_0$ );
- viscosidade dinâmica do fluido ambiente ( $\mu$ );



- diferença entre as massas específicas das partículas e do fluido ambiente ( $\rho_s - \rho_a$ );
- massa específica do fluxo ( $\rho_c$ );
- concentração volumétrica inicial do fluxo ( $C_o$ );
- gravidade reduzida ( $g' = g \frac{\Delta\rho}{\rho_a}$ ).

### 3.2.2.2. Geometria

O ângulo de espalhamento de um jato é dependente da quantidade de movimento inicial (Azimi et al., 2012). Qualquer acréscimo da quantidade de movimento acarreta em uma diminuição do ângulo e em uma redução da mistura com o fluido ambiente. Isso pode ser observado nos experimentos de Bush et al. (2003), onde os fluxos com maior massa de sedimentos acabavam por apresentar grande quantidade de movimento, fazendo o jato se propagar mais adiante e não apresentando tanta mistura com o fluido ambiente, acabando por haver um menor crescimento. Por outro lado, em misturas com menor quantidade de sedimentos, o comportamento foi oposto, se comportando mais como uma pluma térmica.

$$\Re_s = \frac{\rho_w \cdot v_s \cdot d}{\mu} = \frac{1}{18} \left( \frac{D}{d} \right) \left( \frac{\Re}{F_o} \right) \quad (3.2)$$

Onde:  $\Re_s$  = número de Reynolds da partícula [-];

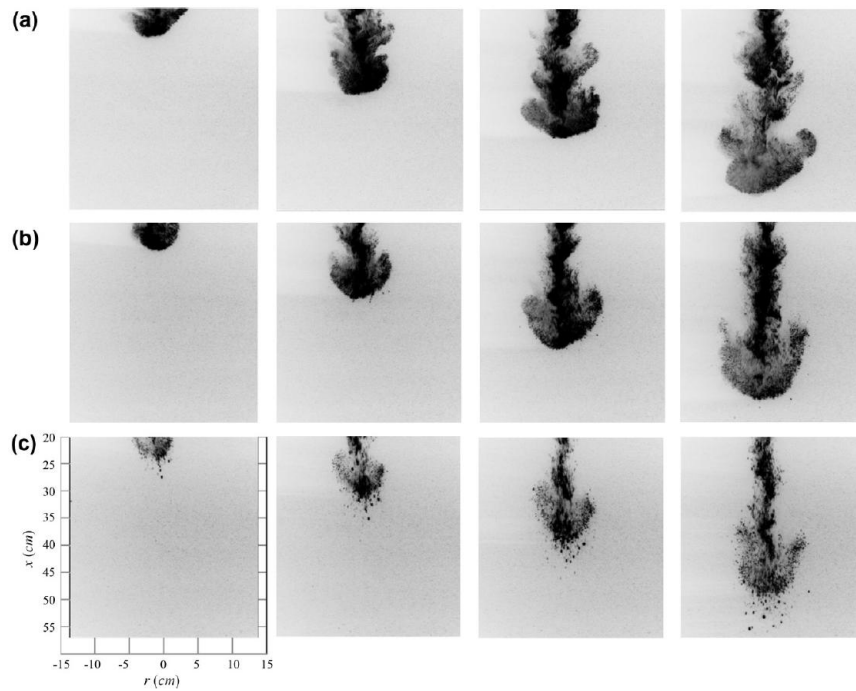
$\rho_w$  = massa específica da água [M/L<sup>3</sup>];

$v_s$  = velocidade de queda da partícula [L/T];

$\Re$  = número de Reynolds ( $\Re = \rho_w \cdot v_o \cdot d / \mu$ ) [-];

$F_o$  = número de Froude densimétrico da partícula ( $F_o = v_o / (g \cdot \Delta\rho \cdot d / \rho_w)^{1/2}$ ) [-].

Segundo experimentos realizados por Azimi et al. (2012), o número de Reynolds da partícula (equação 3.2) determina o formato do jato particulado. Quando o mesmo for menor que 10, a frente se porta como uma pluma termal (forma de cogumelo), ou seja, aquela causada pela diferença de temperaturas (figura 3.13a). Se for aproximadamente 10, ela toma uma forma mais arredondada, semelhante a uma tigela (figura 3.13b). No caso em que superar 10, a parte frontal assume um geometria mais aguda, aproximando-se de uma seta (figura 3.13c). A figura 3.13 apresenta exemplos destes comportamentos no caso de jatos de areia em meio aquoso.



**Figura 3.13: Desenvolvimento da geometria de três correntes, com o número de Reynolds abaixo de 10 (a), igual a 10 (b) e maior que 10 (c). Sentido do fluxo de cima para baixo (Azimi et al., 2012).**

### 3.1.1.1. Fluxos

Os jatos e as plumas são regidos por três tipos de fluxos: fluxo de massa ou de volume, fluxo de quantidade de movimento e fluxo oriundo da diferença de massa específica (*buoyancy flux*). Tomando-se  $a$  e  $b$  como os limites de integração onde a velocidade média longitudinal é igual à zero, o eixo  $x$  como longitudinal ao escoamento e o eixo  $y$  como transversal ao escoamento, as definições são:

- “o *fluxo de massa* de um jato é a massa de fluido passando por uma seção transversal de um jato por unidade de tempo [...] sendo  $q$  chamado de fluxo de massa específico, ou fluxo específico de volume, de um jato.”

$$q(x) = \int_a^b \bar{v}(x, y) \cdot dy \quad (3.3)$$

Onde:  $q$  = fluxo específico de volume [ $L^3/T$ ];

$v$  = velocidade média do fluxo no tempo [ $L/T$ ];

$x$  e  $y$  = eixos longitudinais e transversais [ $L$ ].

- “o *fluxo de quantidade de movimento* de um jato, é a soma da quantidade de movimento na linha de corrente passando pela seção transversal de um jato por unidade de tempo [...] sendo  $m$  chamado de fluxo específico de quantidade de movimento e diferindo do fluxo de quantidade de movimento somente pelo fator de massa específica.”

$$m(x) = \int_a^{b-2} v(x, y).dy \quad (3.4)$$

Onde:  $m$  = fluxo específico de quantidade de movimento [ $L^4/T^2$ ].

- “ $\beta$  é o *fluxo específico oriundo da diferença de massa específica*, em analogia com fluxo específico de quantidade de movimento. O fluxo oriundo da diferença de massa específica é relacionado ao fluxo do traçador que sofre a variação de massa específica.”

$$\beta(x) = \gamma \int_a^b g \frac{(\rho(x, y) - \rho_a).m(x, y)}{\rho_a}.dy \quad (3.5)$$

Onde:  $g$  = aceleração da gravidade [ $L/T^2$ ];

$\gamma$  = peso específico do fluido em escoamento [ $F/M^3$ ]

$\beta$  = fluxo específico oriundo da diferença de massa específica (*buoyancy flux*) [ $L^4/T^3$ ].

Para o caso de jatos e plumas circulares, Fischer et al. (1979) definem os valores iniciais dos fluxos de volume, quantidade de movimento e o oriundo da diferença de massa específica (*buoyancy flux*) como  $Q$ ,  $M$  e  $B$ , respectivamente.

$$Q = \frac{1}{4} \pi.D^2.v_o \quad (3.6)$$

$$M = \frac{1}{4} \pi.D^2.v_o^2 \quad (3.7)$$

$$B = g \frac{\Delta\rho_o}{\rho} Q \quad (3.8)$$

Onde:  $D$  = diâmetro do jato [ $L$ ];

$v_o$  = velocidade média na saída do fluxo [ $L/T$ ];

$Q$  = fluxo de volume [ $L^3/T$ ];

$M$  = fluxo de quantidade de movimento [ $L^4/T^2$ ];

$B$  = fluxo oriundo da diferença de massa específica (*buoyancy flux*) [ $L^4/T^3$ ].

Sobre os três fluxos ( $Q$ ,  $M$  e  $B$ ), há de se dizer que enquanto o fluxo de quantidade de movimento é preponderante em jatos, o fluxo oriundo da diferença de massa específica é preponderante em plumas. Esta é uma das formas para se analisar quando um fluxo se porta mais como um jato ou como uma pluma.

Uma forma de se analisar quando o fluxo de quantidade de movimento será superado pelo fluxo oriundo da diferença de massa específica (comportamento mais próximo ao de uma pluma) é quando a grandeza  $L_m = M^{3/4}/B^{1/2}$ , avaliada em uma seção do fluxo, conduzir a um valor muito menor do que a distância à fonte, sinalizando um comportamento mais semelhante a plumas do que a jatos. Esse comprimento controla o grau de comportamento como uma pluma a uma dada distância da fonte, enquanto o comprimento adimensional  $L_Q = Q/M^{1/2}$  define a geometria. A razão entre elas,  $R_o = L_Q/L_m$ , é o número de Richardson inicial do jato, sendo que, quando ele for igual ao número de Reynolds local ( $Re_p = \mu.B^{1/2}/m^{5/4}$ ), o jato flutuante será iniciado como uma pluma.

$$L_m = \frac{M^{3/4}}{B^{1/2}} \quad (3.9)$$

$$L_Q = \frac{Q}{M^{1/2}} \quad (3.10)$$

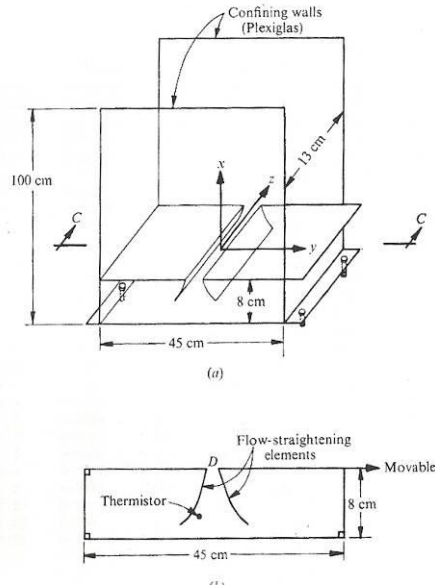
$$R_o = \frac{L_Q}{L_m} \quad (3.11)$$

$$Re_p = \frac{\mu.B^{1/2}}{m^{5/4}} \quad (3.12)$$

### 3.1.1.2. Comportamento de Jatos e Plumais

Muito embora tenhamos casos de escoamentos que começam a se portar como jatos e, ao longo do seu desenvolvimento, assumem o comportamento de plumas (jatos flutuantes), esses dois fenômenos podem ser distinguidos por alguns parâmetros. Como citado na seção anterior, uma forma de analisar é quando a grandeza  $L_m$  for muito menor do que a distância à fonte, onde o jato flutuante tenderá a se comportar mais como uma pluma. Além disso, quando o número de Richardson inicial for igual ao número de Reynolds local, o jato flutuante assumirá o comportamento de uma pluma.

Para poder avaliar, em cada situação, se um fluxo comporta-se como um jato ou como uma pluma, há de se coletar certas informações do fluxo. No caso de Kotsovinos & List (1977), medidas de perfis de temperatura e velocidade foram efetuadas (figura 3.14), em fluxos verticais de ar, obtidos através do aquecimento de água e confinando o vapor por ela gerado, produzindo-se jatos e plumas. Tais fluxos foram confinados por paredes verticais, dentro das quais foram realizadas medidas de perfis de temperatura e de velocidade.



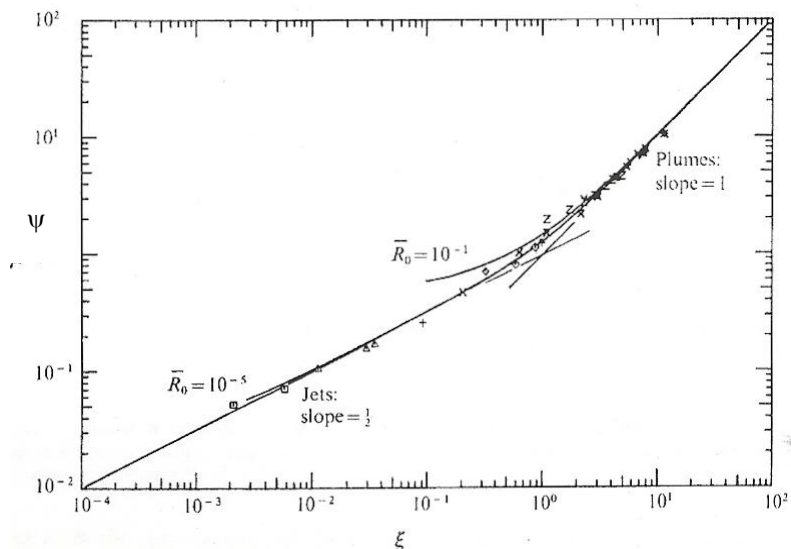
**Figura 3.14: Esquema experimental de Kotsovinos & List (1977). Sentido do fluxo: de baixo para cima.**

Os mesmos Kotsovinos & List (1977), confrontando a distância adimensionalizada ( $\xi$ ) com a diluição adimensionalizada ( $\psi$ ), as quais são função do número de Richardson local ( $R_p$ ), definem as regiões pertencentes à jatos e plumas.

$$R_p = \left( \frac{q \cdot B^{1/2}}{m^{5/4}} \right) \quad (3.16)$$

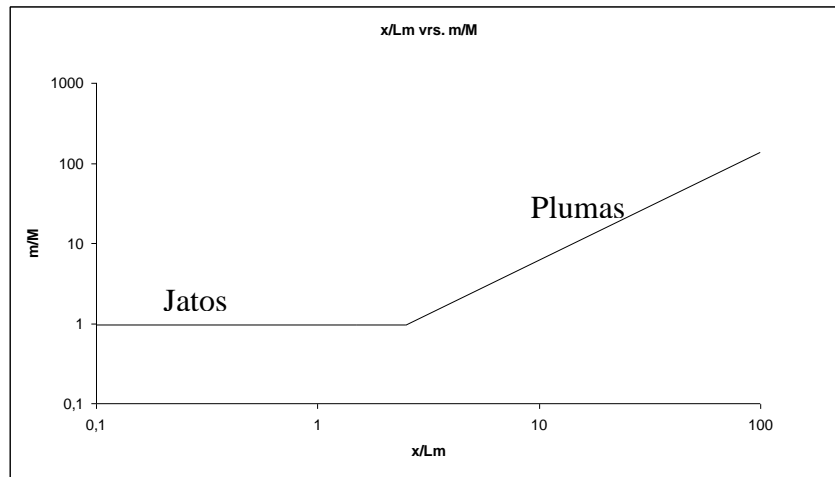
$$\xi = 0,254 \cdot \left( \frac{x - x_0}{L_Q} \right) \left( \frac{R_0}{R_p} \right) \quad (3.17)$$

$$\psi = \frac{q}{Q} \left( \frac{R_0}{R_p} \right)^{1/2} \quad (3.18)$$



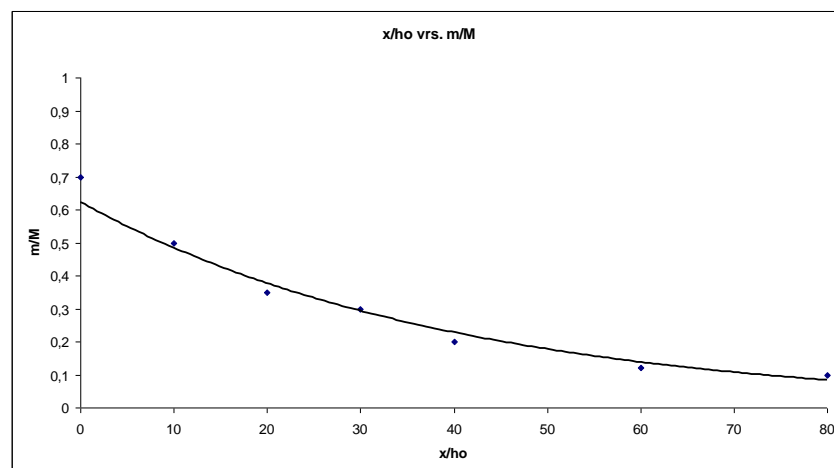
**Figura 3.15: Diluição adimensionalizada em função da distância adimensionalizada (Kotsovinos & List, 1977).**

No caso de jatos flutuantes provindos de orifícios circulares, Papanicolaou & List (1988) apresentam uma forma diferente de caracterizar jatos e plumas. Através de uma relação entre os fluxos de quantidade de movimento local ( $m$ ) e inicial ( $M$ ), eles fazem uma análise da evolução ao longo do escoamento: distância ( $x$ ) adimensionalizada pela distância característica ( $L_m$ ). A figura 3.16 apresenta esta relação.



**Figura 3.16: Caracterização de jatos e plumas de acordo com o fluxo da quantidade de movimento (adaptado de Papanicolau & List, 1988).**

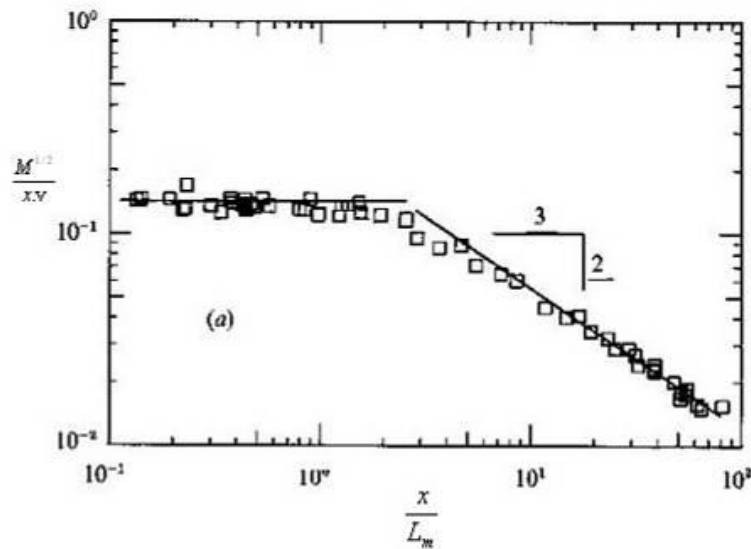
Para jatos particulados, a mesma relação entre os fluxos de quantidade de movimento referenciada à distância adimensionalizada pelo diâmetro inicial do jato, Hall et al. (2010) definem um decaimento deste fluxo em forma exponencial, conforme apresentado na figura 3.17.



**Figura 3.17: Comportamento da relação  $m/M$  ao longo do escoamento, para o caso de jatos particulados (adaptado de Hall et al., 2010).**

Para o caso de jatos, Papanicolaou & List (1988) estabeleceram uma relação adimensionalizada entre a velocidade média em diferentes posições e a distância à origem. Eles obtiveram a seguinte relação, válida para  $x/L_m > 5$ , que é apresentada na figura 3.18.

$$\frac{M^{1/2}}{x.v} = 0,26 \left( \frac{x}{L_m} \right)^{-2/3} \quad (3.19)$$

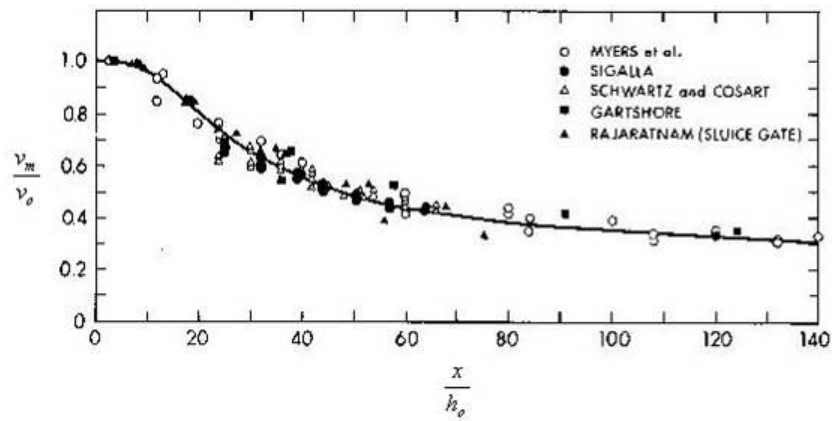


**Figura 3.18: Adimensionalização da velocidade em função da distância adimensionalizada (modificada Papanicolaou & List, 1988).**

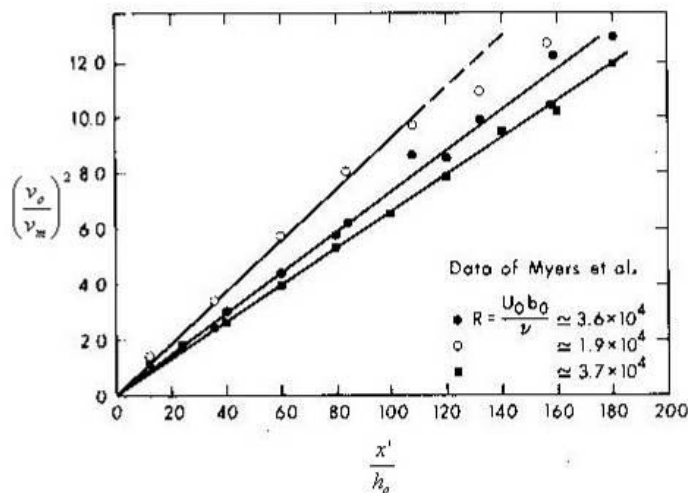
Azimi et al. (2012) modificam a relação de Papanicolaou & List (1988) re-escrevendo-a na forma de  $v = 3,85.B^{1/3}.x^{-1/3}$ .

Rajaratnam (1976) apresenta relações para jatos de paredes. Ele relaciona as velocidades inicial ( $v_0$ ) e máxima no centro de cada seção do perfil do jato ( $v$ ) com as distâncias em relação à origem do jato. Para as distâncias, ele utiliza a distância real entre a saída do jato e o ponto de medida ( $x$ ) e a distância da origem virtual do jato e o ponto de medida ( $x'$ ). A origem virtual do jato é localizada atrás da entrada do fluxo no ambiente, a uma distância de 10 vezes a dimensão preponderante da geometria de saída (abertura do bocal de saída). As relações podem ser observadas nas figuras 3.19 e 3.20, nas quais também são apresentados dados de outros trabalhos. A origem virtual do jato é considerada como sendo função da posição no canal ( $x$ ) e do diâmetro do bocal que origina o jato ( $D$ ), sendo dada por:

$$x' = x + 10.D \quad (3.20)$$



**Figura 3.19:** Correlação da velocidade adimensionalizada para jatos de parede (modificada Rajaratnam, 1976).



**Figura 3.20:** Variação da velocidade adimensionalizada para jatos de parede (modificada Rajaratnam, 1976).

Rajaratnam (1976) também apresenta uma relação de geometrias para caso de jatos de parede. Ele afirma que a evolução da espessura ( $h$ ) é linear, seguindo um crescimento de  $0,068.x$ .

$$h = 0,068.x \quad (3.21)$$

### 3.2. Analogia com Correntes Hipopicnais e Hiperpicnais

Como exposto anteriormente neste trabalho, Mulder & Syvitski (1995) estabeleceram uma vinculação entre a geração de correntes hipopicnais e hiperpicnais com a concentração da corrente e do fluido ambiente. Contudo, Boffo (2010) demonstra, a partir da análise de experimentos gerando correntes de turbidez e variando a relação entre as massas específicas do fluxo e do fluido ambiente (como pode ser visto na figura 3.21), que, provavelmente, existem outros aspectos a considerar, como a quantidade de movimento e a flutuabilidade das correntes, neste processo de formação de correntes hiperpicnais e hipopicnais. Nestes experimentos, o fluido da corrente foi composto por carvão mineral misturado com água



clara, em concentrações variadas, de modo a se obter diferentes massas específicas nos ensaios. Neste estudo, também, o fluido ambiente teve a sua massa específica alterada, através da adição de sal à água clara. Com isso, a relação entre as massas específicas da mistura ambiente ( $\rho_a$ ) e do fluxo ( $\rho_c$ ) variaram desde relações positivas até negativas. Observando a figura 3.21 (ensaios C15 e C16), nota-se que correntes com a relação negativa (densidade do fluxo menor que a do ambiente) geraram correntes hiperpicnais inicialmente, ao contrário do que se esperaria, dada a massa específica do fluxo ser menor que a do ambiente, e, após, se dividiram entre uma parte hiperpicnal e uma parte hipopicnal. O oposto também pode ser observado em relações positivas com o fluxo, desacelerando rapidamente, gerando correntes hipopicnais, mesmo que o fluxo inicial possua uma massa específica maior que o fluido ambiente (figura 3.21, ensaios C4, C5 e C10).

Acredita-se que a geração de correntes hiperpicnais e hipopicnais no trabalho de Boffo (2002) possa ser explicada por parâmetros usuais no estudo de jatos e plumas, as quais podem estar diretamente ligadas a questões como quantidade de movimento e vazão local, além da própria concentração.

| Ensaio | $\Delta\rho \times 100$ | Desenvolvimento da corrente |     |      |
|--------|-------------------------|-----------------------------|-----|------|
|        |                         | 15 s                        | 50s | 100s |
| C1     | -0,832                  |                             |     |      |
| C2     | -0,495                  |                             |     |      |
| C8     | -0,493                  |                             |     |      |
| C13    | -0,490                  |                             |     |      |
| C15    | -0,488                  |                             |     |      |
| C16    | -0,485                  |                             |     |      |
| C3     | -0,304                  |                             |     |      |
| C9     | 0,000                   |                             |     |      |
| C14    | 0,000                   |                             |     |      |
| C4     | 0,175                   |                             |     |      |
| C10    | 0,180                   |                             |     |      |
| C5     | 0,587                   |                             |     |      |
| C11    | 0,616                   |                             |     |      |
| C12    | 1,094                   |                             |     |      |
| C6     | 1,114                   |                             |     |      |
| C7     | 1,572                   |                             |     |      |

Figura 3.21: Imagens das correntes com diferentes diferenças de massa específica, tanto da corrente, quanto do fluido ambiente.

Fórmula da variação de massa específica  $\Delta\rho = (\rho_c - \rho_a) / \rho_a$  (Boffo, 2010).

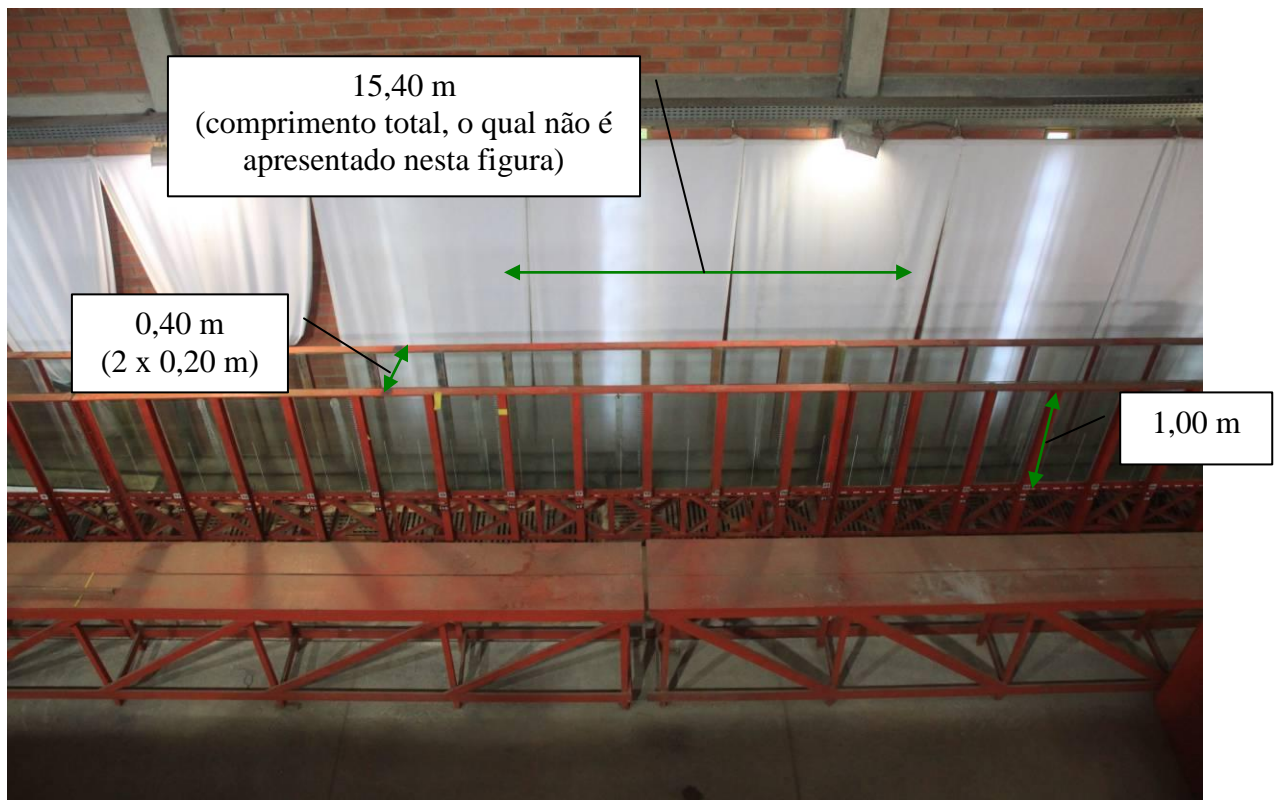
#### 4. APARATOS EXPERIMENTAIS

Como citado anteriormente, os perfis transversais de velocidade de jatos e plumas seguem uma distribuição gaussiana. Uma vez que se busca a analogia entre esses fluxos e correntes de turbidez, na simulação destas faz-se importante a utilização de um canal com largura suficiente para se obter áreas centrais que não sofram muita influência das paredes laterais sobre os fluxos. Além desse fato, é essencial que se possa visualizar o escoamento de forma vertical, podendo facilmente determinar se ele é hiperpicnal ou hipopicnal. Sendo assim, concluiu-se que o melhor canal a ser utilizado nas instalações do laboratório NECOD (Núcleo de Estudo de Correntes de Densidade) é o Canal Unidimensional de Médio Porte, o qual se encontra no Pavilhão NECOD, pois apresenta, simultaneamente, paredes de vidro (para a visualização do escoamento) e uma largura maior que os demais canais de vidro do laboratório. Ele é constituído por uma estrutura em ferro e vidro, cujas dimensões são: 15,40 m de comprimento, 0,40 m de largura (dividido em duas partes com 0,20 m cada) e 1,00 m de profundidade (figuras 4.1 e 4.2).

O canal possui um fundo falso em seu começo, o qual tem uma curta parte inicial horizontal, sendo seguida por uma rampa com  $1,5^\circ$  de declividade. O restante do canal tem o seu fundo nivelado horizontalmente. Ele também pode ter toda a sua declividade modificada, uma vez que possui um apoio pivotado e suportes com altura variável, fazendo com que varie entre  $0^\circ$  e  $20^\circ$  (contudo, esse recurso não foi utilizado neste trabalho).



**Figura 4.1:** Vista geral do Canal Unidimensional de Médio Porte.



**Figura 4.2: Dimensões do canal unidimensional de médio porte a ser utilizado.**

Ao final da estrutura, encontra-se uma área de dispersão, mais profunda do que o restante do canal, cuja finalidade é fazer com que correntes hiperpicnais vertam para dentro dela, evitando a geração de contrafluxos ao se chocarem com a parede final. Para evitar o mesmo fenômeno em correntes hipopicnais e, também, para controlar o nível de água, existe uma calha vertedora dentro dessa câmara.

A alimentação foi feita por dois reservatórios de 2000 litros colocados à montante do canal (figura 4.3): um, onde era realizada a mistura do fluido ambiente diluindo sal em água e outro, onde era preparada a mistura a ser injetada. Após a mistura ser realizada e estar com a massa específica desejada para o fluido ambiente, o mesmo era injetado no canal, de forma a enchê-lo (era necessário realizar duas misturas no reservatório para preencher o volume de fluido ambiente requisitado, atingindo uma lâmina de água de 50 cm). O segundo reservatório era utilizado para preparar a mistura do fluido da corrente a ser gerada, a qual era preparada misturando-se carvão mineral com água até se obter a massa específica desejada. Para manter o carvão mineral em suspensão de forma homogênea foi colocado um agitador elétrico de hélice.



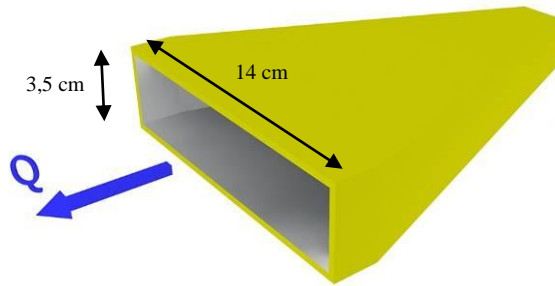


**Figura 4.3:** Reservatório (no primeiro plano da fotografia) para a alimentação dos ensaios.

O controle da vazão de entrada foi feito através de um medidor de vazão (figura 4.4) acoplado à tubulação de entrada do canal. Na ponta da tubulação de entrada foi utilizado um difusor com seção retangular, de forma fazer com que o fluxo entrando no canal fosse distribuído da forma mais homogênea possível. O difusor possui as dimensões da tubulação de entrada, em um lado, e, no outro, uma seção retangular medindo 14 cm x 3,5 cm, sendo que em seu interior foram colocadas guias correntes, para distribuir o escoamento de forma homogênea (figura 4.5).



**Figura 4.4:** Medidor de vazão.



**Figura 4.5: Difusor.**

Com o intuito de se analisar a dinâmica das correntes, foram utilizados dois tipos de equipamentos para a medida de velocidades, ambos funcionando através do princípio do efeito Doppler. O primeiro trata-se de uma sonda ultrassônica tridimensional, a qual faz a leitura das velocidades nos três eixos, chamada Vectrino® (figura 4.6), sendo que foram empregados três destes aparelhos, posicionados e alinhados verticalmente, com o intuito de obter as velocidades das correntes hiperpicnais junto ao fundo. Tal aparelho foi escolhido, pois o seu ponto de medição localiza-se a 5 cm da sua extremidade, podendo o mesmo ser posicionado de forma a não causar interferência no interior da corrente. Já para a medição das velocidades na porção hipopicnal junto à superfície, foi utilizada uma sonda do aparelho UVP (*Ultrasonic Velocity Profiler*), apresentado na figura 4.7, o qual realiza a medição no sentido longitudinal, logo, no eixo do escoamento, portanto, sendo um equipamento invasivo, por isso apenas utilizado na porção final do escoamento. Ambos os equipamentos tem o seu funcionamento detalhado no Anexo A.



**Figura 4.6: Medidores de velocidade por ultrassom Vectrinos.**

A análise da concentração da corrente também foi realizada, utilizando-se um sistema simples de pipetagem, através de sifões ao longo do canal, posicionando junto às sondas de medida de velocidade.



**Figura 4.7: Conjunto UVP (manual – Met-flow).**

Com o objetivo de se obter registros visuais, utilizou-se uma câmera fotográfica Canon, modelo T1i. Sendo assim, foi possível analisar visualmente a mudança entre correntes hiperpicnais e hipopicnais.

Antes de se proceder aos experimentos, julgou-se importante a realização de ensaios prévios em uma estrutura de menor porte, com o objetivo de testar os equipamentos de instrumentação (detalhes no Anexo A) e algumas hipóteses. Para estes primeiros testes, optou-se pelo uso do Canal Unidimensional de Pequenas Dimensões (figura 4.8), existente nas instalações do laboratório NECOD. Ele consiste em um canal de vidro, com 40 cm de altura, 12,5 cm de largura e 400 cm de comprimento. No seu início está presente um reservatório metálico de 25 L para a alimentação do material injetado, que se conecta a um conduto que possui um difusor em sua extremidade. Ao final do canal existe uma cuba metálica para a drenagem do canal e para evitar que haja o retorno da corrente de densidade, quando a mesma atinge o fim do canal.

Com isso, pôde-se aperfeiçoar a técnica de manuseio dos instrumentos e avaliar possíveis limitações no seu uso para os ensaios deste trabalho.



**Figura 4.8: Canal Unidimensional de Pequenas Dimensões empregado nos ensaios preliminares.**

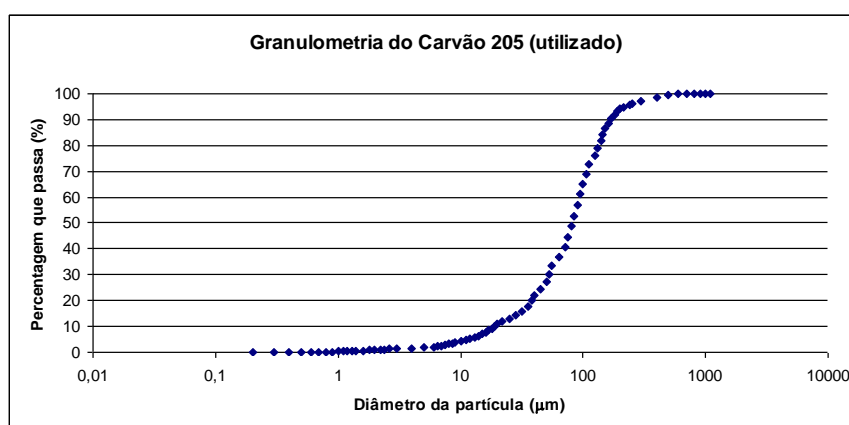


## 5. METODOLOGIA DE ENSAIO

Há anos o laboratório NECOD trabalha com a simulação de correntes de turbidez. Ao longo desse período, diversos materiais e metodologias foram testados para a simulação física desses fenômenos, como apresentados em Fabian (2002) e em Manica (2002). Para a simulação, atualmente, utiliza-se carvão mineral como base dos sedimentos, bem como a técnica de inicialização da corrente através de fluxo contínuo (onde a alimentação é feita de forma contínua através de uma tubulação de entrada conectada a um reservatório de alimentação), ao invés da metodologia por pulso (que consiste em volumes fixos de material liberados de uma única vez dentro do fluido ambiente). Quanto à utilização de instrumentos digitais, alguns destes foram adquiridos recentemente, necessitando estudos exploratórios dos mesmos, sobretudo para o domínio de suas funções e condições de aplicabilidade.

### 5.1. Testes Preliminares

Os ensaios preliminares foram realizados para testar a limitação quanto ao uso de sondas UVP na obtenção de velocidades longitudinais. Ao todo foram realizados 11 ensaios, onde o fluido ambiente consistia em água pura e o fluido em escoamento consistia em uma mistura de água pura com carvão mineral Cardiff 205, com massa específica  $1190\text{kg/m}^3$  e tamanho de partículas com  $d_{50} = 0,090\text{ mm}$ , conforme a curva granulométrica apresentada na figura 5.1, sendo a sua concentração 10% em volume. A mistura era homogeneizada manualmente logo antes do experimento, alimentando um reservatório de 25 litros de onde era injetada através de um difusor retangular (na largura do canal) dentro do fluido ambiente, o qual possuía uma lâmina de água de 20 cm de profundidade.



**Figura 5.1: Distribuição granulométrica do carvão 205 utilizado.**

Os ensaios foram realizados medindo-se as velocidades em diferentes distâncias ao fundo, testando-se diferentes frequências de aquisição dos dados e utilizando sondas de medida de velocidade Vectrino® e de UVP (para a comparação entre os dados obtidos). A tabela 5.1 mostra os ensaios realizados.

**Tabela 5.1: Série de ensaios preliminares executados.**

| Ensaio | Vazão Média (Q) | Distância da Medição ao Fundo | Equipamentos    | Frequência Aquisição Vectrino | Frequência Aquisição UVP |
|--------|-----------------|-------------------------------|-----------------|-------------------------------|--------------------------|
|        | l/min           | cm                            |                 | Hz                            | Hz                       |
| TP1    | 3,6             | 1,20                          | Vectrinos       | 50                            | -                        |
| TP2    | 3,6             | 1,20                          | Vectrinos       | 50                            | -                        |
| TP3    | 3,6             | 1,20                          | Vectrinos       | 50                            | -                        |
| TP4    | 3,6             | 1,20                          | Vectrinos       | 50                            | -                        |
| TP5    | 3,6             | 1,20                          | Vectrinos       | 50                            | -                        |
| TP6    | 3,6             | 0,50                          | Vectrinos       | 200                           | -                        |
| TP7    | 3,6             | 0,50                          | Vectrinos       | 200                           | -                        |
| TP8    | 3,6             | 0,80                          | Vectrinos + UVP | 200                           | 50                       |
| TP9    | 3,6             | 0,80                          | Vectrinos + UVP | 200                           | 50                       |
| TP10   | 3,6             | 1,20                          | Vectrinos       | 200                           | -                        |
| TP11   | 3,6             | 1,20                          | Vectrinos       | 200                           | -                        |

As medidas de velocidade foram realizadas por duas sondas Vectrino®, as quais variavam simultaneamente o seu ponto de medida em relação ao fundo, e uma sonda de UVP (esta apenas nos ensaios TP8 e TP9, vide tabela 1). As duas primeiras possuíam os seus pontos de medidas espaçados em 7 cm. Já a distância do ponto de medida da sonda Vectrino® de jusante para a sonda de UVP foi de 50 cm (figura 5.2 e 5.3). A medida da sonda UVP coincidiu com a sonda Vectrino® de jusante. Para a sincronização dos aparelhos Vectrinos®, foi utilizado um recurso que torna um aparelho *master* e outro *slave*, onde o primeiro comanda o início do segundo através do envio de um pulso elétrico, obtido ao se conectar os cabos transmissores de sinais do equipamento. Para a sincronização do UVP com os Vectrinos®, valeu-se da tradicional utilização de cronômetro, registrando os instantes de passagem da corrente em cada equipamento.

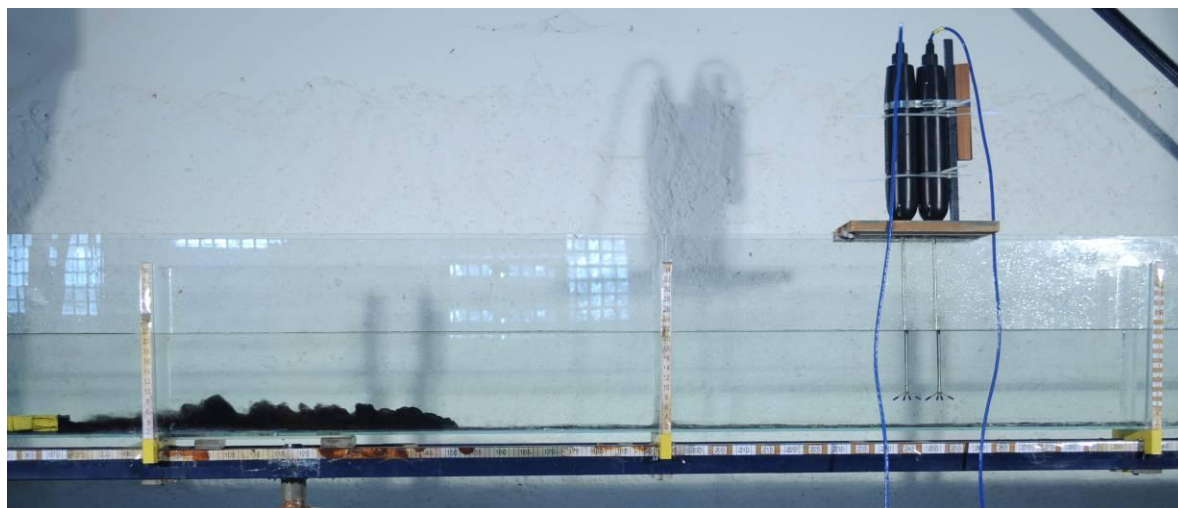
A partir dos sinais coletados, foram calculadas as médias ao longo do tempo dos dados obtidos pelos três equipamentos, bem como a intensidade turbulenta (equação 5.1), os quais foram utilizados para a comparação dos resultados. Os dados foram tratados através do *software* Matlab®.

$$intensidade\ da\ turbulência = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (v_i - \bar{v})^2}{N}}}{\bar{v}} \quad (5.1)$$

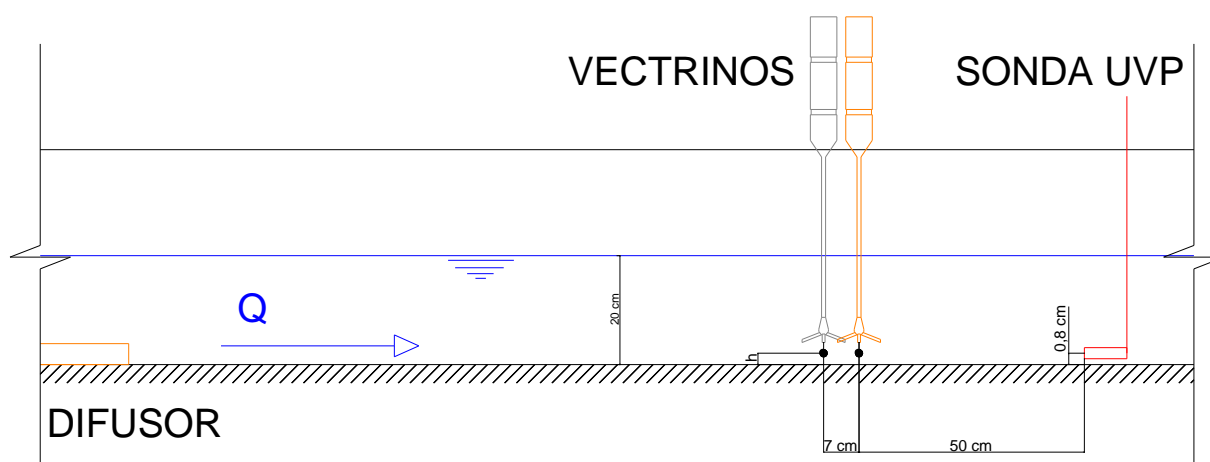
Onde:

$v$  = velocidade (longitudinal ou vertical) [L/T]

$\bar{v}$  = velocidade média (longitudinal ou vertical) [L/T]



**Figura 5.2:** Imagem do instante inicial do escoamento no canal, apresentando o difusor de saída e as sondas Vectrinos.



**Figura 5.3:** Esquema da colocação dos equipamentos.

## 5.2. Ensaios Principais

Com o objetivo de avaliar se, com a metodologia empregada nos ensaios de simulação física das correntes de turbidez, havia um comportamento semelhante a jatos ou plumas, foram realizados experimentos gerando fluxos com uma mistura de água e carvão mineral, a qual era injetada em ambientes de água pura e salino (água e sal dissolvido). Para tal, uma série de 15 ensaios foi desenvolvida. Foram simuladas correntes de turbidez com massa específica maior, igual e menor do que a massa específica do ambiente, a qual assumiu valores em torno de  $1024 \text{ kg/m}^3$ ,  $1010 \text{ kg/m}^3$  e  $996 \text{ kg/m}^3$ . A tabela 5.2 apresenta o resumo dos ensaios realizados.

Em um primeiro instante, trabalhou-se apenas com ambiente de água pura, realizando medidas em três seções distintas.

Em uma segunda etapa, trabalhou-se com ambientes salinos, sendo as medidas realizadas nas mesmas seções da primeira parte, além de uma quarta seção onde a corrente hipopical ocorria. Quanto às condições de injeção, houve a redução da seção do difusor de entrada, aumentando a quantidade de movimento inicial.

Para a terceira etapa, tomaram-se apenas medidas em três seções mais à montante, se aproximando da saída do difusor, o qual teve a sua seção plena em todos os casos.

**Tabela 5.2: Resumo dos ensaios.**

| Etapa                  | Ensaio                           | Massa específica do fluido ambiente ( $\rho_a$ ) | Massa específica do fluxo ( $\rho_o$ ) | Concentração volumétrica | Vazão (Q) | Seção Difusor |          |
|------------------------|----------------------------------|--|--|--------------------------|-----------|---------------|----------|
|                        |                                  | kg/m <sup>3</sup>                                | kg/m <sup>3</sup>                      |                          | l/min     |               |          |
| Ambiente com água pura | Apenas geração de hiperpical     | E1   | 996                                    | 1013,33                  | 8,93%     | 10            | Plena    |
|                        |                                  | E2   | 996                                    | 1014,07                  | 9,31%     | 10            | Plena    |
|                        |                                  | E3   | 996                                    | 1014,48                  | 9,53%     | 10            | Plena    |
| Ambiente salino        | Com análise da porção hipopical  | E4   | 1024                                   | 1013,42                  | 8,98%     | 10            | Plena    |
|                        |                                  | E5   | 1024                                   | 1014,79                  | 9,68%     | 10            | Reduzida |
|                        |                                  | E6   | 1024                                   | 1025,36                  | 15,14%    | 10            | Plena    |
|                        |                                  | E7   | 1024                                   | 1021,49                  | 13,14%    | 10            | Reduzida |
|                        |                                  | E8   | 1024                                   | 1033,31                  | 19,23%    | 10            | Plena    |
|                        |                                  | E9   | 1024                                   | 1033,40                  | 19,53%    | 10            | Reduzida |
|                        | Apenas da região próxima à saída | E10  | 1024                                   | 1029,55                  | 17,29%    | 10            | Plena    |
|                        |                                  | E11  | 1024                                   | 1029,86                  | 17,44%    | 10            | Plena    |
|                        |                                  | E12  | 1024                                   | 1029,38                  | 17,21%    | 6             | Plena    |
|                        |                                  | E13  | 1024                                   | 1029,54                  | 17,29%    | 14            | Plena    |
|                        |                                  | E14  | 1011                                   | 1012,93                  | 8,73%     | 10            | Plena    |
|                        |                                  | E15  | 1010                                   | 1020,91                  | 12,84%    | 10            | Plena    |

Em todos os ensaios, foram obtidos os dados de vazão ao longo do tempo, massa específica do fluxo na saída do difusor e as velocidades. Apenas na fase final, onde os pontos medidos localizaram-se mais à montante, foram obtidas amostras da concentração dos fluxos, através de pipetagem.

### 5.2.1. Metodologia de Ensaio

Foram simuladas correntes com uma mistura de carvão mineral e água clara. Elas foram injetadas em um fluido ambiente composto por água pura e em um ambiente salino (água e sal), com o intuito de analisar os comportamentos dinâmicos, geométricos e de concentração da corrente. As massas específicas dos fluidos foram baseadas, inicialmente, no trabalho de Boffo (2010). A massa específica da mistura injetada variou entre 1013kg/m<sup>3</sup> e 1033kg/m<sup>3</sup>. Já no fluido ambiente ela variou entre 996 kg/m<sup>3</sup> e 1024 kg/m<sup>3</sup>.

Primeiramente, utilizou-se um dos reservatórios de 2000 litros para realizar a mistura do fluido ambiente, no caso de ambientes salinos, o qual recebeu o sal, que foi misturado manualmente de forma a dissolvê-lo em água até atingir a concentração desejada. A concentração foi medida através de um densímetro. Ao finalizar a mistura, a mesma era injetada para dentro do canal, até atingir o nível desejado (50 cm). Para garantir a homogeneidade do fluido ambiente, antes da realização dos experimentos, o fluido era agitado dentro do canal e, através de um multiteste, obtinham-se medidas aproximadas da condutividade elétrica da mistura ao longo de um perfil vertical, de forma a verificar a homogeneidade vertical da mesma.

A mistura de sedimentos, injetada de forma contínua no canal, foi mantida em suspensão através de um misturador eletromagnético em outro reservatório de 2000 litros, o qual alimentava o canal através de uma tubulação e de um difusor posicionado em sua extremidade. Para evitar que o volume inserido causasse uma elevação no nível da água dentro do canal, uma calha vertente drenava o excesso de água na região final do canal.

O medidor eletromagnético de vazões foi instalado na tubulação de alimentação, logo antes da entrada do canal, registrando continuamente a vazão de entrada utilizada nos experimentos. Entre este medidor e o canal, foi instalado um sistema de válvulas, para que fosse possível realizar a amostragem da mistura injetada no começo e no final dos ensaios, obtendo-se a concentração da mistura para cada experimento.

Apesar de o canal apresentar uma rampa inicial com  $1,5^\circ$ , o material somente foi injetado à jusante dela. Isso ocorreu para não haver influência da declividade sobre a velocidade, bem como para haver semelhança com os ensaios de Boffo (2010), os quais foram realizados em canal nivelado horizontalmente. A rampa permaneceu, pois a sua retirada não mostrou-se necessária, logo, optou-se por não modificar esse aspecto do canal, acarretando em uma menor interferência.

O difusor, por onde ocorria a injeção da mistura, possui seção retangular, tendo dimensões 14 cm (largura) x 3,5 cm (altura). Quando se trabalhou com a sua seção reduzida, parte da seção livre do difusor foi bloqueada, reduzindo-se a altura da seção para 1,75 cm.

Para a análise da velocidade, foram utilizadas sondas Vectrino®, para a coleta dos sinais de velocidades, na porção hiperpicnal da corrente, adquirindo dados com uma frequência de 200 Hz. A distância do ponto de medida ao fundo foi localizada entre o intervalo de 0,2 h e 0,3 h, onde, teoricamente, encontravam-se as velocidades máximas das correntes (Altinakar et al., 1996). Para a porção hipopical da corrente, utilizou-se uma sonda UVP, adquirindo os dados com uma frequência de 50 Hz. As velocidades foram tratadas através de médias temporais a cada 1 segundo.

No caso dos ensaios onde as medidas de velocidade foram realizadas mais próximas ao difusor, junto à sonda para a medição das velocidades foram posicionados sifões, a fim de se amostrar o fluido da corrente e poder obter a concentração no local. Foram coletadas três amostras de concentração, espaçadas pelo intervalo de 5 segundos, em cada uma das seções. A primeira foi coletada entre o instante da chegada da cabeça da corrente e 5 segundos após; a segunda amostra foi coletada entre os 5 segundos após a passagem da cabeça e 10 segundos; a última foi obtida entre os 10 segundos após a passagem da cabeça e 15 segundos.

Para a determinação da velocidade inicial ( $v_0$ ), tomando-se a linha central do difusor, levantou-se o perfil vertical das velocidades horizontais logo na saída do fluxo, para as vazões utilizadas nos ensaios. O valor máximo de velocidades nesse perfil foi utilizado como o  $v_0$ , nos cálculos de parâmetros do escoamento.

Os ensaios e a operação dos equipamentos exigiram três operadores: um controlando a válvula de entrada e registrando a vazão lida pelo medidor; outro cuidando do registro visual, através da câmera fotográfica; o último utilizando dois computadores para o registro dos equipamentos de velocidade, os quais tiveram as suas leituras sincronizadas, para posterior análise e comparação.

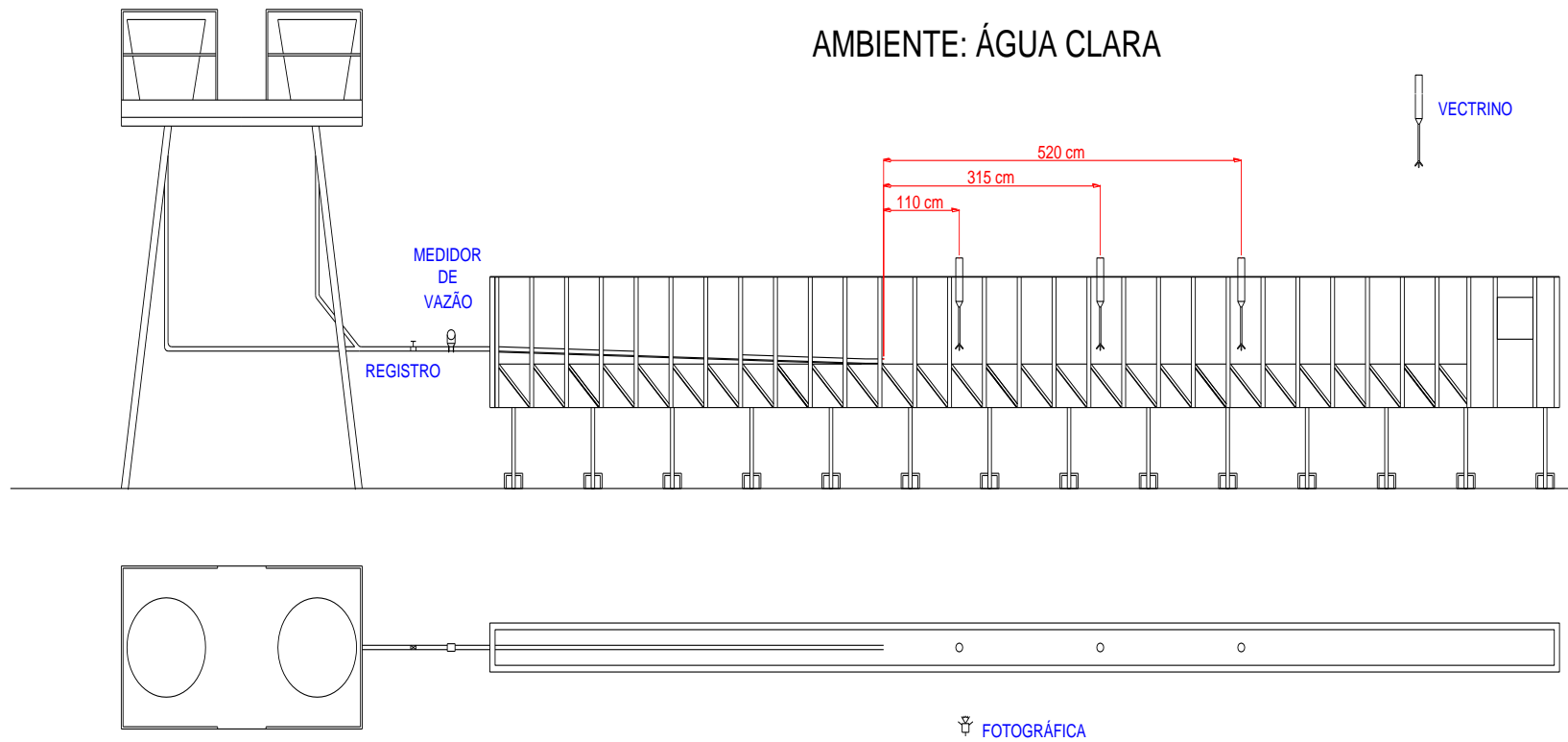
Para o caso em que houve a obtenção das amostras de concentração, utilizaram-se outros dois operadores, para realizarem as coletas durante a passagem das correntes. Os dois foram responsáveis pela obtenção do fluido do fluxo nas três seções analisadas, realizando 3 amostras a cada cinco segundos da passagem da corrente. As amostras passaram por um processo de dessalinização, onde foi avaliada a quantidade de sal, carvão e água dentro de cada uma, determinando a massa específica total.

Se valendo dos registros visuais, foi possível a análise das espessuras das correntes, bem como seus pontos de desprendimento. Para avaliar as espessuras da corrente, utilizaram-se escalas verticais coladas na parte externa do canal, as quais serviam como referência para a determinação da altura da corrente nos instantes desejados. No caso da determinação do ponto de desprendimento, as escalas utilizadas eram posicionadas horizontalmente, indicando a distância ao difusor. O critério para identificar o ponto de desprendimento foi a identificação visual da seção em que a corrente interrompeu o seu avanço e passou a flutuar, gerando uma corrente hipopical, mesmo que após houvesse a geração de uma corrente hiperpical.

Como a filmagem dos ensaios foi realizada com uma única câmera, a qual não pôde capturar a imagem das quatro seções de amostragem simultaneamente, optou-se por analisar os dados dos 15 segundos iniciais da corrente em cada uma, pois, para os instantes seguintes em cada seção, não existia registro visual. Com isso, os pontos de análise não foram analisados em instantes iguais.

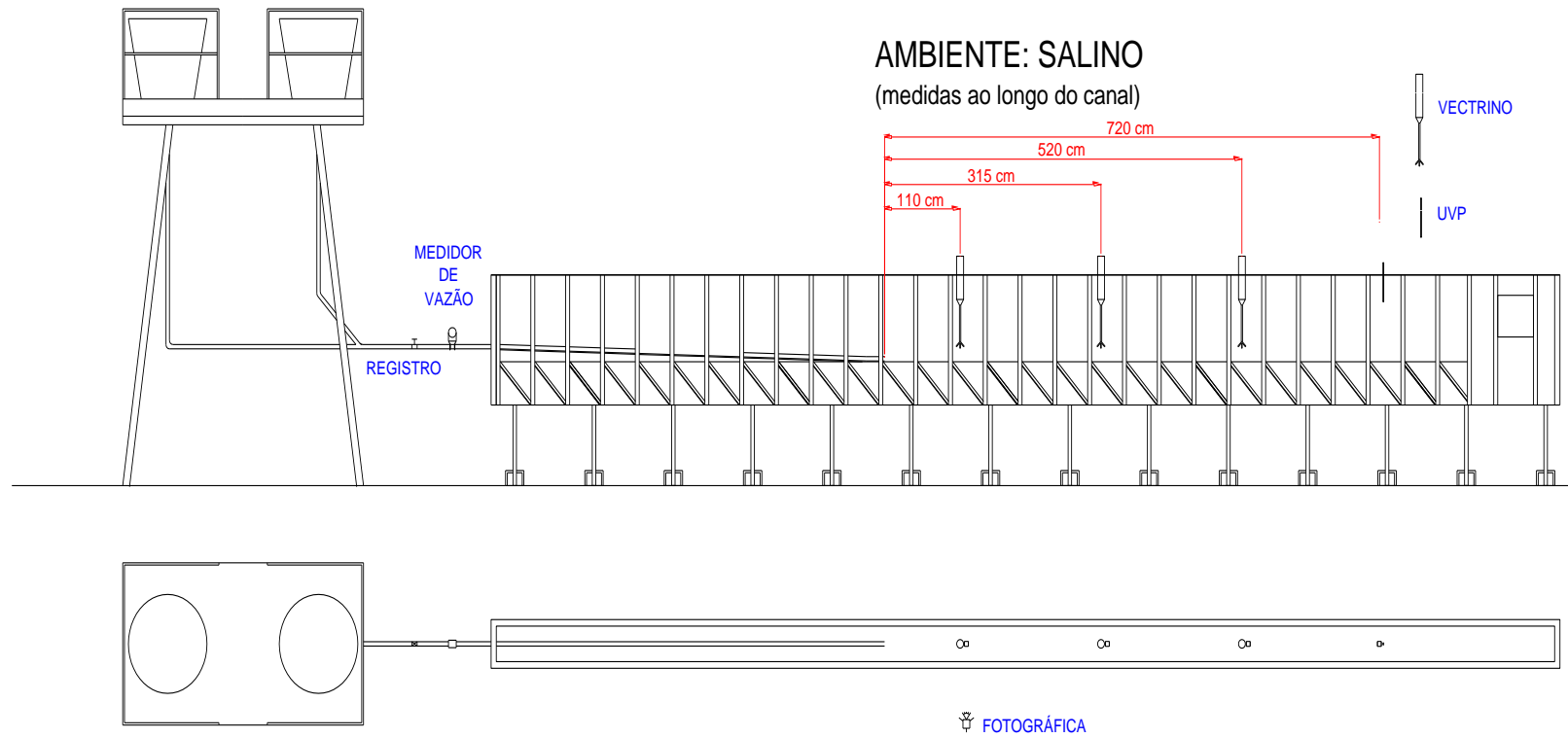
Como não havia a necessidade da análise dos depósitos, o canal era esvaziado logo ao final dos experimentos, limpando-o para o próximo ensaio.

O croqui das instalações com o posicionamento dos equipamentos, nas diferentes condições de ambiente ensaiadas: água clara e água salina, bem como próximo ao difusor, podem ser vistos nas figuras 5.4, 5.5 e 5.6.

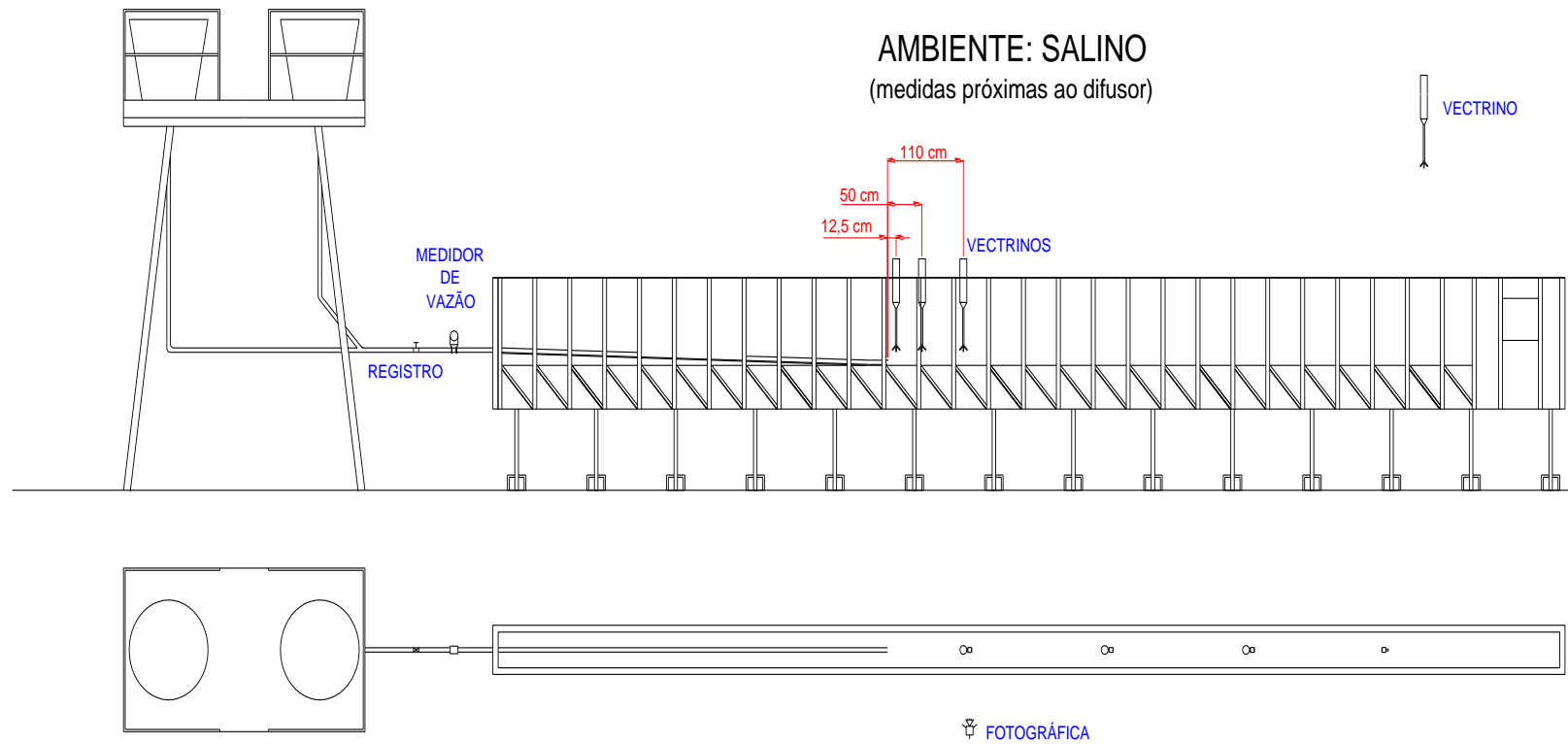


**Figura 5.4: Croqui das instalações e posicionamento dos equipamentos para os ensaios com ambiente de água clara. Sentido do fluxo é da esquerda para a direita.**





**Figura 5.5:** Croqui das instalações e posicionamento dos equipamentos para os ensaios com ambiente salino. Sentido do fluxo é da esquerda para a direita.

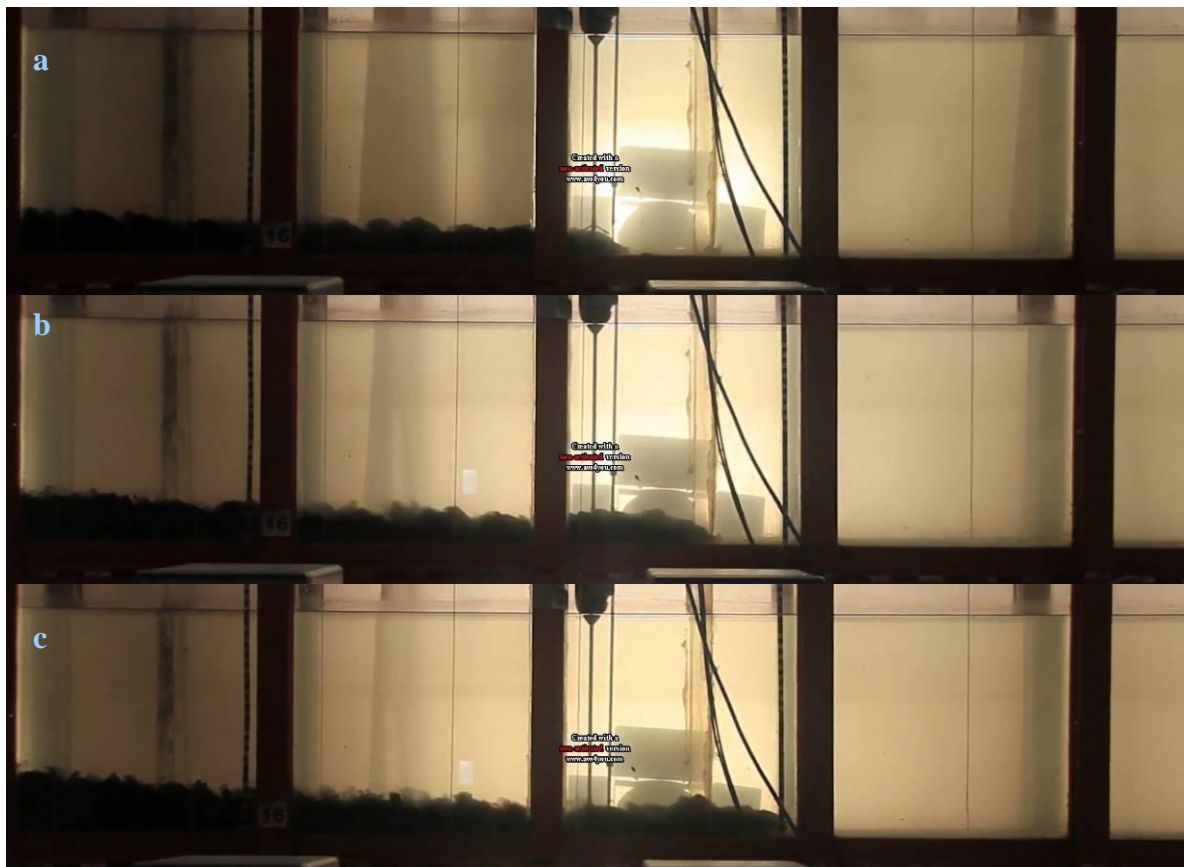


**Figura 5.6: Croqui das instalações e posicionamento dos equipamentos para os ensaios com ambiente salino com medições próximas à saída do difusor. Sentido do fluxo é da esquerda para a direita.**

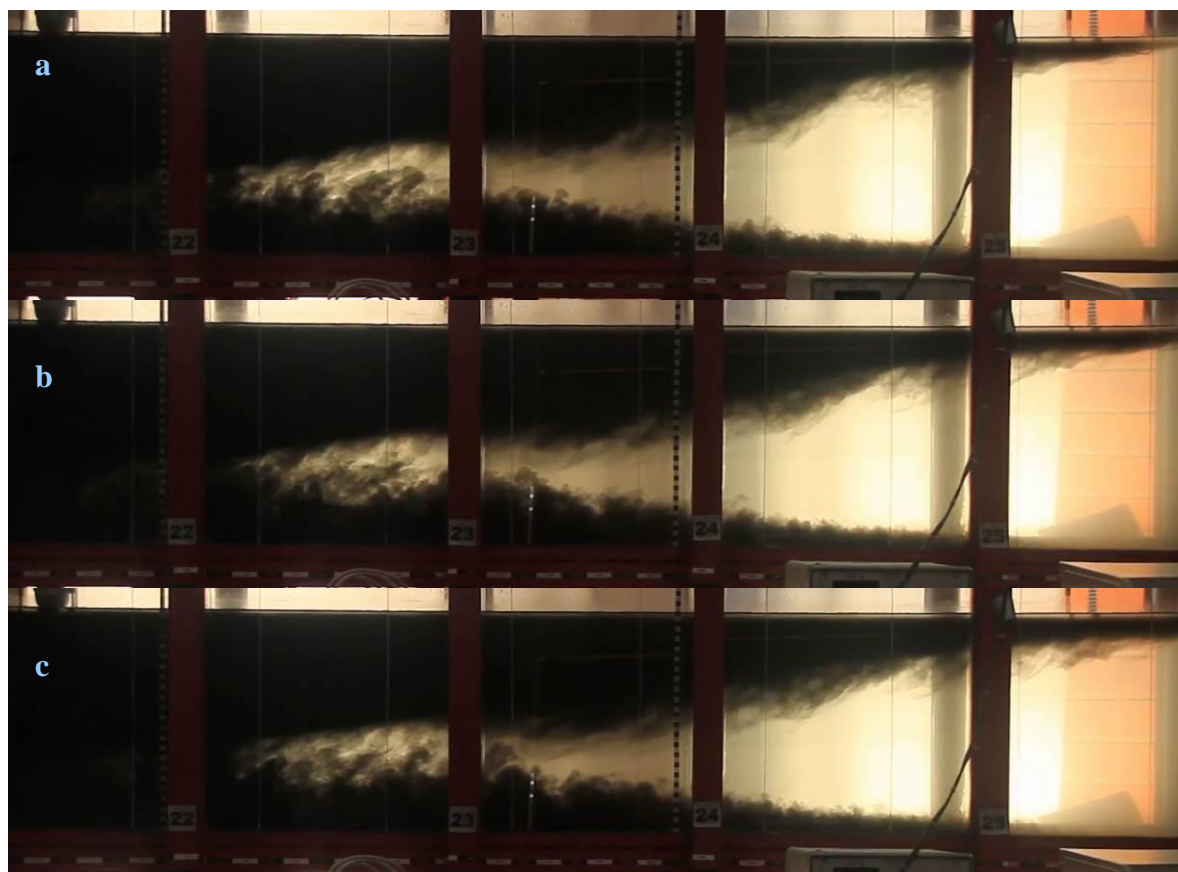
## 5.2.2. Metodologia de Tratamento de Dados

### 5.2.2.1. Espessura das Correntes

Valendo-se das imagens dos ensaios capturadas com a câmera fotográfica, obtiveram-se as espessuras das correntes. Elas foram mensuradas através de escalas coladas no canal, as quais serviram para calibração das imagens. A iluminação foi feita por trás do canal, buscando um melhor contraste da corrente, contudo isso acarretou na necessidade de um tratamento das imagens, para uma melhor visualização das escalas. As medidas da espessura da corrente foram tomadas em três instantes no momento em que a corrente chega ao ponto de medida; cinco segundos, após a sua passagem; e dez segundos após a sua passagem. A figura 5.7 exemplifica três instantes distintos da passagem de uma corrente hiperpical pelos equipamentos de medição, enquanto a figura 5.8 mostra três instantes distintos para uma corrente que desenvolve uma parte hipopical.



**Figura 5.7:** Três instantes de uma corrente hiperpical: a) 0 s, b) 5 s, c) 10 s após a sua passagem pelo ponto de medida.



**Figura 5.8:** Três instantes de uma corrente hipopical (na foto em questão, também há a geração de uma corrente hiperpical, junto ao fundo): a) 0 s, b) 5 s, c) 10 s após a sua passagem pelo ponto de medida.

#### 5.2.2.2. Velocidade de Avanço

Primeiramente, procedeu-se ao tratamento dos dados brutos de velocidade. Para cada valor fornecido pelo equipamento Vectrino®, gera-se um valor de correlação do mesmo, correlacionando o sinal emitido com o recebido, afim de se analisar a qualidade do dado obtido. Após esta análise dos sinais em relação às suas correlações, notou-se que a maioria dos dados obtidos tinha correlações acima de 0,90 (sinais de altíssima qualidade), sendo assim, adotou-se como critério a filtragem de valores de velocidade com correlação inferiores a 0,90, substituindo os valores de velocidade correspondentes, através de interpolação dos dados nos instantes anteriores e posteriores. Para tal procedimento, primeiramente, converteu-se os arquivos gerados pela sonda para formatos em que outros softwares pudessem utilizar e transferiram-se os dados para o *software* Matlab®, onde criou-se um algoritmo para realizar as filtrações dos dados e sua manipulação, interpolando os dados eliminados pela baixa correlação e executando as suas médias. O mesmo algoritmo foi utilizado para o tratamento dos dados da sonda UVP.

Em um segundo momento, todos os valores de velocidades tratados utilizando o *software* Matlab® tiveram as suas médias obtidas para cada um dos três instantes de medida

de concentração (0-5 segundos após a passagem da cabeça da corrente; 5-10 segundos após a passagem da cabeça da corrente; e 10-15 segundos após a passagem da cabeça da corrente).

### 5.2.2.3. Concentração Local

Para a determinação da concentração das amostras obtidas por sifonamento, nos mesmos pontos das medidas de velocidades, os frascos de coleta eram tarados e as amostras pesadas, logo após a sua coleta, passando então por um processo de dessanilização da água. Para retirar o sal misturado no fluido coletado, quando for o caso, esperava-se que o carvão das amostras decantasse e então a água salina, que ficava na parte superior, era sifonada, sendo, em seguida, adicionada água pura em seu lugar e aguardado o decantamento do carvão, novamente. Este processo foi realizado até que se retirou o sal da amostra, podendo-se, assim, determinar a quantidade de carvão que havia na amostra e a concentração total (incluindo o sal dissolvido e o carvão em suspensão).

### 5.2.2.4. Parâmetros Característicos do Escoamento

A partir dos dados tratados, conforme descrito, procedeu-se ao cálculo dos parâmetros para a comparação entre correntes hiperpicnais e hipopicnais com jatos e plumas. Abaixo estão elencadas as grandezas e as suas fórmulas para cálculo.

i) Vazão Inicial

$$Q = \text{vazão nos experimentos [L}^3\text{/T]} \quad (5.2)$$

O fluxo volumétrico inicial é igual à vazão de entrada, a qual foi de 6, 10 e 14 litros por minuto, dependendo do ensaio.

ii) Vazão na Corrente

$$q = v \cdot (h \cdot L_{\text{canal}}) \quad (5.3)$$

Onde:  $q$  = vazão na corrente [ $\text{L}^3\text{/T}$ ];

$v$  = velocidade do fluxo no local [ $\text{L/T}$ ];

$h$  = altura do fluxo no local [ $\text{L}$ ];

$L_{\text{canal}}$  = largura do canal, 0,20 m, tomada pelo fato de a corrente sempre ocupar toda a largura do canal [ $\text{L}$ ].

iii) Fluxo de Quantidade de Movimento Inicial

$$M = A_{\text{difusor}} \cdot v_o^2 \quad (5.4)$$

Onde:  $M$  = fluxo de quantidade de movimento inicial [ $\text{L}^4\text{/T}^2$ ];

$A_{\text{difusor}}$  = área do difusor [ $\text{L}^2$ ];

$h_o$  = altura do difusor de saída, 0,035 m (seção plena) ou 0,0175 m (seção reduzida) [L];

$L_{difusor}$  = largura do difusor de saída, 0,14 m [L];

$v_o$  = velocidade inicial do fluxo [L/T].

iv) Fluxo de Quantidade de Movimento na Corrente

$$m = v^2 \cdot (h \cdot L_{canal}) \quad (5.5)$$

Onde:  $m$  = fluxo de quantidade de movimento no local medido na corrente [ $L^4/T^2$ ].

v) Fluxo Oriundo da Diferença de Massa Específica Inicial (*buoyancy flux*)

$$B = g \frac{|\rho_o - \rho_a|}{\rho_a} Q \quad (5.6)$$

Onde:  $B$  = fluxo oriundo da diferença de massa específica inicial [ $L^4/T^3$ ];

$g$  = aceleração da gravidade [ $L/T^2$ ];

$\rho_o$  = massa específica da mistura injetada [ $M/L^3$ ];

$\rho_a$  = massa específica da mistura do ambiente [ $M/L^3$ ].

vi) Fluxo Oriundo da Diferença de Massa Específica (*buoyancy flux*) na Corrente

$$\beta = g \frac{|\rho_c - \rho_a|}{\rho_a} q \quad (5.7)$$

Onde:  $\beta$  = fluxo oriundo da diferença de massa específica na corrente [ $L^4/T^3$ ];

$\rho_c$  = massa específica do fluxo [ $M/L^3$ ].

vii) Distância Característica

$$L_m = \frac{M^{3/4}}{B^{1/2}} \quad (5.8)$$

Onde:  $L_m$  = distância característica [L].

viii) Richardson Inicial

$$R_o = \frac{L_{difusor}}{L_m} \quad (5.9)$$

Onde:  $R_o$  = Richardson inicial [-];

$L_{difusor}$  = largura característica igual à largura do difusor de saída [L].

ix) Richardson Local

$$R_p = \left( \frac{q \cdot B^{1/2}}{m^{5/4}} \right) \quad (5.10)$$

Onde:  $R_p$  = Richardson local [-];

x) Distância Adimensional

$$\zeta = 0,254 \cdot \left( \frac{x - x_o}{L_{difusor}} \right) \left( \frac{R_o}{R_p} \right) \quad (5.11)$$

Onde:  $\zeta$  = distância adimensional [-];

$x - x_o$  = distância em relação à origem [L].

xi) Diluição Adimensional

$$\psi = \left( \frac{q}{Q} \right) \sqrt{\frac{R_o}{R_p}} \quad (5.12)$$

Onde:  $\psi$  = diluição adimensional [-];

Também geraram-se os parâmetros necessários para graficar os dados de acordo com a metodologia aplicada por Papanicolau & List (1988) e Rajaratnam (1976) nas figuras 18, 19 e 20, permitindo comparar o comportamento dos fluxos com os de jatos.

$$\text{Velocidade adimensionalizada: } \frac{M^{1/2}}{x \cdot v} \quad (5.13)$$

$$\text{Distância adimensionalizada pela distância característica: } \frac{x}{L_m} \quad (5.14)$$

$$\text{Velocidade máxima adimensionalizada: } \frac{v_m}{v_o} \quad (5.15)$$

$$\text{Distância adimensionalizada pela abertura do difusor: } \frac{x}{h_o} \quad (5.16)$$

$$\text{Velocidade adimensionalizada: } \left( \frac{v_o}{v_m} \right)^2 \quad (5.17)$$

$$\text{Distância a origem virtual adimensionalizada pela abertura do difusor: } \frac{x'}{h_o} \quad (5.18)$$

## **6. RESULTADOS**

### **6.1. Resultados dos Testes Preliminares**

Para a realização dos testes preliminares, todos os equipamentos utilizados foram sincronizados, para que fosse possível a sua comparação mútua. Através dos sinais apresentados, pôde-se perceber o momento de chegada da corrente. Quando não há um fluxo passando, as sondas de velocidade apresentam ruído, notando-se o seu desaparecimento e surgindo uma linha de velocidades bem definida em sua leitura, quando a corrente passa por ele. Valendo-se disso e da cronometragem dos ensaios, pôde-se determinar o instante em que a corrente chega à sonda.

Foram medidas as velocidades médias, verticais e longitudinais, após a passagem da cabeça/nariz da corrente pelo Vectrino® de jusante, estando ambos os aparelhos (montante e jusante) sincronizados. As médias das componentes longitudinais das velocidades se apresentaram muito maiores do que as médias das componentes verticais. Também, as variações, entre montante e jusante, das velocidades longitudinais não são significativas, muito embora, as variações nas velocidades verticais as são (vide tabela 6.1).

Tomando os fatos citados de forma isolada, poderia se concluir que há uma preponderância das velocidades longitudinais sobre as verticais, podendo ignorar a segunda em vista da primeira. Contudo, há de se analisar a intensidade da turbulência que ocorreu. De acordo com a tabela 3 nota-se que há uma variação nas velocidades verticais que é muito maior do que as suas próprias médias, o que sugere uma intensa atividade turbulenta.

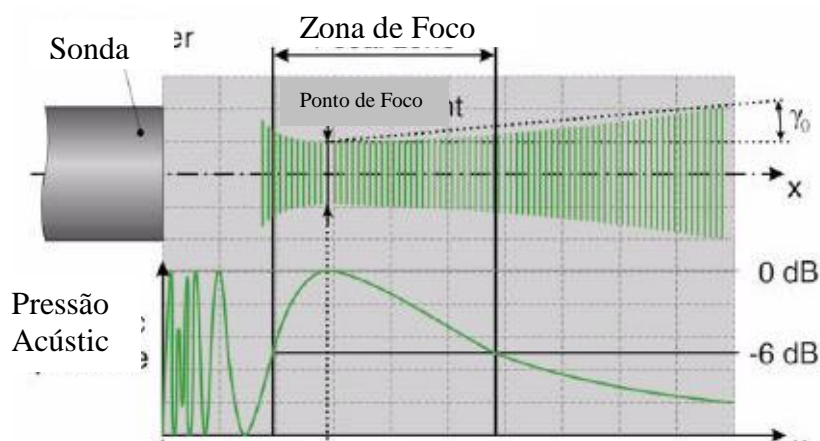
Quanto ao uso da sonda UVP para a medida de velocidade, a mesma apresentou valores muito abaixo da leitura da sonda Vectrino® no mesmo ponto (sonda de jusante). Isso ocorreu pela divergência do feixe ultrassônico emitido, ou seja, o volume amostrado pelo UVP é muito maior do que aquele amostrado pelo Vectrino®. Como visto na figura 3.5, seção 3.3.1, o perfil de velocidades das correntes não é homogêneo, logo, enquanto o Vectrino® foi posicionado para medir o ponto de maior velocidade da corrente, a sonda de UVP integrou o perfil todo, obtendo uma média.



**Tabela 6.1: Resultados da série de ensaios preliminares.**

| Ensaio | Velocidade | Vectrino Montante | Vectrino Jusante | UVP (mesmo ponto que o Vectrino Jusante) | Relação das Velocidades (Jusante / Montante) | Intensidade da Turbulência Montante | Intensidade da Turbulência Jusante | Distância medida do fundo | Equipamentos    | Freq. Aquis. Vectrino | Freq. Aquis. UVP |
|--------|------------|-------------------|------------------|--|--|-------------------------------------|------------------------------------|---------------------------|-----------------|-----------------------|------------------|
|        |            | m/s               | m/s              | m/s                                      |  | m/s                                 | m/s                                | cm                        |                 | Hz                    | Hz               |
| TP1    | Horizontal | 0,0377            | 0,0425           | -  | 113%   | 0,0039                              | 0,0034                             | 1,20                      | Vectrinos       | 50                    | -                |
|        | Vertical   | 0,0002            | -0,0004          | -  | -280%  | 0,0013                              | 0,0008                             |                           |                 |                       |                  |
| TP2    | Horizontal | 0,0371            | 0,0420           | -  | 113%   | 0,0051                              | 0,0044                             | 1,20                      | Vectrinos       | 50                    | -                |
|        | Vertical   | 0,0001            | -0,0005          | -  | 1085%  | 0,0009                              | 0,0010                             |                           |                 |                       |                  |
| TP3    | Horizontal | 0,0369            | 0,0411           | -  | 111%   | 0,0063                              | 0,0054                             | 1,20                      | Vectrinos       | 50                    | -                |
|        | Vertical   | -0,0004           | -0,0005          | -  | 132%   | 0,0010                              | 0,0017                             |                           |                 |                       |                  |
| TP4    | Horizontal | 0,0397            | 0,0442           | -  | 111%   | 0,0065                              | 0,0061                             | 1,20                      | Vectrinos       | 50                    | -                |
|        | Vertical   | -0,0005           | -0,0006          | -  | 129%   | 0,0010                              | 0,0010                             |                           |                 |                       |                  |
| TP5    | Horizontal | 0,0398            | 0,0423           | -  | 106%   | 0,0046                              | 0,0058                             | 1,20                      | Vectrinos       | 50                    | -                |
|        | Vertical   | -0,0005           | -0,0007          | -  | 142%   | 0,0012                              | 0,0014                             |                           |                 |                       |                  |
| TP6    | Horizontal | 0,0505            | 0,0492           | -  | 97%  | 0,0081                              | 0,0123                             | 0,50                      | Vectrinos       | 200                   | -                |
|        | Vertical   | 0,0003            | 0,0005           | -  | 144%   | 0,0021                              | 0,0030                             |                           |                 |                       |                  |
| TP7    | Horizontal | 0,0494            | 0,0566           | -  | 115%   | 0,0081                              | 0,0053                             | 0,50                      | Vectrinos       | 200                   | -                |
|        | Vertical   | -0,0010           | -0,0011          | -  | 118%   | 0,0026                              | 0,0015                             |                           |                 |                       |                  |
| TP8    | Horizontal | 0,0498            | 0,0542           | 0,0112                                   | 109%   | 0,0085                              | 0,0069                             | 0,80                      | Vectrinos + UVP | 200                   | 50               |
|        | Vertical   | -0,0001           | -0,0002          | -  | 136%   | 0,0019                              | 0,0019                             |                           |                 |                       |                  |
| TP9    | Horizontal | 0,0496            | 0,0554           | 0,0174                                   | 112%   | 0,0080                              | 0,0079                             | 0,80                      | Vectrinos + UVP | 200                   | 50               |
|        | Vertical   | -0,0007           | -0,0004          | -  | 58%  | 0,0021                              | 0,0020                             |                           |                 |                       |                  |
| TP10   | Horizontal | 0,0357            | 0,0426           | -  | 119%   | 0,0159                              | 0,0137                             | 1,20                      | Vectrinos       | 200                   | -                |
|        | Vertical   | -0,0004           | -0,0001          | -  | 33%  | 0,0041                              | 0,0030                             |                           |                 |                       |                  |
| TP11   | Horizontal | 0,0390            | 0,0440           | -  | 113%   | 0,0107                              | 0,0134                             | 1,20                      | Vectrinos       | 200                   | -                |
|        | Vertical   | 0,0000            | -0,0001          | -  | -266%  | 0,0033                              | 0,0032                             |                           |                 |                       |                  |

A figura 6.1 mostra o esquema de funcionamento da sonda de UVP. De acordo com o fabricante, o ângulo de divergência ( $\gamma_0$ ) das sondas utilizadas (tipo TN2-10-13) é de  $2,2^\circ$ , ou seja, a divergência é de 1,92 cm, para os 50 cm de distância da sonda até o ponto de medida adotado. Somando-se com 1 cm de espessura do feixe, o volume de amostragem do UVP possuía aproximadamente 4,84 cm de espessura, valor esse que correspondia ao valor médio da espessura das correntes no local, ou seja, a sonda integrou todo o perfil de velocidades da corrente. Para se obter um volume de amostragem aproximadamente igual ao do Vectrino® (0,6 cm de diâmetro e 0,3 cm de altura), há de se medir a 5 cm da sonda, quando a espessura do volume de amostragem é de 0,38 cm.



**Figura 6.1: Funcionamento da sonda de UVP (adaptado do manual – Met-flow).**

As conclusões dos testes preliminares foram de que as sondas de UVP deveriam realizar medidas muito próximas à sua fonte (5 cm), para evitar maior dispersão de seu feixe sonoro. Dada essa dispersão, não é possível realizar um perfil completo da corrente, sem que haja a aproximação considerável das sondas. Com isso a utilização do UVP mostrou-se invasiva, portanto, sendo somente possível utilizá-la ao final do fluxo, para não afetar a corrente.

Uma vez que as sondas de UVP são invasivas, portanto, deu-se preferência para a utilização das sondas Vectrinos®, pois a sua leitura é feita nos três eixos, sendo posicionada a 5 cm do ponto desejado. As sondas Vectrinos® foram utilizadas para a leitura de correntes hiperpicnais (as quais ocorreram antes das hipopícnais), já que não interferem no fluxo. Para a parte hipopícnal da corrente, os Vectrinos® não puderam ser utilizados, pois como a leitura realizada a 5 cm da sua ponta, as primeiras medidas seriam feitas a 5 cm abaixo da superfície da água, logo, fora da região de interesse na porção hipopícnal da corrente. Assim, a utilização de uma única sonda de UVP foi a escolha para amostrar a velocidade dos experimentos que desenvolveram correntes hipopícnais.

## 6.2. Resultados dos Ensaiois

### 6.2.1. Análise Qualitativa

Sobre a análise dos dados, primeiramente realizou-se uma análise qualitativa dos nove primeiros ensaios ( $E_1$  a  $E_9$ ), onde houveram medidas em pontos mais afastados do difusor, analisando questões como a transição de correntes hiperpicnal para hipopicnal e o seu ponto de desprendimento. Notou-se que os experimentos que possuíam a seção do difusor reduzida apresentaram uma maior incorporação de fluido ambiente, logo no início do fluxo, em relação aos seus equivalentes com seção plena. Aparentemente, isso foi causado pelo aumento da velocidade de entrada (redução do difusor). Com isso, há um desprendimento maior de material na porção superior da corrente, logo após a saída do difusor. A figura 6.2 mostra as correntes dos ensaios  $E_6$  e  $E_7$ , os quais possuíam as mesmas características com a exceção da seção do difusor ser reduzida no ensaio  $E_7$ . As imagens são dos mesmos instantes e no mesmo local, sendo possível observar o aumento na espessura da corrente, no caso da corrente gerada com o difusor a meia-seção.



**Figura 6.2:** a) corrente do ensaio  $E_6$  (seção do difusor plena) e b) corrente do ensaio  $E_7$  (seção do difusor reduzida). Em destaque o aumento da espessura da corrente.

A tabela 6.2 apresenta os ensaios com os seus fluxos iniciais, números de Reynolds inicial e os pontos de desprendimento das correntes. Há de se ressaltar que a questão do ponto de desprendimento, no qual a corrente passa de uma corrente hiperpicnal para uma corrente hipopicnal, apenas foi analisado nos ensaios  $E_1$  a  $E_9$ . Como pode ser notado, o número de Reynolds inicial não aumenta de forma considerável, se observarmos os ensaios cuja

diferença se dá apenas pela redução da seção do difusor ( $E_4$  e  $E_5$ ;  $E_6$  e  $E_7$ ;  $E_8$  e  $E_9$ ), logo, a questão da turbulência inicial não aparenta ser a causadora de um desprendimento maior de material na porção superior da corrente. A ocorrência deste desprendimento pode estar ligada à grande diferença entre as velocidades na porção superior e inferior da corrente de densidade, com as menores velocidades ocorrendo na parte superior (vide figura 3.5) e favorecendo um desprendimento de material na região.

Pode-se notar que, quando há a redução da seção, acaba havendo uma redução na quantidade de movimento inicial (pequena diferença entre as velocidades iniciais) e o ponto de desprendimento da corrente ocorre antes. Isso, provavelmente, possui relação com o escape de material na porção superior da corrente, incorporando maior quantidade de fluido ambiente. A tabela 6.3 apresenta as imagens das correntes hiperpicnais e hipopicnais, bem com os seus instantes de desprendimento.

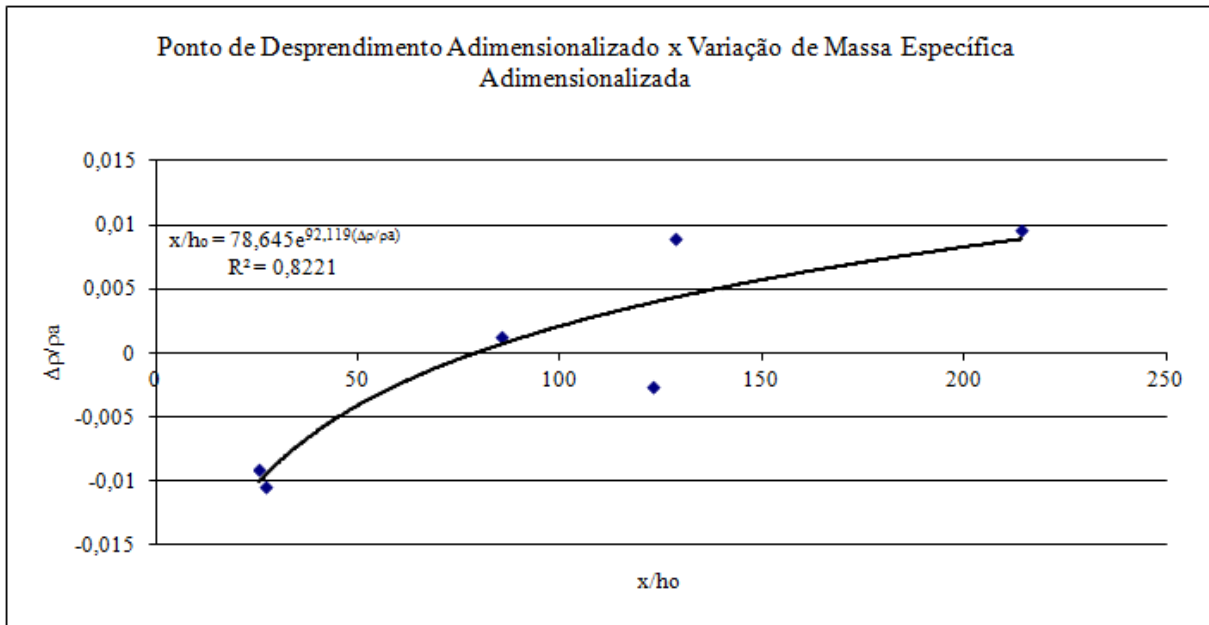
**Tabela 6.2: Massa específica, número de Reynolds, fluxos iniciais e ponto de desprendimento nos ensaios  $E_1$  a  $E_{15}$ .**

| Ensaio   | Seção do Difusor | $\rho_a$          | $\rho_o$          | Reynolds Inicial | Q     | M                              | B                              | Ponto de Desprendimento |
|----------|------------------|-------------------|-------------------|------------------|-------|--------------------------------|--------------------------------|-------------------------|
|          |                  | kg/m <sup>3</sup> | kg/m <sup>3</sup> | -                | l/min | m <sup>4</sup> /s <sup>2</sup> | m <sup>4</sup> /s <sup>3</sup> | m                       |
| $E_1$    | Plena            | 996               | 1013,33           | 1243,4           | 10    | 4,15E-05                       | 2,80E-05                       | NÃO HOUE                |
| $E_2$    | Plena            | 996               | 1014,07           | 1242,5           | 10    | 4,15E-05                       | 2,91E-05                       | NÃO HOUE                |
| $E_3$    | Plena            | 996               | 1014,48           | 1242,0           | 10    | 4,15E-05                       | 2,98E-05                       | NÃO HOUE                |
| $E_4$    | Plena            | 1024              | 1013,42           | 1243,3           | 10    | 4,15E-05                       | 1,71E-05                       | 0,95                    |
| $E_5$    | Reduzida         | 1024              | 1014,79           | 1328,6           | 10    | 2,21E-05                       | 1,48E-05                       | 0,45                    |
| $E_6$    | Plena            | 1024              | 1025,36           | 1228,8           | 10    | 4,15E-05                       | 0,22E-05                       | 5,35                    |
| $E_7$    | Reduzida         | 1024              | 1021,49           | 1319,8           | 10    | 2,21E-05                       | 0,40E-05                       | 3,35                    |
| $E_8$    | Plena            | 1024              | 1033,31           | 1219,4           | 10    | 4,15E-05                       | 1,47E-05                       | 8,4                     |
| $E_9$    | Reduzida         | 1024              | 1033,90           | 1304,0           | 10    | 2,21E-05                       | 1,56E-05                       | 7,15                    |
| $E_{10}$ | Plena            | 1024              | 1029,55           | 1359,8           | 9     | 4,15E-05                       | 0,79E-05                       | NÃO FOI ANALISADO       |
| $E_{11}$ | Plena            | 1024              | 1029,86           | 1223,5           | 10    | 4,15E-05                       | 0,93E-05                       |                         |
| $E_{12}$ | Plena            | 1024              | 1029,38           | 1407,6           | 6     | 1,76E-05                       | 0,51E-05                       |                         |
| $E_{13}$ | Plena            | 1024              | 1029,54           | 1066,5           | 14    | 7,06E-05                       | 1,23E-05                       |                         |
| $E_{14}$ | Plena            | 1011              | 1012,93           | 1243,9           | 10    | 4,15E-05                       | 0,31E-05                       |                         |
| $E_{15}$ | Plena            | 1010              | 1020,91           | 1234,2           | 10    | 4,15E-05                       | 1,75E-05                       |                         |

Tomando a diferença de massa específica adimensionalizada,  $(\rho_o - \rho_a)/\rho_a$ , nota-se que há uma relação com o ponto de desprendimento adimensionalizado,  $(x-x_o)/h_o$ , da corrente. Para valores menores de massa específica adimensionalizada, a transição de uma corrente hiperpicnal para uma corrente hipopicnal ocorre mais próxima à origem, enquanto que para valores maiores dessa diferença, o ponto de desprendimento tende a se afastar da origem (figura 6.3).

Aos dados observados nos ensaios, pôde-se ajustar uma tendência para tal desprendimento. Após a tentativa de ajuste aplicando diversas tendências (linear, exponencial, logarítmica, etc.), analisando-se a correlação em cada uma, a expressão de melhor ajuste é apresentada abaixo:









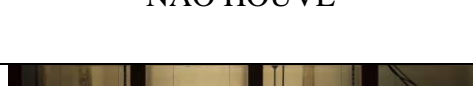
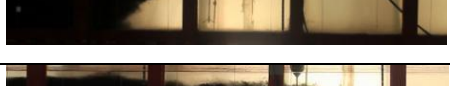










$$\frac{x}{h_o} = 78,645.e^{92,119\left(\frac{\Delta\rho}{\rho_a}\right)}, \text{ com } R^2 = 0,8221 \quad (6.1)$$



**Figura 6.3:** Análise do ponto de desprendimento em relação à diferença entre as massas específicas.






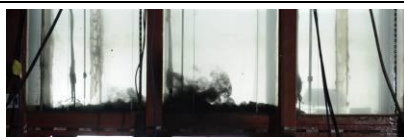


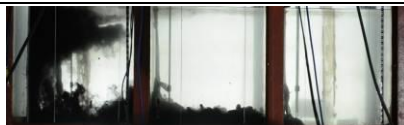
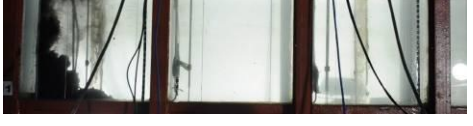



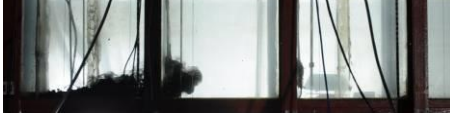



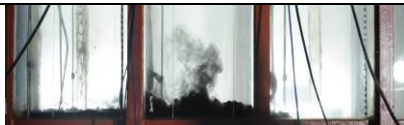
No caso dos ensaios E<sub>10</sub> a E<sub>15</sub>, não houve análise do ponto de desprendimento da corrente, pois as medições ficaram mais focadas na região proximal da corrente. A tabela 6.4 apresenta as imagens destas correntes nos três pontos de análise.

**Tabela 6.3: Imagens dos experimentos E<sub>1</sub> a E<sub>9</sub> (as imagens não são do mesmo local em todos os ensaios).**

| ENSAIOS        | HIPERPICNAL  | DESPRENDIMENTO  | HIPOPICNAL  |
|----------------|--|---|---|
| E <sub>1</sub> |    | NÃO HOUE  | NÃO HOUE  |
| E <sub>2</sub> |    | NÃO HOUE  | NÃO HOUE  |
| E <sub>3</sub> |    | NÃO HOUE  | NÃO HOUE  |
| E <sub>4</sub> |    |    |    |
| E <sub>5</sub> | NÃO HOUE   |    |    |
| E <sub>6</sub> |    |    |    |
| E <sub>7</sub> |   |   |   |
| E <sub>8</sub> |  |  |  |
| E <sub>9</sub> |  |  |  |



**Tabela 6.4: Imagens dos experimentos E<sub>10</sub> a E<sub>15</sub> (imagens dos mesmos locais em todos os ensaios).**

| ENSAIOS/<br>POSIÇÃO | 12,5 cm  | 50 cm   | 110 cm  |
|---------------------|--|---|---|
| E <sub>10</sub>     |    |    |    |
| E <sub>11</sub>     |    |    |    |
| E <sub>12</sub>     |    |    |    |
| E <sub>13</sub>     |    |    |    |
| E <sub>14</sub>     |  |  |  |
| E <sub>15</sub>     |  |  |  |

## 6.2.2. Análise Quantitativa

Buscando possíveis relações das correntes hiperpicnais com jatos, geraram-se fluxos onde foram analisadas as suas características geométricas, dinâmicas e de concentração. Tais características são usadas para caracterizar jatos e plumas, portanto, foram utilizadas neste trabalho para buscar alguma relação entre os fluxos. Nesta seção são apresentados os resultados de tal análise.

### 6.2.2.1. Características Geométricas: espessura da corrente

A evolução da espessura da corrente com relação à distância ao difusor foi avaliada nas posições de 12,5 cm; 50 cm; 110 cm; 315 cm; 520 cm e 720 cm. A tabela 6.5 apresenta os valores da espessura da corrente. Nota-se que, para algumas correntes não foi possível avaliá-las, sendo indicadas na tabela como “sem medida”.

Os valores de espessura medidos nos ensaios foram graficados (figura 6.4) junto com a estimativa de espessura de um jato de parede dada pela relação  $h = 0,068.x$  (Rajaratnam, 1976) e com dados obtidos nos ensaios de Boffo (2010) e reproduzidos na tabela 6.6. A adoção da série de 6 ensaios de Boffo (2010), obtidos em condições semelhantes a alguns dos ensaios deste trabalho, em condição de massa específica do fluxo maior do que a do ambiente e em ambiente salino, visou ampliar a base de dados, uma vez que foram amostrados a 20 cm, 40 cm e 60 cm da saída do difusor, e verificar se apresentam alguma tendência distinta aos encontrados no presente trabalho. A representação gráfica das espessuras experimentais e calculadas para jatos de parede se encontra na figura 6.4.

Através da figura 6.4, nota-se que:

- não há um crescimento constante da altura da corrente com a distância;
- em geral, as alturas medidas são menores do que a espessura estimada para o jato de parede;
- quanto mais longe da fonte, maior é a diferença entre o valor estimado para jato de parede e o valor medido na corrente;
- em distâncias a partir de 100 cm da fonte, a espessura da corrente é sempre inferior à espessura estimada para jato de parede, sendo que, existe uma tendência à redução deste valor;
- independentemente da relação entre as massas específicas do meio ambiente e da corrente, as correntes tendem a atingir espessuras de no máximo 7cm, enquanto que a espessura do jato de parede cresce constantemente com a distância.

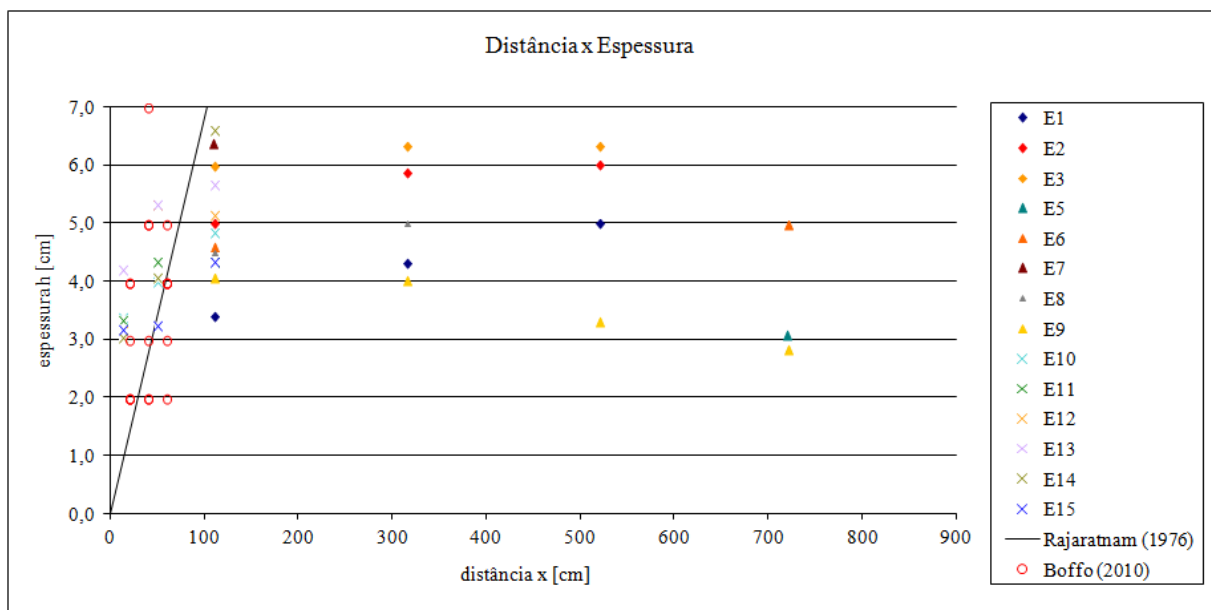


**Tabela 6.5: Dados das espessuras das correntes.**

| Espessura Corrente (cm) |                                    |       |        |            |                   |            |
|-------------------------|------------------------------------|-------|--------|------------|-------------------|------------|
| Ensaio/distância (x)    | 12,5 cm                            | 50 cm | 110 cm | 315 cm     | 520 cm            | 720 cm     |
| E <sub>1</sub>          | SEM MEDIDA                         |       | 3,4    | 4,3        | 5,0               | SEM MEDIDA |
| E <sub>2</sub>          |                                    |       | 5,0    | 5,9        | 6,0               |            |
| E <sub>3</sub>          |                                    |       | 6,0    | 6,3        | 6,3               |            |
| E <sub>4</sub>          | NÃO GEROU HIPERPICNAL PARA ANÁLISE |       |        |            |                   |            |
| E <sub>5</sub>          | NÃO GEROU HIPERPICNAL PARA ANÁLISE |       |        |            |                   |            |
| E <sub>6</sub>          | SEM MEDIDA                         |       | 4,6    | SEM MEDIDA | REGIÃO HIPOPICNAL |            |
| E <sub>7</sub>          |                                    |       | 6,4    |            |                   |            |
| E <sub>8</sub>          |                                    |       | 4,5    | 5,0        |                   |            |
| E <sub>9</sub>          |                                    |       | 4,1    | 4,0        |                   |            |
| E <sub>10</sub>         | 3,4                                | 4,0   | 4,8    | SEM MEDIDA |                   |            |
| E <sub>11</sub>         | 3,3                                | 4,3   | 4,3    |            |                   |            |
| E <sub>12</sub>         | 3,2                                | 5,3   | 5,2    |            |                   |            |
| E <sub>13</sub>         | 4,2                                | 5,3   | 5,7    |            |                   |            |
| E <sub>14</sub>         | 3,0                                | 4,1   | 6,6    |            |                   |            |
| E <sub>15</sub>         | 3,2                                | 3,2   | 4,3    |            |                   |            |

**Tabela 6.6: Resumo dos resultados dos ensaios de Boffo (2010).**

| Ensaio          | $\rho_a$          | $\rho_c$          | Posição |       |        |
|-----------------|-------------------|-------------------|---------|-------|--------|
|                 | kg/m <sup>3</sup> | kg/m <sup>3</sup> | 12,5 cm | 50 cm | 110 cm |
| C <sub>4</sub>  | 1010              | 1012              | 4,0     | 5,0   | 4,0    |
| C <sub>5</sub>  | 1010              | 1016              | 2,0     | 2,0   | 3,0    |
| C <sub>6</sub>  | 1010              | 1021              | 2,0     | 2,0   | 2,0    |
| C <sub>10</sub> | 1015              | 1017              | 2,0     | 3,0   | 4,0    |
| C <sub>11</sub> | 1015              | 1021              | 3,0     | 5,0   | 4,0    |
| C <sub>12</sub> | 1015              | 1026              | 4,0     | 7,0   | 5,0    |



**Figura 6.4: Relação distância pela espessura da corrente.**

Em suma, o fenômeno simulado, correntes de turbidez, não apresenta uma tendência de evolução de suas espessuras segundo a lei de jatos de parede. Nota-se que não há uma tendência clara de aumento da espessura das correntes hiperpicnais similar ao caso de jatos.

#### **6.2.2.2. Características Dinâmicas**

Para a avaliação das características dinâmicas das correntes, partindo do tratamento das velocidades locais medidas com o uso dos Vectrinos® e das concentrações obtidas pela pipetagem, foram determinados os fluxos de quantidade de movimento e oriundos da variação de massas específicas, bem como as velocidades de avanço da corrente ao longo do eixo do canal, os quais se encontram apresentados nas tabelas 6.8 e 6.9 (mais adiante, no texto).

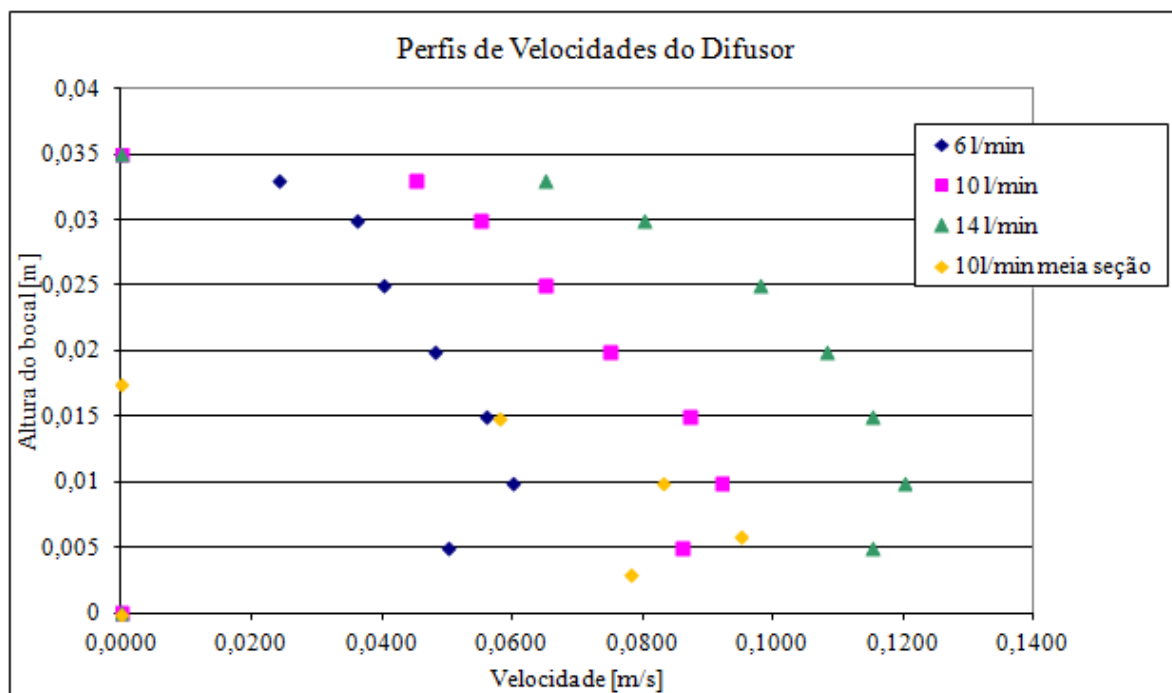
##### **a) Velocidade Inicial do Fluxo**

A velocidade de avanço da corrente foi avaliada em diferentes posições ao longo do canal, como descrito no item 5.2.1 da metodologia. O tratamento dos seus dados se deu de acordo com o explicitado no item 5.2.2.2.

Como a velocidade inicial é utilizada em diversas avaliações do presente trabalho, se fez necessária a avaliação da mesma junto ao difusor. Devido ao fato da mistura injetada ser constituída por material sedimentar, mesmo que o difusor tenha sido construído com guias corrente para promover uma distribuição mais homogênea do fluxo, notaram-se algumas alterações na injeção. Não se pode estimar a velocidade inicial do fluxo, simplesmente, dividindo-se a vazão de injeção pela área do difusor.

Assim, as velocidades iniciais foram obtidas através de levantamentos dos perfis de velocidade na saída do difusor, os quais, para facilitar a comparação com a evolução das velocidades ao longo de jatos, foram realizados na parte central do difusor (eixo do difusor). Também se considerou, para fins de cálculo da velocidade média, que as velocidades tendem a zero junto às paredes do difusor. A figura 6.5 mostra os perfis de velocidade do eixo do difusor levantados para as vazões ensaiadas e a tabela 6.7 resume os valores de velocidade média e velocidade máxima avaliados.

No que se refere ao desenvolvimento das velocidades ao longo do escoamento, jatos e plumas apresentam uma tendência clara de comportamento. Para analisar se há o mesmo tipo de comportamento em correntes hiperpicnais e hipopicnais, os dados de velocidade foram obtidos para as seções dos ensaios e são apresentados na tabela 6.8. O número de Reynolds local é apresentado apenas para os ensaios E<sub>10</sub> a E<sub>15</sub>, onde houveram coleta de material para a análise da massas específica e conseqüente cálculo da viscosidade cinemática.



**Figura 6.5:** Perfis de velocidade para as vazões: a) 6 l/min, b) 10 l/min, c) 14 l/min e d) 10 l/min com meia seção.

**Tabela 6.7:** Dados das velocidades média e máximas avaliadas para o difusor na entrada do canal

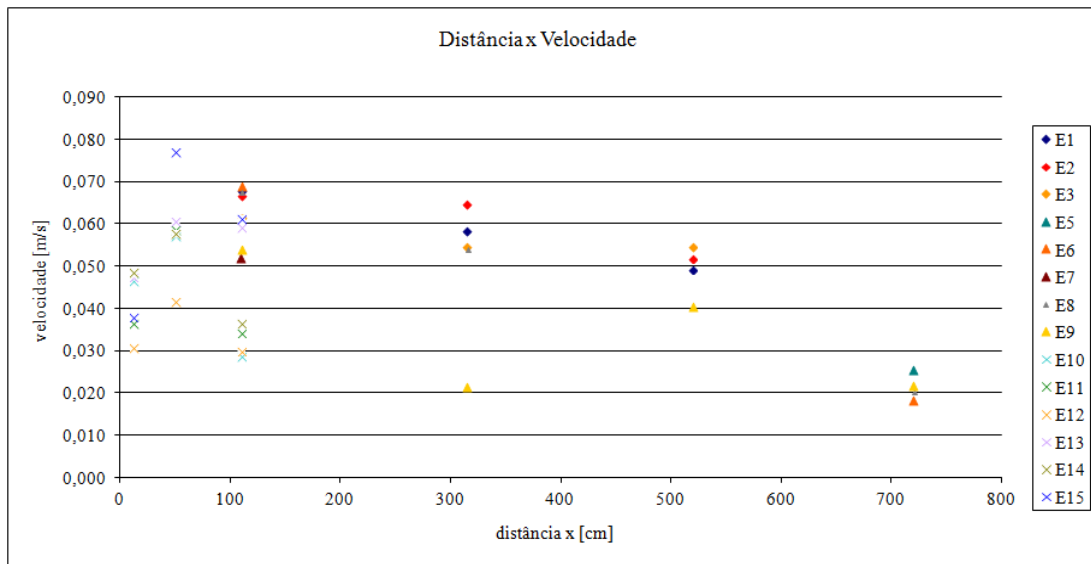
|             | Q     | V <sub>média</sub> | V <sub>max</sub> |
|-------------|-------|--------------------|------------------|
|             | l/min | m/s                | m/s              |
| Seção plena | 6     | 0,0211             | 0,060            |
|             | 10    | 0,0337             | 0,092            |
|             | 14    | 0,0466             | 0,120            |
| Meia seção  | 10    | 0,0661             | 0,095            |

### b) Relação Entre a Velocidade de Propagação da Corrente e a Distância

A análise das velocidades médias ao longo do eixo do canal (figura 6.6) indica um decaimento, sendo que, próximo ao difusor, as velocidades podem atingir cerca de 0,070m/s e, nas porções mais distais, elas tendem ao valor de 0,020m/s.

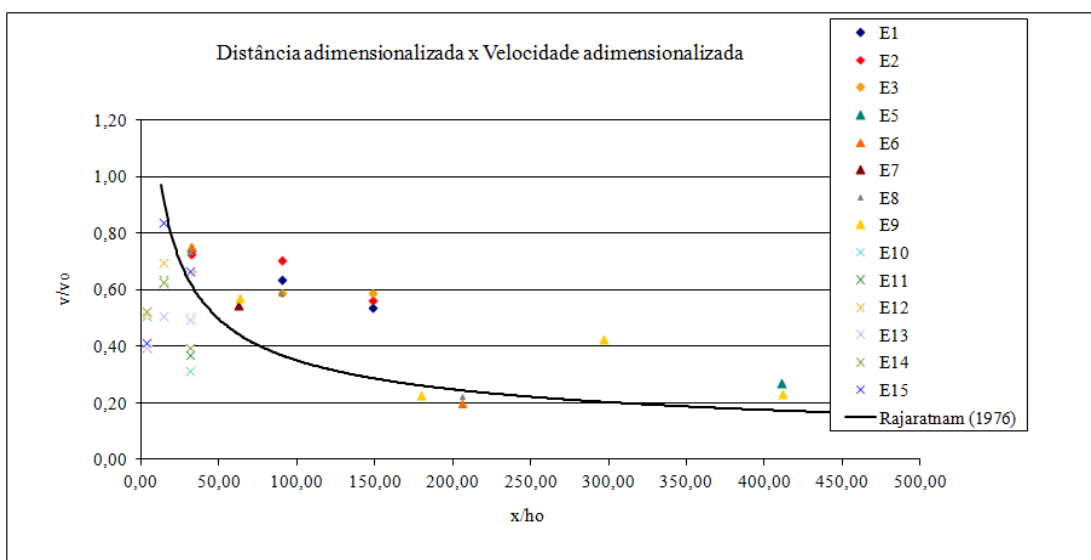
**Tabela 6.8: Dados das grandezas geométricas e dinâmicas.**

| Série            | Ensaio          | x<br>cm | x'<br>cm | v<br>m/s | x/h <sub>0</sub><br>- | v/v <sub>0</sub><br>- | x'/h <sub>0</sub><br>- | (v <sub>0</sub> /v) <sup>2</sup><br>- | Reynolds<br>- |
|------------------|-----------------|---------|----------|----------|-----------------------|-----------------------|------------------------|---------------------------------------|---------------|
| Água Pura Distal | E <sub>1</sub>  | 110     | 145      | 0,068    | 31,43                 | 0,74                  | 41,43                  | 1,36                                  | SEM MEDIDA    |
|                  |                 | 315     | 350      | 0,058    | 90,00                 | 0,64                  | 100,00                 | 1,57                                  |               |
|                  |                 | 520     | 555      | 0,049    | 148,57                | 0,53                  | 158,57                 | 1,87                                  |               |
|                  | E <sub>2</sub>  | 110     | 145      | 0,067    | 31,43                 | 0,72                  | 41,43                  | 1,38                                  |               |
|                  |                 | 315     | 350      | 0,065    | 90,00                 | 0,70                  | 100,00                 | 1,42                                  |               |
|                  |                 | 520     | 555      | 0,052    | 148,57                | 0,56                  | 158,57                 | 1,78                                  |               |
|                  | E <sub>3</sub>  | 110     | 145      | 0,061    | 31,43                 | 0,67                  | 41,43                  | 1,50                                  |               |
|                  |                 | 315     | 350      | 0,054    | 90,00                 | 0,59                  | 100,00                 | 1,69                                  |               |
|                  |                 | 520     | 555      | 0,055    | 148,57                | 0,59                  | 158,57                 | 1,69                                  |               |
| E <sub>4</sub>   | SEM MEDIDA      |         |          |          |                       |                       |                        |                                       |               |
| Salino Distal    | E <sub>5</sub>  | 720     | 737,5    | 0,025    | 411,43                | 0,27                  | 421,43                 | 3,74                                  | SEM MEDIDA    |
|                  | E <sub>6</sub>  | 110     | 145      | 0,069    | 31,43                 | 0,75                  | 41,43                  | 1,33                                  |               |
|                  |                 | 720     | 755      | 0,018    | 205,71                | 0,20                  | 215,71                 | 5,00                                  |               |
|                  | E <sub>7</sub>  | 110     | 127,5    | 0,052    | 62,86                 | 0,55                  | 72,86                  | 1,83                                  |               |
|                  | E <sub>8</sub>  | 110     | 145      | 0,068    | 31,43                 | 0,73                  | 41,43                  | 1,36                                  |               |
|                  |                 | 315     | 350      | 0,054    | 90,00                 | 0,59                  | 100,00                 | 1,70                                  |               |
|                  |                 | 720     | 755      | 0,020    | 205,71                | 0,22                  | 215,71                 | 4,51                                  |               |
|                  | E <sub>9</sub>  | 110     | 127,5    | 0,054    | 62,86                 | 0,57                  | 72,86                  | 1,76                                  |               |
|                  |                 | 315     | 332,5    | 0,022    | 180,00                | 0,23                  | 190,00                 | 4,41                                  |               |
| 720              |                 | 737,5   | 0,022    | 411,43   | 0,23                  | 421,43                | 4,36                   |                                       |               |
| Salino Proximal  | E <sub>10</sub> | 12,5    | 47,5     | 0,046    | 3,57                  | 0,50                  | 13,57                  | 1,98                                  | 827,6         |
|                  |                 | 50      | 85       | 0,057    | 14,29                 | 0,62                  | 24,29                  | 1,61                                  | 1296,5        |
|                  |                 | 110     | 145      | 0,029    | 31,43                 | 0,31                  | 41,43                  | 3,22                                  | 742,0         |
|                  | E <sub>11</sub> | 12,5    | 47,5     | 0,037    | 3,57                  | 0,40                  | 13,57                  | 2,51                                  | 785,1         |
|                  |                 | 50      | 85       | 0,059    | 14,29                 | 0,64                  | 24,29                  | 1,57                                  | 1642,5        |
|                  |                 | 110     | 145      | 0,034    | 31,43                 | 0,37                  | 41,43                  | 2,69                                  | 976,6         |
|                  | E <sub>12</sub> | 12,5    | 47,5     | 0,031    | 3,57                  | 0,51                  | 13,57                  | 1,94                                  | 615,6         |
|                  |                 | 50      | 85       | 0,042    | 14,29                 | 0,69                  | 24,29                  | 1,44                                  | 1393,2        |
|                  |                 | 110     | 145      | 0,030    | 31,43                 | 0,50                  | 41,43                  | 2,00                                  | 1019,2        |
|                  | E <sub>13</sub> | 12,5    | 47,5     | 0,048    | 3,57                  | 0,40                  | 13,57                  | 2,52                                  | 1188,4        |
|                  |                 | 50      | 85       | 0,061    | 14,29                 | 0,51                  | 24,29                  | 1,98                                  | 1802,0        |
|                  |                 | 110     | 145      | 0,059    | 31,43                 | 0,49                  | 41,43                  | 2,02                                  | 2411,8        |
|                  | E <sub>14</sub> | 12,5    | 47,5     | 0,049    | 3,57                  | 0,53                  | 13,57                  | 1,90                                  | 1192,7        |
|                  |                 | 50      | 85       | 0,058    | 14,29                 | 0,63                  | 24,29                  | 1,59                                  | 1849,1        |
|                  |                 | 110     | 145      | 0,037    | 31,43                 | 0,40                  | 41,43                  | 2,51                                  | 2007,8        |
|                  | E <sub>15</sub> | 12,5    | 47,5     | 0,038    | 3,57                  | 0,41                  | 13,57                  | 2,42                                  | 893,3         |
|                  |                 | 50      | 85       | 0,077    | 14,29                 | 0,84                  | 24,29                  | 1,19                                  | 1863,1        |
|                  |                 | 110     | 145      | 0,061    | 31,43                 | 0,67                  | 41,43                  | 1,50                                  | 2009,0        |



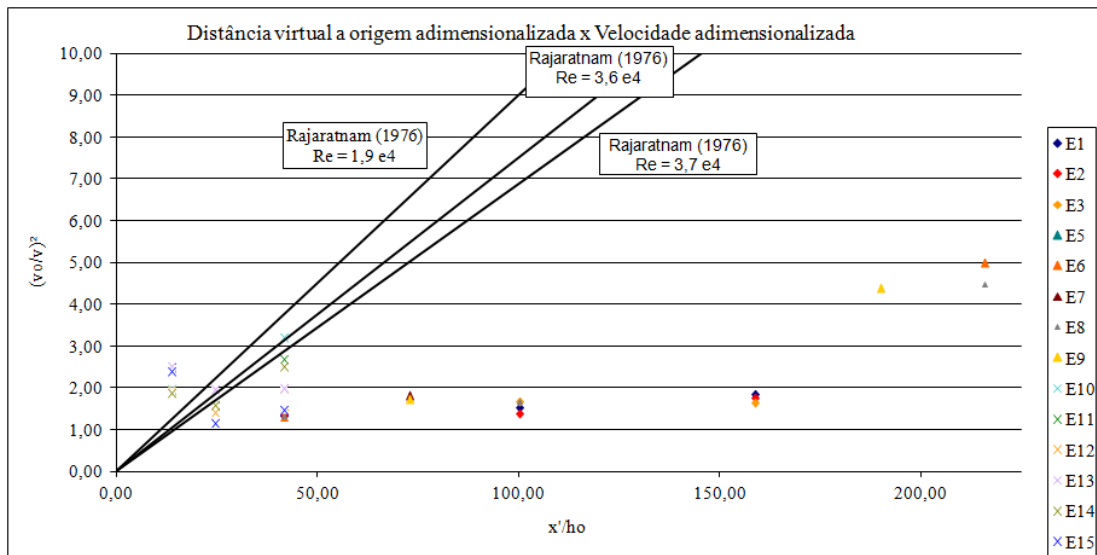
**Figura 6.6: Variação da velocidade média de avanço da corrente, no eixo do canal, para os ensaios.**

Expressando a velocidade de forma adimensionalizada (relação entre a velocidade média temporal e a velocidade máxima no perfil central do difusor) e comparando com a lei de variação das velocidades em jato de parede (Rajaratnam, 1976), nota-se que a tendência de redução da velocidade apresentada pela corrente de turbidez não segue a tendência dos jatos. A relação entre a razão  $v/v_o$  e a razão  $x/h_o$ , e a expressão que descreve o comportamento dos jatos de parede  $v/v_o = 3,5 \cdot (\sqrt{x/h_o})^{-1}$  para  $x/h_o > 12,25$  e valor tendendo a 1 quando  $x/h_o < 12,25$ , são apresentadas na figura 6.7. O decaimento da velocidade, nas correntes de turbidez, é mais suave do que o apresentado pelos jatos, sendo que ele não é bem definido na parte inicial do fluxo.



**Figura 6.7: Relação da distância adimensionalizada e velocidade adimensionalizada comparada com a de Rajaratnam (1976).**

A diferença de comportamento entre as correntes de turbidez e os jatos de parede fica ainda mais evidenciada se o quadrado da velocidade adimensionalizada é expresso com relação à origem virtual do jato (figura 20). Rajaratnam (1976) registra que, para os jatos, há uma relação linear entre as razões  $(v_o/v)^2$  e  $x'/h_o$  (onde  $x'$  é a distância da origem virtual do jato), sendo o ângulo de inclinação da reta de tendência variável segundo o número de Reynolds do escoamento. Contudo, conforme graficado na figura 6.8, observa-se que as tendências das medidas nas correntes hiperpicnais não apresentaram um comportamento linear, como ocorre no caso de jatos. Além disso, vale destacar que, seguindo a tendência das curvas apresentadas por Rajaratnam (1976), os pontos dos ensaios E<sub>10</sub> a E<sub>15</sub>, os quais tiveram os seus números de Reynolds calculados em cada seção, estaria localizada em uma região onde o número seria maior que 37000. Em todos os casos, o número de Reynolds foi menor do que 36000, como apresentado na curva central.



**Figura 6.8: Relação da distância virtual a origem adimensionalizada e velocidade adimensionalizada comparada com a de Rajaratnam (1976).**

### 6.2.2.3. Fluxos

Três fluxos principais caracterizam jatos e plumas, quais sejam, fluxo de massa (Q), fluxo de quantidade de movimento (M) e fluxo oriundo da diferença de massas específicas (B). A tabela 6.9 apresenta os fluxos iniciais dos ensaios, enquanto a tabela 6.10, 6.11, 6.12 e 6.13 apresenta os fluxos locais avaliados nos 15 segundos iniciais da passagem da corrente pela seção de medição.

**Tabela 6.9: Dados dos fluxos iniciais e distância característica.**

| Ensaio          | Q     | M                              | B                              | L <sub>Q</sub> | L <sub>m</sub> | R <sub>0</sub> |
|-----------------|-------|--------------------------------|--------------------------------|----------------|----------------|----------------|
|                 | l/min | m <sup>4</sup> /s <sup>2</sup> | m <sup>4</sup> /s <sup>3</sup> | m              | m              | -              |
| E <sub>1</sub>  | 10    | 4,15E-05                       | 2,80E-05                       | 0,14           | 0,098          | 1,432          |
| E <sub>2</sub>  | 10    | 4,15E-05                       | 2,91E-05                       | 0,14           | 0,096          | 1,462          |
| E <sub>3</sub>  | 10    | 4,15E-05                       | 2,98E-05                       | 0,14           | 0,095          | 1,478          |
| E <sub>4</sub>  | 10    | 4,15E-05                       | 1,71E-05                       | 0,14           | 0,125          | 1,119          |
| E <sub>5</sub>  | 10    | 2,21E-05                       | 1,48E-05                       | 0,14           | 0,084          | 1,672          |
| E <sub>6</sub>  | 10    | 4,15E-05                       | 2,17E-06                       | 0,14           | 0,351          | 0,399          |
| E <sub>7</sub>  | 10    | 2,21E-05                       | 4,02E-06                       | 0,14           | 0,161          | 0,870          |
| E <sub>8</sub>  | 10    | 4,15E-05                       | 1,47E-05                       | 0,14           | 0,135          | 1,040          |
| E <sub>9</sub>  | 10    | 2,21E-05                       | 1,56E-05                       | 0,14           | 0,082          | 1,718          |
| E <sub>10</sub> | 9     | 4,15E-05                       | 7,93E-06                       | 0,14           | 0,184          | 0,763          |
| E <sub>11</sub> | 10    | 4,15E-05                       | 9,30E-06                       | 0,14           | 0,169          | 0,826          |
| E <sub>12</sub> | 6     | 1,76E-05                       | 5,13E-06                       | 0,14           | 0,120          | 1,164          |
| E <sub>13</sub> | 14    | 7,06E-05                       | 1,23E-05                       | 0,14           | 0,219          | 0,638          |
| E <sub>14</sub> | 10    | 4,15E-05                       | 3,11E-06                       | 0,14           | 0,293          | 0,478          |
| E <sub>15</sub> | 10    | 4,15E-05                       | 1,75E-05                       | 0,14           | 0,124          | 1,132          |

**Tabela 6.10: Fluxos locais, com ambiente constituído por água pura na região distal do canal.**

| Série            | Ensaio         | x              | Tempo | v     | ρ <sub>0</sub>    | ρ <sub>m</sub>    | h        | q                 | m                              | β                              | ζ        | ψ        |      |      |
|------------------|----------------|----------------|-------|-------|-------------------|-------------------|----------|-------------------|--------------------------------|--------------------------------|----------|----------|------|------|
|                  |                | cm             | s     | m/s   | kg/m <sup>3</sup> | kg/m <sup>3</sup> | cm       | m <sup>3</sup> /s | m <sup>4</sup> /s <sup>2</sup> | m <sup>4</sup> /s <sup>3</sup> | -        | -        |      |      |
| Água Pura Distal | E <sub>1</sub> | 110            | 24    | 0,065 | 1013,33           | SEM MEDIDA        | 2,5      | 32,4E-05          | 2,09E-05                       | SEM MEDIDA                     | 2,37     | 2,11     |      |      |
|                  |                |                | 29    | 0,067 |                   |                   | 3,2      | 43,1E-05          | 2,90E-05                       |                                | 2,67     | 2,99     |      |      |
|                  |                |                | 34    | 0,071 |                   |                   | 4,5      | 63,9E-05          | 4,53E-05                       |                                | 3,15     | 4,81     |      |      |
|                  |                | 315            | 67    | 0,054 |                   |                   | 3,0      | 32,4E-05          | 1,75E-05                       |                                | 5,41     | 1,89     |      |      |
|                  |                |                | 72    | 0,059 |                   |                   | 5,0      | 59,0E-05          | 3,48E-05                       |                                | 7,01     | 3,92     |      |      |
|                  |                |                | 77    | 0,062 |                   |                   | 5,0      | 62,3E-05          | 3,88E-05                       |                                | 7,62     | 4,32     |      |      |
|                  |                | 520            | 117   | 0,048 |                   |                   | 5,0      | 47,8E-05          | 2,28E-05                       |                                | 8,44     | 2,71     |      |      |
|                  |                |                | 122   | 0,049 |                   |                   | 5,0      | 49,4E-05          | 2,44E-05                       |                                | 8,87     | 2,87     |      |      |
|                  |                |                | 127   | 0,050 |                   |                   | 5,0      | 50,4E-05          | 2,54E-05                       |                                | 9,15     | 2,98     |      |      |
|                  |                | E <sub>2</sub> | 110   | 27    |                   |                   | 0,059    | 1014,07           | 5,0                            |                                | 58,6E-05 | 3,43E-05 | 2,42 | 3,87 |
|                  |                |                |       | 32    |                   |                   | 0,064    |                   | 5,0                            |                                | 63,6E-05 | 4,05E-05 | 2,74 | 4,48 |
|                  |                |                |       | 37    |                   |                   | 0,078    |                   | 5,0                            |                                | 77,7E-05 | 6,04E-05 | 3,70 | 6,35 |
|                  | 315            |                | 77    | 0,064 | 4,5               |                   | 57,7E-05 |                   | 3,70E-05                       |                                | 7,74     | 4,03     |      |      |
|                  |                |                | 82    | 0,067 | 6,3               |                   | 83,8E-05 |                   | 5,58E-05                       |                                | 8,90     | 6,28     |      |      |
|                  |                |                | 87    | 0,064 | 6,8               |                   | 86,8E-05 |                   | 5,54E-05                       |                                | 8,53     | 6,36     |      |      |
|                  | 520            |                | 124   | 0,053 | 4,3               |                   | 46,0E-05 |                   | 2,46E-05                       |                                | 9,62     | 2,78     |      |      |
|                  |                |                | 129   | 0,052 | 7,5               |                   | 77,6E-05 |                   | 4,02E-05                       |                                | 10,53    | 4,92     |      |      |
|                  |                |                | 134   | 0,050 | 6,2               |                   | 62,3E-05 |                   | 3,13E-05                       |                                | 9,61     | 3,78     |      |      |
|                  | E <sub>3</sub> |                | 110   | 26    | 0,057             |                   | 1014,48  |                   | 6,0                            |                                | 68,8E-05 | 3,95E-05 | 2,46 | 4,58 |
|                  |                |                |       | 31    | 0,061             |                   |          |                   | 6,0                            |                                | 72,6E-05 | 4,40E-05 | 2,67 | 5,04 |
|                  |                |                |       | 36    | 0,066             |                   |          |                   | 6,0                            |                                | 79,1E-05 | 5,21E-05 | 3,03 | 5,84 |
|                  |                | 315            | 72    | 0,046 | 5,5               |                   |          | 51,1E-05          | 2,37E-05                       |                                | 5,01     | 2,87     |      |      |
|                  |                |                | 77    | 0,058 | 7,0               |                   |          | 81,1E-05          | 4,69E-05                       |                                | 7,42     | 5,54     |      |      |
|                  |                |                | 82    | 0,059 | 6,5               |                   |          | 76,4E-05          | 4,48E-05                       |                                | 7,44     | 5,23     |      |      |
|                  |                | 520            | 126   | 0,057 | 5,0               |                   |          | 56,6E-05          | 3,20E-05                       |                                | 10,87    | 3,64     |      |      |
|                  |                |                | 131   | 0,055 | 7,0               |                   |          | 76,6E-05          | 4,19E-05                       |                                | 11,25    | 5,02     |      |      |
|                  |                |                | 136   | 0,052 | 7,0               |                   |          | 73,3E-05          | 3,83E-05                       |                                | 10,53    | 4,64     |      |      |

**Tabela 6.11: Fluxos locais, com ambiente salino na distal do canal.**

| Série         | Ensaio         | x          | Tempo | v     | $\rho_o$          | $\rho_m$          | h        | q                 | m                              | $\beta$                        | $\zeta$  | $\psi$ |
|---------------|----------------|------------|-------|-------|-------------------|-------------------|----------|-------------------|--------------------------------|--------------------------------|----------|--------|
|               |                | cm         | s     | m/s   | kg/m <sup>3</sup> | kg/m <sup>3</sup> | cm       | m <sup>3</sup> /s | m <sup>4</sup> /s <sup>2</sup> | m <sup>4</sup> /s <sup>3</sup> | -        | -      |
| Salino Distal | E <sub>4</sub> | SEM MEDIDA |       |       |                   |                   |          |                   |                                |                                |          |        |
|               | E <sub>5</sub> | 720        | 670   | 0,026 | 1014,79           | SEM MEDIDA        | 3,0      | 15,7E-05          | 0,41E-06                       | SEM MEDIDA                     | 6,70     | 0,68   |
|               |                |            | 675   | 0,025 |                   |                   | 3,0      | 15,2E-05          | 0,39E-05                       |                                | 6,38     | 0,64   |
|               |                |            | 680   | 0,025 |                   |                   | 3,2      | 15,7E-05          | 0,39E-05                       |                                | 6,18     | 0,65   |
|               | E <sub>6</sub> | 110        | 45    | 0,068 | 1025,36           |                   | 3,5      | 47,7E-05          | 3,26E-05                       |                                | 2,79     | 3,38   |
|               |                |            | 50    | 0,069 |                   |                   | 4,8      | 66,6E-05          | 4,61E-05                       |                                | 3,09     | 4,97   |
|               |                |            | 55    | 0,069 |                   |                   | 5,5      | 76,3E-05          | 5,29E-05                       |                                | 3,20     | 5,80   |
|               |                | 720        | 832   | 0,017 |                   |                   | 4,5      | 15,4E-05          | 0,26E-05                       |                                | 2,44     | 0,40   |
|               |                |            | 837   | 0,018 |                   |                   | 5,2      | 19,1E-05          | 0,35E-05                       |                                | 2,81     | 0,53   |
|               |                |            | 842   | 0,020 |                   |                   | 5,2      | 20,5E-05          | 0,40E-05                       |                                | 3,12     | 0,60   |
|               | E <sub>7</sub> | 110        | 54    | 0,054 | 1021,49           |                   | 5,0      | 54,5E-05          | 2,97E-05                       |                                | 3,48     | 4,32   |
|               |                |            | 59    | 0,049 |                   |                   | 7,0      | 69,0E-05          | 3,40E-05                       |                                | 3,26     | 5,30   |
|               |                |            | 64    | 0,052 |                   |                   | 7,1      | 73,5E-05          | 3,81E-05                       |                                | 3,52     | 5,86   |
|               | E <sub>8</sub> | 110        | 42    | 0,066 | 1033,31           |                   | 3,5      | 46,0E-05          | 3,03E-05                       |                                | 2,64     | 3,18   |
|               |                |            | 47    | 0,066 |                   |                   | 5,0      | 66,4E-05          | 4,41E-05                       |                                | 2,92     | 4,82   |
|               |                |            | 52    | 0,070 |                   |                   | 5,0      | 70,4E-05          | 4,96E-05                       |                                | 3,19     | 5,35   |
|               |                | 315        | 132   | 0,052 |                   |                   | 5,0      | 52,0E-05          | 2,71E-05                       |                                | 5,81     | 3,15   |
|               |                |            | 137   | 0,054 |                   |                   | 5,0      | 53,9E-05          | 2,91E-05                       |                                | 6,13     | 3,35   |
|               |                |            | 142   | 0,056 |                   |                   | 5,0      | 56,4E-05          | 3,18E-05                       |                                | 6,55     | 3,62   |
|               |                | 720        | 796   | 0,020 |                   |                   | 2,5      | 10,1E-05          | 0,20E-05                       |                                | 2,71     | 0,28   |
|               |                |            | 801   | 0,021 |                   |                   | 3,0      | 12,4E-05          | 0,26E-05                       |                                | 2,94     | 0,35   |
|               |                |            | 806   | 0,020 |                   |                   | 3,0      | 12,1E-05          | 0,25E-05                       |                                | 2,84     | 0,34   |
|               |                |            |       | 3,0   |                   |                   | 28,9E-05 | 1,39E-05          | 2,55                           |                                | 1,96     |        |
|               | E <sub>9</sub> | 110        | 45    | 0,048 | 1033,90           |                   | 4,2      | 47,0E-05          | 2,63E-05                       |                                | 3,48     | 3,72   |
|               |                |            | 50    | 0,056 |                   |                   | 5,0      | 57,8E-05          | 3,34E-05                       |                                | 3,81     | 4,79   |
|               |                |            | 55    | 0,058 |                   |                   | 5,0      | 57,8E-05          | 3,34E-05                       |                                | 3,81     | 4,79   |
|               |                | 315        | 160   | 0,020 |                   |                   | 2,3      | 9,26E-05          | 0,19E-05                       |                                | 1,85     | 0,32   |
|               |                |            | 165   | 0,029 |                   |                   | 5,0      | 29,4E-05          | 0,87E-05                       |                                | 3,96     | 1,47   |
|               |                |            | 170   | 0,015 |                   |                   | 4,8      | 14,5E-05          | 0,22E-05                       |                                | 1,43     | 0,43   |
|               |                | 520        | 556   | 0,043 |                   |                   | 3,0      | 25,6E-05          | 1,10E-05                       |                                | 10,08    | 1,59   |
|               |                |            | 561   | 0,040 |                   |                   | 3,0      | 23,7E-05          | 94E-05                         |                                | 8,97     | 1,39   |
|               |                |            | 566   | 0,039 |                   |                   | 4,0      | 31,4E-05          | 1,23E-05                       |                                | 9,51     | 1,89   |
|               |                |            | 1146  | 0,022 |                   |                   | 2,5      | 10,9E-05          | 0,24E-05                       |                                | 4,84     | 0,40   |
|               |                |            | 720   | 1151  |                   |                   | 0,021    | 3,0               | 12,5E-05                       |                                | 0,26E-05 | 4,75   |
|               |                | 1156       |       | 0,023 |                   |                   | 3,0      | 13,7E-05          | 0,31E-05                       |                                | 5,42     | 0,53   |



**Tabela 6.12: Fluxos locais, com ambiente salino na região proximal do canal ( $\rho_a = 1024$  kg/m<sup>3</sup>).**

| Série           | Ensaio          | x    | Tempo | v     | $\rho_o$          | $\rho_m$          | h   | q                 | m                              | $\beta$                        | $\zeta$ | $\psi$ |
|-----------------|-----------------|------|-------|-------|-------------------|-------------------|-----|-------------------|--------------------------------|--------------------------------|---------|--------|
|                 |                 | cm   | s     | m/s   | kg/m <sup>3</sup> | kg/m <sup>3</sup> | cm  | m <sup>3</sup> /s | m <sup>4</sup> /s <sup>2</sup> | m <sup>4</sup> /s <sup>3</sup> | -       | -      |
| Salino Proximal | E <sub>10</sub> | 12,5 | 1     | 0,046 | 1029,55           | 1037,64           | 4,0 | 36,9E-05          | 1,70E-05                       | 4,82E-05                       | 0,18    | 2,20   |
|                 |                 |      | 6     | 0,034 |                   | 1036,30           | 3,1 | 21,2E-05          | 0,73E-05                       | 2,50E-05                       | 0,11    | 0,98   |
|                 |                 |      | 11    | 0,059 |                   | 1039,25           | 3,0 | 35,2E-05          | 2,06E-05                       | 5,14E-05                       | 0,24    | 2,43   |
|                 |                 | 50   | 7     | 0,054 |                   | 1032,91           | 3,5 | 38,1E-05          | 2,07E-05                       | 3,25E-05                       | 0,90    | 2,53   |
|                 |                 |      | 12    | 0,058 |                   | 1032,29           | 4,5 | 52,5E-05          | 3,06E-05                       | 4,17E-05                       | 1,07    | 3,79   |
|                 |                 |      | 17    | 0,058 |                   | 1034,89           | 4,0 | 46,7E-05          | 2,73E-05                       | 4,87E-05                       | 1,04    | 3,33   |
|                 |                 | 110  | 17    | 0,036 |                   | 1040,56           | 3,5 | 25,4E-05          | 0,93E-05                       | 4,03E-05                       | 1,08    | 1,25   |
|                 |                 |      | 22    | 0,034 |                   | 1032,32           | 4,5 | 30,7E-05          | 1,05E-05                       | 2,45E-05                       | 1,05    | 1,48   |
|                 |                 |      | 27    | 0,015 |                   | 1037,70           | 6,5 | 19,8E-05          | 0,30E-05                       | 2,59E-05                       | 0,34    | 0,55   |
|                 | E <sub>11</sub> | 12,5 | 4     | 0,031 | 1029,86           | 1017,99           | 3,0 | 18,5E-05          | 0,57E-05                       | 1,07E-05                       | 0,09    | 0,71   |
|                 |                 |      | 9     | 0,038 |                   | 1031,77           | 4,0 | 30,0E-05          | 1,13E-05                       | 2,23E-05                       | 0,13    | 1,38   |
|                 |                 |      | 14    | 0,042 |                   | 1033,79           | 3,0 | 24,9E-05          | 1,04E-05                       | 2,34E-05                       | 0,14    | 1,20   |
|                 |                 | 50   | 12    | 0,054 |                   | 1025,57           | 4,0 | 43,4E-05          | 2,36E-05                       | 0,66E-05                       | 0,93    | 2,64   |
|                 |                 |      | 17    | 0,058 |                   | 1027,91           | 4,5 | 52,5E-05          | 3,06E-05                       | 1,96E-05                       | 1,07    | 3,41   |
|                 |                 |      | 22    | 0,063 |                   | 1028,74           | 4,5 | 56,7E-05          | 3,57E-05                       | 2,58E-05                       | 1,20    | 3,91   |
|                 |                 | 110  | 23    | 0,033 |                   | 1026,48           | 3,0 | 19,7E-05          | 0,65E-05                       | 0,47E-05                       | 0,90    | 0,79   |
|                 |                 |      | 28    | 0,035 |                   | 1023,65           | 5,0 | 34,6E-05          | 1,20E-05                       | 0,12E-05                       | 1,10    | 1,54   |
|                 |                 |      | 33    | 0,035 |                   | 1028,80           | 5,0 | 35,2E-05          | 1,24E-05                       | 1,62E-05                       | 1,13    | 1,59   |
|                 | E <sub>12</sub> | 12,5 | 7     | 0,028 | 1029,38           | 1033,59           | 2,5 | 13,8E-05          | 0,38E-05                       | 1,27E-05                       | 0,14    | 1,10   |
|                 |                 |      | 12    | 0,014 |                   | 1030,69           | 3,5 | 10,1E-05          | 0,15E-05                       | 0,65E-05                       | 0,06    | 0,51   |
|                 |                 |      | 17    | 0,051 |                   | 1025,41           | 3,5 | 35,4E-05          | 1,79E-05                       | 0,48E-05                       | 0,38    | 4,60   |
|                 |                 | 50   | 19    | 0,036 |                   | 1040,72           | 4,0 | 28,5E-05          | 1,02E-05                       | 4,57E-05                       | 0,94    | 2,90   |
|                 |                 |      | 24    | 0,053 |                   | 1030,68           | 5,5 | 58,2E-05          | 3,08E-05                       | 3,72E-05                       | 1,84    | 8,29   |
|                 |                 |      | 29    | 0,036 |                   | 1018,75           | 6,5 | 47,0E-05          | 1,70E-05                       | 2,36E-05                       | 1,08    | 5,14   |
|                 |                 | 110  | 33    | 0,037 |                   | 1035,11           | 3,0 | 22,4E-05          | 0,84E-05                       | 2,39E-05                       | 2,07    | 2,28   |
|                 |                 |      | 38    | 0,029 |                   | 1029,76           | 5,5 | 31,7E-05          | 0,91E-05                       | 1,75E-05                       | 1,63    | 2,86   |
|                 |                 |      | 43    | 0,024 |                   | 1016,39           | 7,0 | 33,1E-05          | 0,79E-05                       | 2,41E-05                       | 1,29    | 2,66   |
|                 | E <sub>13</sub> | 12,5 | 2     | 0,047 | 1029,54           | 1035,75           | 3,0 | 28,3E-05          | 1,33E-05                       | 3,18E-05                       | 0,12    | 0,87   |
|                 |                 |      | 7     | 0,053 |                   | 1043,52           | 5,2 | 54,8E-05          | 2,89E-05                       | 10,2E-05                       | 0,16    | 1,97   |
|                 |                 |      | 12    | 0,043 |                   | 1018,99           | 4,4 | 37,7E-05          | 1,62E-05                       | 1,81E-05                       | 0,11    | 1,14   |
|                 |                 | 50   | 11    | 0,041 |                   | S/<br>MEDIDA      | 3,5 | 28,7E-05          | 1,17E-05                       | S/<br>MEDIDA                   | 0,40    | 0,81   |
|                 |                 |      | 16    | 0,073 |                   | 1039,15           | 6,5 | 94,5E-05          | 6,87E-05                       | 13,7E-05                       | 1,09    | 4,45   |
|                 |                 |      | 21    | 0,068 |                   | 1034,68           | 6,0 | 82,1E-05          | 5,62E-05                       | 8,40E-05                       | 0,98    | 3,65   |
|                 |                 | 110  | 20    | 0,053 |                   | 1028,14           | 3,0 | 32,0E-05          | 1,71E-05                       | 1,27E-05                       | 1,24    | 1,08   |
|                 |                 |      | 25    | 0,065 |                   | 1031,70           | 6,0 | 77,7E-05          | 5,04E-05                       | 5,73E-05                       | 1,98    | 3,32   |
|                 |                 |      | 30    | 0,060 |                   | 1002,94           | 8,0 | 95,6E-05          | 5,71E-05                       | 19,3E-05                       | 1,88    | 3,98   |

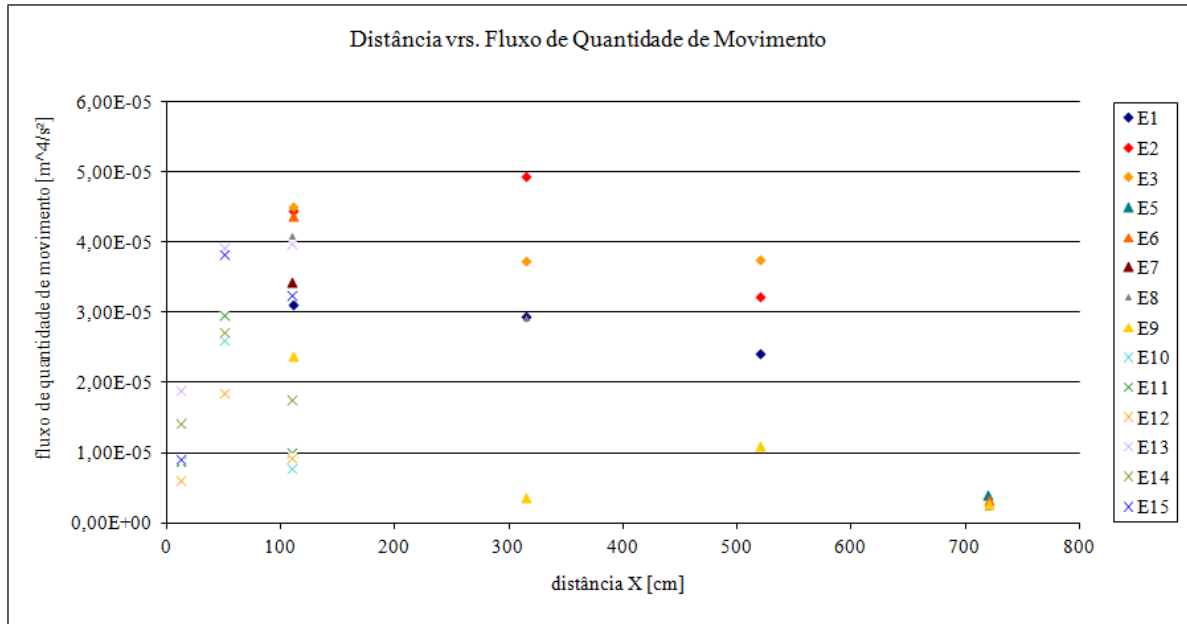
**Tabela 6.13: Fluxos locais, com ambiente salino na região proximal do canal ( $\rho_a \sim 1010$  kg/m<sup>3</sup>).**

| Série           | Ensaio          | x    | Tempo | v     | $\rho_o$          | $\rho_m$          | h    | q                 | m                              | $\beta$                        | $\zeta$ | $\psi$ |
|-----------------|-----------------|------|-------|-------|-------------------|-------------------|------|-------------------|--------------------------------|--------------------------------|---------|--------|
|                 |                 | cm   | s     | m/s   | kg/m <sup>3</sup> | kg/m <sup>3</sup> | cm   | m <sup>3</sup> /s | m <sup>4</sup> /s <sup>2</sup> | m <sup>4</sup> /s <sup>3</sup> | -       | -      |
| Salino Proximal | E <sub>14</sub> | 12,5 | 3     | 0,043 | 1012,93           | 1011,08           | 3,0  | 25,7E-05          | 1,10E-05                       | 0,02E-05                       | 0,15    | 1,26   |
|                 |                 |      | 8     | 0,051 |                   | 1014,31           | 3,0  | 30,4E-05          | 1,54E-05                       | 0,97E-05                       | 0,19    | 1,69   |
|                 |                 |      | 13    | 0,052 |                   | 1023,11           | 3,1  | 32,3E-05          | 1,68E-05                       | 3,79E-05                       | 0,21    | 1,84   |
|                 |                 | 50   | 10    | 0,050 |                   | 1020,72           | 4,0  | 40,4E-05          | 2,04E-05                       | 3,81E-05                       | 0,83    | 2,32   |
|                 |                 |      | 15    | 0,060 |                   | 1013,24           | 4,2  | 50,7E-05          | 3,06E-05                       | 1,10E-05                       | 1,10    | 3,35   |
|                 |                 |      | 20    | 0,062 |                   | 1020,10           | 4,0  | 50,0E-05          | 3,12E-05                       | 4,41E-05                       | 1,15    | 3,37   |
|                 |                 | 110  | 27    | 0,042 |                   | 1019,41           | 3,8  | 32,0E-05          | 1,34E-05                       | 2,61E-05                       | 1,38    | 1,59   |
|                 |                 |      | 32    | 0,032 |                   | 1013,97           | 6,0  | 37,9E-05          | 1,20E-05                       | 1,09E-05                       | 1,00    | 1,61   |
|                 |                 |      | 37    | 0,036 |                   | 1010,23           | 10,0 | 72,3E-05          | 2,61E-05                       | 0,54E-05                       | 1,40    | 3,63   |
|                 | E <sub>15</sub> | 12,5 | 2     | 0,034 | 1020,91           | 1017,68           | 3,5  | 23,8E-05          | 0,81E-05                       | 1,78E-05                       | 0,11    | 1,00   |
|                 |                 |      | 7     | 0,037 |                   | 1018,45           | 3,0  | 22,0E-05          | 0,81E-05                       | 1,80E-05                       | 0,12    | 0,96   |
|                 |                 |      | 12    | 0,043 |                   | 1020,50           | 3,0  | 26,1E-05          | 1,13E-05                       | 2,66E-05                       | 0,16    | 1,29   |
|                 |                 | 50   | 10    | 0,062 |                   | 1017,95           | 3,0  | 37,4E-05          | 2,33E-05                       | 2,89E-05                       | 1,07    | 2,43   |
|                 |                 |      | 15    | 0,086 |                   | 1020,67           | 3,5  | 60,0E-05          | 5,14E-05                       | 6,22E-05                       | 1,78    | 5,05   |
|                 |                 |      | 20    | 0,083 |                   | 1016,29           | 3,2  | 53,1E-05          | 4,40E-05                       | 3,24E-05                       | 1,66    | 4,31   |
|                 |                 | 110  | 25    | 0,059 |                   | 1017,54           | 3,0  | 35,6E-05          | 2,11E-05                       | 2,61E-05                       | 2,17    | 2,23   |
|                 |                 |      | 30    | 0,071 |                   | 1015,37           | 4,0  | 56,7E-05          | 4,01E-05                       | 2,95E-05                       | 3,05    | 4,20   |
|                 |                 |      | 35    | 0,054 |                   | 1020,20           | 6,0  | 64,8E-05          | 3,50E-05                       | 6,41E-05                       | 2,24    | 4,12   |

#### a) Fluxo de Quantidade de Movimento

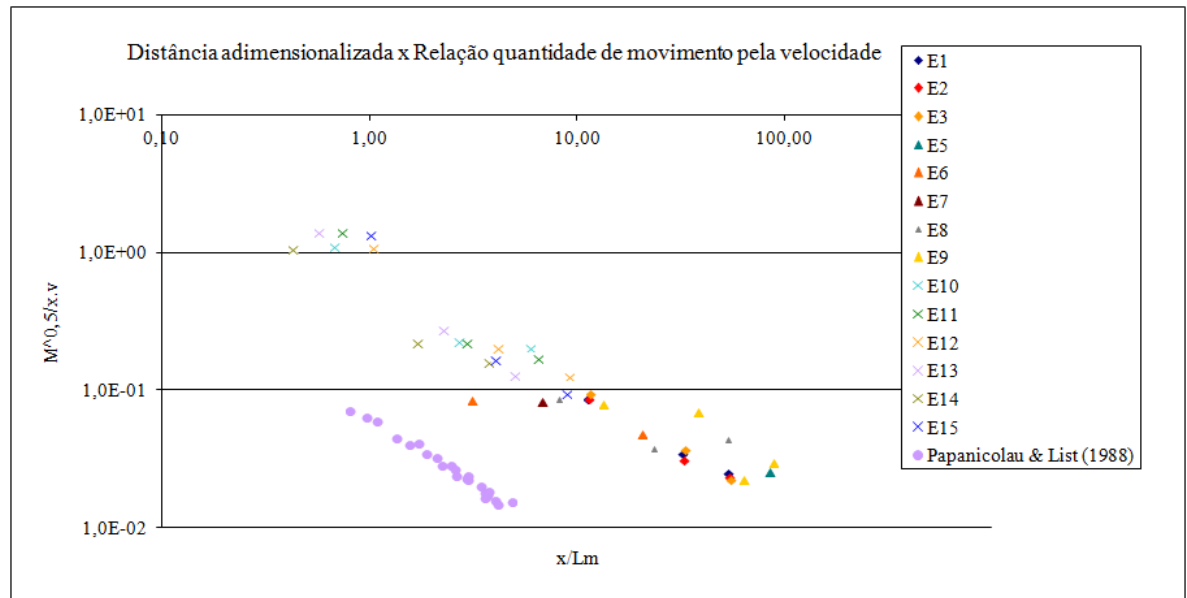
A figura 6.9 apresenta a variação da quantidade de movimento ao longo do canal. Nota-se que próximo ao difusor há um aumento da quantidade de movimento, até uma distância de cerca de 110 cm, após a qual ocorre sua diminuição. O ganho de quantidade de movimento, até esse ponto, se explica pelo aumento da espessura da corrente, conforme se observa na figura 6.4. Nota-se, também, que não há uma tendência clara de redução da quantidade de movimento, a partir dessa distância.

No que se refere à análise em função dos fluxos iniciais, a figura 3.18 mostra o gráfico de  $x/L_m$  em função de  $M^{1/2}/x.v$  apresentado por Papanicolaou & List (1988), a partir da qual foi definida a relação  $M^{1/2}/x.v = 0,26.(x/L_m)^{-2/3}$ , para  $x/L_m > 5$ . Tomando os dados obtidos, graficou-se a figura 6.10, a qual apresenta os dados do trabalho de Papanicolaou & List (1988) e do presente trabalho para  $x/L_m > 5$ .



**Figura 6.9:** Variação do fluxo da quantidade de movimento, no eixo do canal, para os ensaios.

Observando a figura 6.10, nota-se que há uma relação de decaimento entre as variáveis semelhante à encontrada por Papanicolaou & List (1988), contudo, em uma ordem de grandeza distinta, sugerindo que as correntes simuladas tiveram uma quantidade de movimento inicial maior do que no caso dos jatos.



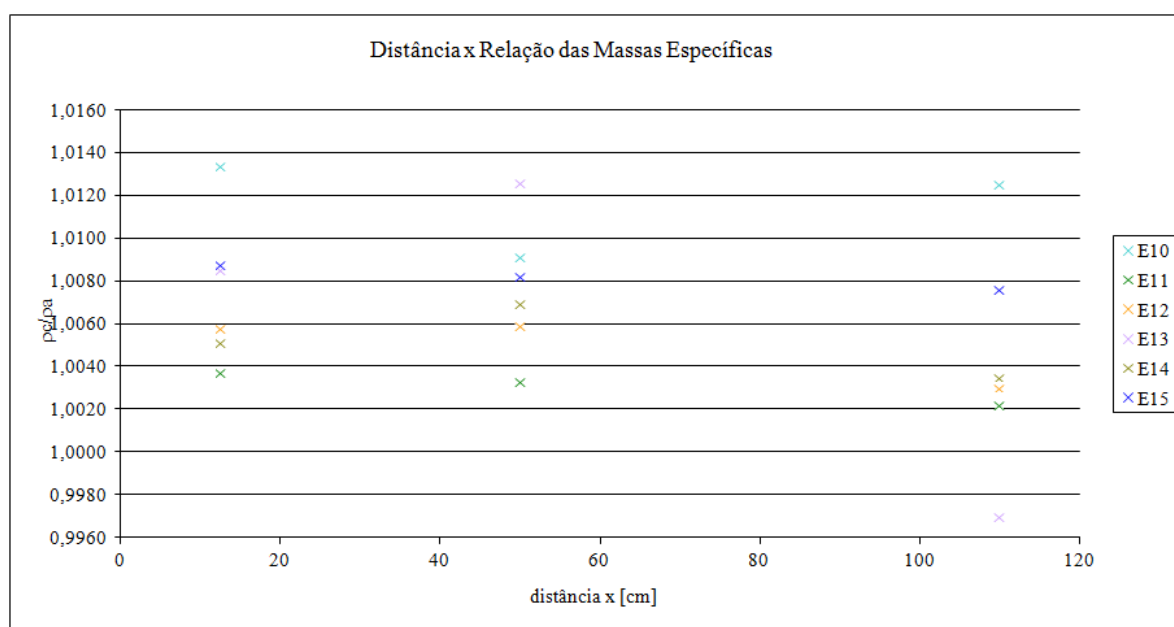
**Figura 6.10:** Distância adimensionalizada e relação da quantidade de movimento pela velocidade comparada com a de Papanicolaou & List (1988).

## b) Fluxo de Flutuabilidade (Buoyancy Flux)

O fluxo oriundo da diferença de massa específica entre o fluido que compõe a corrente e o fluido ambiente, também chamado de fluxo de flutuabilidade, exige a avaliação da concentração de sedimentos presente na corrente.

Conforme apresentado no item 5.2.1 da metodologia, através do sifonamento de amostras quando da passagem da corrente, pôde-se avaliar a concentração de sedimentos ao longo do canal. Esta operação foi realizada para os ensaios E10 a E15. Após o tratamento das amostras coletadas, pôde-se determinar a concentração volumétrica local e estimar a massa específica da mistura cujos valores estão apresentados nas tabelas 6.10, 6.11, 6.12 e 6.13.

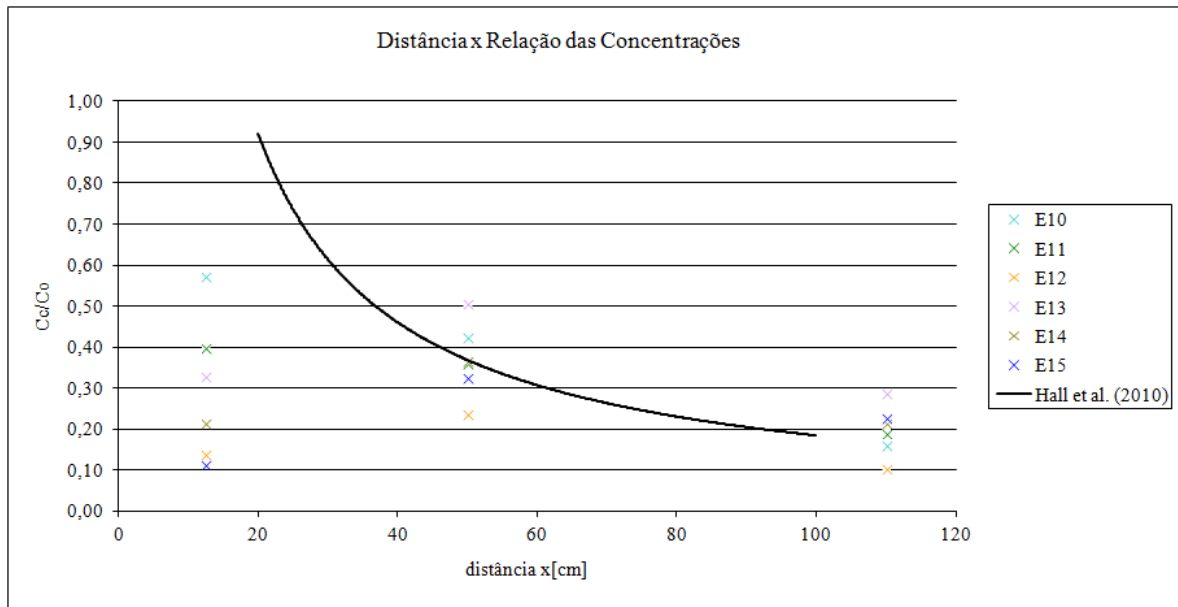
A figura 6.11 apresenta a variação da massa específica do fluido na corrente do fluxo junto ao centro do canal.



**Figura 6.11: Variação da massa específica, no eixo do canal, para os ensaios.**

Considerando que a massa específica da mistura injetada no canal, para estes ensaios, variou entre 1012,93 e 1029,86 kg/m<sup>3</sup>, percebe-se que há um aumento da massa específica do fluido na corrente. Observando a figura 6.11 nota-se que, assim que a mistura entra no meio ambiente, ela aumenta de massa específica e, à medida que a corrente avança, há uma tendência de redução da massa específica. O aumento da massa específica pode ser explicado pela incorporação de sedimentos depositados junto à saída do difusor, quando a mistura é injetada no canal e da incorporação da água com sal que constitui o fluido ambiente. Enquanto que sua diminuição pode ser explicada pela deposição de material ao longo do canal.

Relacionando as concentrações da corrente com a concentração da mistura injetada, nota-se que não há uma variação ao longo do escoamento como a apresentada por Hall et al. (2010) para o caso de jatos, onde eles definem uma expressão para o decaimento da concentração ao longo do canal, sendo dada por:  $\frac{c_c}{c_o} = \frac{5,26}{x/h_o}$  (expressão adaptada). A figura 6.12 apresenta os dados e a relação de Hall et al. (2010).

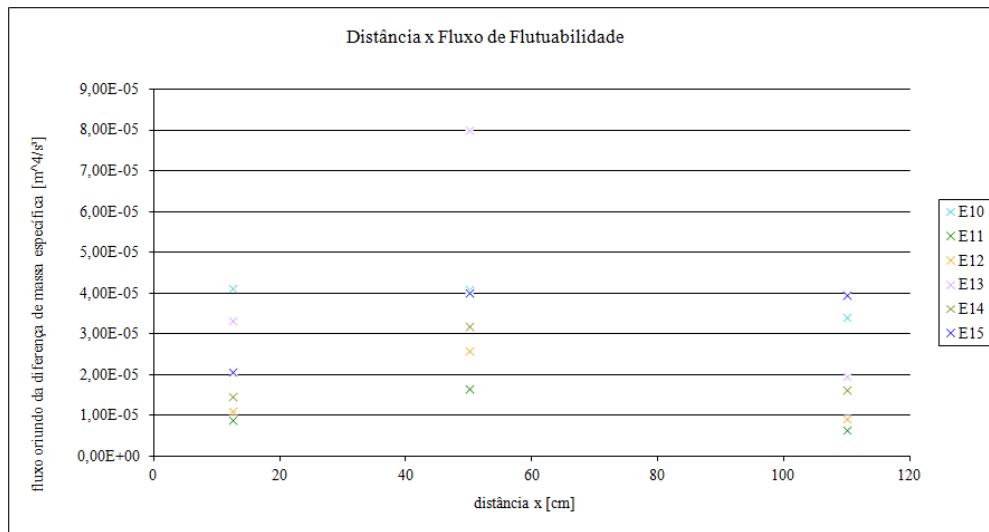


**Figura 6.12: Distância e relação das concentrações da corrente e inicial, no eixo do canal, para os ensaios.**

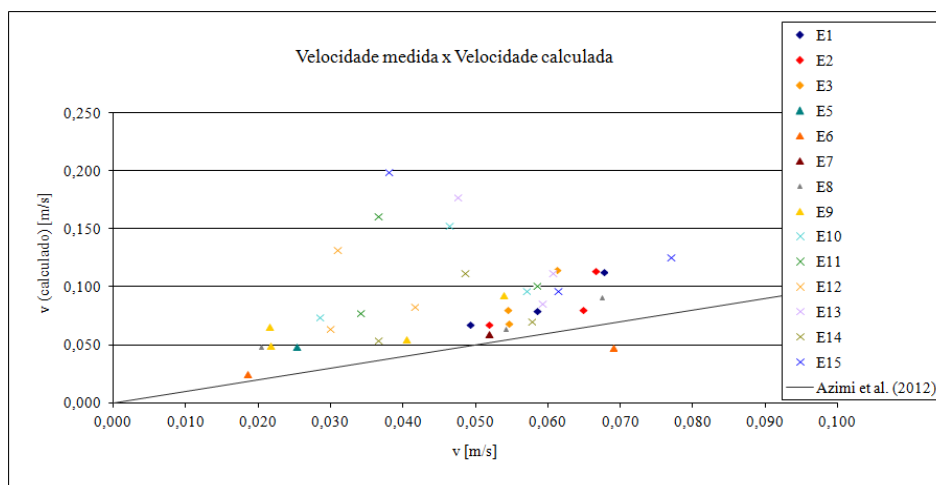
Para os ensaios onde as concentrações locais da corrente foram medidas, pode-se calcular o fluxo oriundo da variação da diferença de massa específica (equação 5.7). A figura 6.13 apresenta a variação do fluxo de fluatibilidade avaliado nas seções do canal onde foram medidas as concentrações locais. Percebe-se que há um aumento até a seção situada a 50 cm da fonte, porém, após há um decréscimo do seu valor. O aumento pode ser atribuído à incorporação do fluido ambiente, acrescentando a mistura de água e sal na matriz fluida do fluxo. Já o decaimento pode-se atribuir à deposição de material à jusante.

Azimi et al (2012), partindo de expressão proposta por Papanicolaou & List (1988), estabeleceu uma relação entre a velocidade local de jatos e o fluxo de fluatibilidade inicial, ou seja, avaliado junto ao difusor, sendo dada por:  $v = 3,85.B^{1/3}.x^{-1/3}$ . A figura 6.14 apresenta a comparação desta relação com a velocidade local média medida na corrente. Através dela nota-se que mesmo as correntes tendo uma quantidade de movimento inicial maior do que os jatos (vide figura 6.10), elas também apresentaram uma fluatibilidade inicial maior (a linha preta indica a tendência para o caso dos jatos, estimada por Azimi et al., 2012). Enquanto a

primeira situação as aproximaria dos jatos, a segunda as aproxima de plumas. Dessa forma, tal relação não pode ser conclusiva quanto ao comportamento análogo com jatos e plumas.



**Figura 6.13:** Variação do fluxo oriundo da diferença de massa específica, no eixo do canal, para os ensaios.

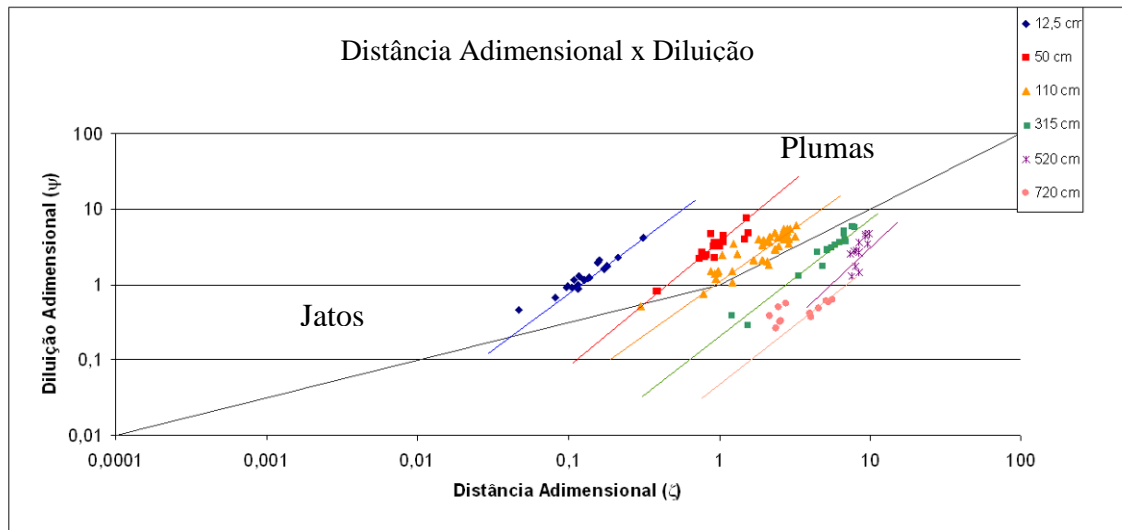


**Figura 6.14:** Relação das velocidades medidas e velocidades calculadas por  $3,85.B^{1/3}.x^{-1/3}$ .

### c) Diluição Adimensionalizada

Por último, passou-se a uma análise do comportamento dos resultados quanto à adequabilidade dos dados gerados à metodologia de Kotsovinos & List (1977), pela qual o comportamento como jatos ou plumas pode ser evidenciado através das regiões delimitadas por uma curva de tendência ajustada a dois parâmetros: a distância adimensional ( $\zeta$ ) e a diluição adimensional ( $\psi$ ). Para aplicar esta mesma análise no presente trabalho, realizou-se o processamento dos dados de velocidade e de espessura da corrente, os quais foram manuseados em termo de suas médias ao longo de três períodos de registro com duração de cinco segundos, sendo o primeiro, no intervalo 0-5 segundos após a passagem da cabeça da

corrente; o segundo, no intervalo 5-10 segundos após a passagem da cabeça da corrente; e o terceiro, no intervalo 10-15 segundos após a passagem da cabeça da corrente, conforme descrito anteriormente. As tabelas 6.10, 6.11, 6.12 e 6.13 mostram estes dados de velocidades, bem como os valores da diluição e da distância adimensionais. A figura 6.15 apresenta os dados da distância adimensional ( $\zeta$ ) em função da diluição adimensional ( $\psi$ ).



**Figura 6.15: Distância adimensional e diluição adimensional. As linhas coloridas representam as tendências de acordo com o ponto de medida.**

Muito embora alguns pontos amostrados tenham o seu resultado localizado na zona de transição entre jatos e plumas, a sua tendência (declividade da linha média) segue a mesma de plumas, demonstrando uma maior diluição adimensional. Esse comportamento linear se desloca ao longo do eixo da distância adimensionalizada, de acordo com o deslocamento da seção de análise. Contudo, se analisarmos o conjunto de todos os pontos de medida, não se reproduz o comportamento destas grandezas apresentado por Kotsovinos & List (1977), onde existe uma tendência clara e homogênea, com as regiões de jato e pluma bem discriminadas e uma independência do comportamento com a seção de medida. Em outras palavras, nas correntes simuladas neste trabalho, a consideração da diluição e da distância adimensionais não é suficiente para adimensionalizar o fenômeno.

#### **d) Comparação entre os Fluxos Locais e Iniciais**

O fluxos de quantidade de movimento podem ser mensurados através da análise das velocidades locais, enquanto que através da coleta de amostras das correntes por pipetagem, nos ensaios  $E_{10}$  a  $E_{15}$ , puderam-se calcular os valores dos fluxos oriundos da diferença de massa específica (*buoyancy flux*). Encarando que os jatos são regidos pelo fluxo de quantidade de massa específica, enquanto as plumas são regidas pelo fluxo oriundo da diferença de massa específica, realizou-se a análise apresentada nas tabelas 6.14 e 6.15.

**Tabela 6.14: Relações entre os fluxos de quantidade de movimento inicial e local.**

| Ensaio          | M        | 12,5 cm<br>( $m_1$ ) | 50 cm<br>( $m_2$ ) | 110 cm<br>( $m_3$ ) | $m_1/M$ | $m_2/M$ | $m_3/M$ |
|-----------------|----------|----------------------|--------------------|---------------------|---------|---------|---------|
| E <sub>10</sub> | 4,15E-05 | 1,50E-05             | 2,62E-05           | 0,76E-05            | 36,1%   | 63,2%   | 18,3%   |
| E <sub>11</sub> | 4,15E-05 | 0,91E-05             | 3,00E-05           | 1,03E-05            | 22,0%   | 72,3%   | 24,8%   |
| E <sub>12</sub> | 1,76E-05 | 0,77E-05             | 1,93E-05           | 0,85E-05            | 43,8%   | 109,6%  | 47,9%   |
| E <sub>13</sub> | 7,06E-05 | 1,95E-05             | 4,56E-05           | 4,15E-05            | 27,6%   | 64,6%   | 58,8%   |
| E <sub>14</sub> | 4,15E-05 | 1,44E-05             | 2,74E-05           | 1,72E-05            | 34,7%   | 66,1%   | 41,4%   |
| E <sub>15</sub> | 4,15E-05 | 0,92E-05             | 3,96E-05           | 3,21E-05            | 22,1%   | 95,5%   | 77,3%   |

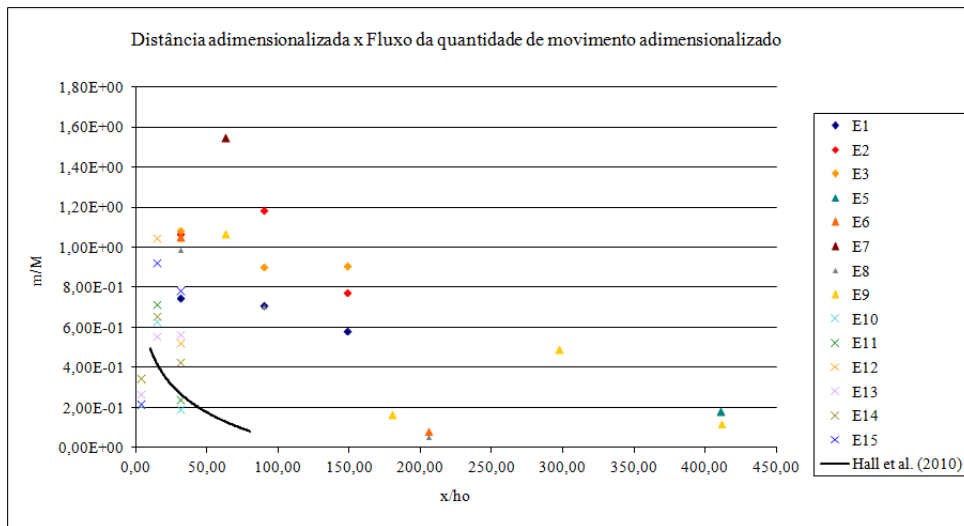
**Tabela 6.15: Relações entre os fluxos oriundos da diferença de massa específica inicial e local .**

| Ensaio          | B        | 12,5 cm<br>( $\beta_1$ ) | 50 cm ( $\beta_2$ ) | 110 cm<br>( $\beta_3$ ) | $\beta_1/B$ | $\beta_2/B$ | $\beta_3/B$ |
|-----------------|----------|--------------------------|---------------------|-------------------------|-------------|-------------|-------------|
| E <sub>10</sub> | 0,79E-05 | 4,15E-05                 | 4,10E-05            | 3,03E-05                | 523,9%      | 516,5%      | 381,5%      |
| E <sub>11</sub> | 0,93E-05 | 1,88E-05                 | 1,73E-05            | 0,73E-05                | 202,0%      | 186,2%      | 78,9%       |
| E <sub>12</sub> | 0,51E-05 | 0,80E-05                 | 3,55E-05            | 2,18E-05                | 155,8%      | 693,0%      | 426,0%      |
| E <sub>13</sub> | 1,23E-05 | 5,08E-05                 | 11,1E-05            | 8,76E-05                | 412,6%      | 898,3%      | 711,4%      |
| E <sub>14</sub> | 0,31E-05 | 1,60E-05                 | 3,11E-05            | 1,41E-05                | 512,4%      | 997,5%      | 453,9%      |
| E <sub>15</sub> | 1,75E-05 | 2,08E-05                 | 4,12E-05            | 3,99E-05                | 119,1%      | 235,7%      | 228,5%      |

Segundo Crapper (1977), jatos mantêm a sua quantidade de movimento constante em seu eixo central, enquanto plumas mantêm a sua flutuabilidade constante no mesmo eixo. Observando as medidas (tabelas 6.14 e 6.15) e as suas relações com os seus valores iniciais, nota-se que não há a conservação de nenhum dos dois fluxos, considerando os ensaios E<sub>10</sub> a E<sub>15</sub>. A quantidade de movimento cresce, inicialmente, até o ponto central (50 cm), decaindo no terceiro ponto (110 cm). Já a flutuabilidade, com exceção dos ensaios E<sub>10</sub> e E<sub>11</sub>, também apresenta uma tendência de aumento na seção situada a 50 cm da origem da corrente, seguida de decaimento. Desta forma, estes fluxos não são mantidos constantes ao longo do eixo das correntes de densidade simuladas, não sendo análogas a jatos e plumas.

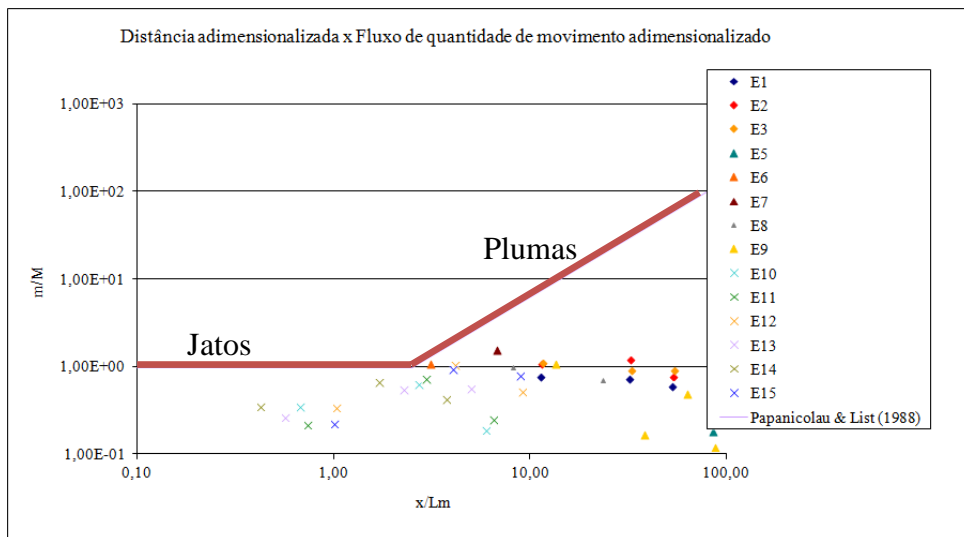
A figura 6.16 apresenta a variação da relação entre as quantidades de movimento local e inicial em função da posição no canal adimensionalizada pela altura do difusor. Nota-se uma tendência a um crescimento desta relação na região proximal e um decaimento na região mais distal, comportamento que não está conforme o comportamento dos jatos de parede identificado, na figura, pela curva de decaimento estabelecida por Hall et al. (2010).





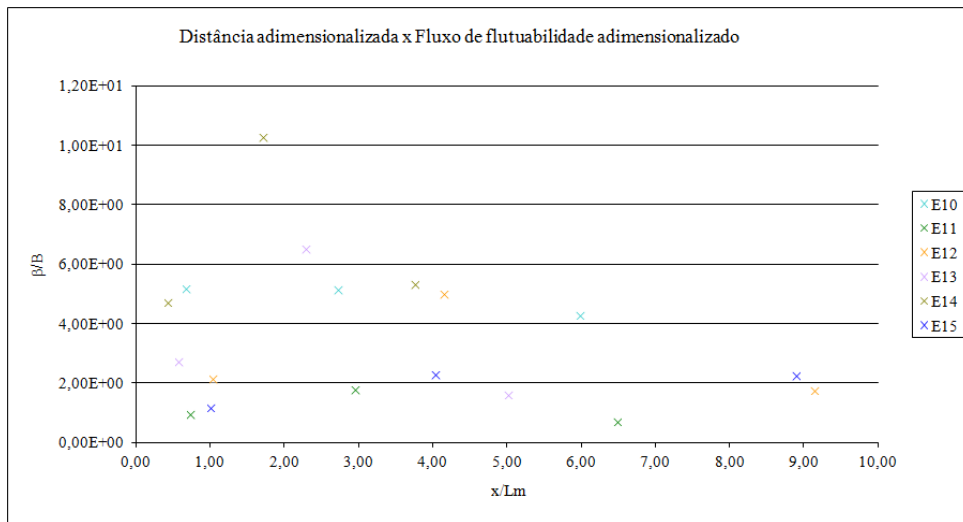
**Figura 6.16:** Distância adimensionalizada pela abertura do bocal e Fluxo da quantidade de movimento adimensionalizado.

Na figura 6.17 compara-se esta mesma relação (entre as quantidades de movimento), porém, confrontando com a distância adimensionalizada pela distância característica  $L_m$ . Com a tendência identificada por Papanicolaou & List (1988), fica evidente o comportamento distinto das correntes de turbidez em relação a jatos e plumas.



**Figura 6.17:** Distância adimensionalizada e Fluxo da quantidade de movimento adimensionalizado.

Analogamente, apresenta-se a figura 6.18, onde há a variação do fluxo de fluabilidade local ao longo do canal com relação ao fluxo de fluabilidade inicial. Nota-se que não há tendência clara de evolução da mesma ao longo do escoamento.



**Figura 6.18: Distância adimensionalizada e Fluxo de fluabilidade adimensionalizado.**

## 7. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

No que se refere ao *desenvolvimento da metodologia*, a mesma foi desenvolvida com sucesso. O objetivo de gerar tanto correntes hiperpicnais, quanto correntes hipopicnais, foi alcançado, sendo possível observá-las em cenários com ambiente salino.

Quanto ao emprego da *instrumentação* para registro das velocidades locais da corrente, constatou-se que o uso de sondas UVP, por conta do tamanho do volume de amostragem, mostrou-se mais ineficiente do que o uso de sondas Vectrino<sup>®</sup>. Optou-se pela utilização de sondas Vectrino<sup>®</sup>, operadas com frequência de aquisição de 200 Hz, para medir as velocidades na parte hiperpicnal das correntes e a sondas UVP para a parte hipopicnal.

As correntes hipopicnais não foram geradas no caso do ambiente com água clara devido ao fato de a mesma nunca apresentar uma massa específica menor do que o fluido ambiente e nem ter havido a ocorrência de alguma força que causasse a sua elevação, uma vez que o fluido presente na corrente era o mesmo fluido do ambiente.

Quanto ao *efeito da velocidade de injeção*, observou-se que nos ensaios em que há um aumento na velocidade de injeção (redução da seção de saída), o ponto de desprendimento da corrente ocorre mais à montante do canal, com relação aos ensaios realizados com a seção plena. Nota-se também, um leve aumento nas espessuras de correntes, contudo, não significativo.

Quanto ao *efeito da massa específica*, pode-se constatar que quando a massa específica do ambiente ( $\rho_a$ ) é maior do que a massa do fluido injetado ( $\rho_o$ ), o desprendimento ocorre próximo à saída da corrente do difusor.

Quanto à *relação entre as massas específicas do fluido da corrente e do ambiente*, confirmaram-se alguns comportamentos já registrados em estudos anteriores (Boffo, 2010). Pôde-se registrar ensaios em que, o simples fato da massa específica do fluido da corrente injetada ser menor do que a massa específica do fluido ambiente, não foi condição determinante e suficiente para a corrente se desenvolver como corrente hipopicnal desde a entrada (ensaios E4, E5, E7, por exemplo). Em outras palavras, a formação de porção hipopicnal só ocorreu após a corrente percorrer um certo trecho de canal e se desprender da porção hiperpicnal, ou seja, após terem ocorrido trocas entre as interfaces da corrente (incorporação de fluido ambiente e/ou deposição do material em transporte). Por outro lado, ensaios onde a massa específica do fluido da corrente injetada era maior do que a massa específica do fluido ambiente (ensaios E6, E8, E9, por exemplo), mesmo iniciando como fluxos hiperpicnais, apresentaram, em regiões mais distais do canal, fluxos hipopicnais.

Foi possível ajustar uma tendência que vincule *o ponto de desprendimento* da corrente, ou seja, passagem de corrente hiperpicnal para hipopicnal, com a relação de massas específicas, a distância ao longo do canal e a altura útil do difusor de injeção. Esta tendência ficou expressa por:

$$\frac{x}{h_0} = 116,3 e^{125,11 \left( \frac{\Delta \rho}{\rho_0} \right)}$$

A comparação entre os parâmetros que definem comportamento tipo “jatos/plumas” e os mesmos parâmetros avaliados para as correntes de densidade simuladas, pode ser sintetizada pela tabela 18.

**Tabela 7.1 -Síntese do comportamento dos fluxos .**

|   | <b>Parâmetros que regem</b>                               | <b>Jatos e Plumas</b>  | <b>Correntes Simuladas</b>   |
|---|---|--|--|
| <b>Espessura do escoamento</b>          | h, x  | Sempre crescente.  | Crescimento até 30h <sub>0</sub> e decaimento após.  |
| <b>Velocidade no Eixo Central</b>       | v, x, x', h <sub>0</sub>                                  | Decaimento bem definido e relacionado com o número de Reynolds.  | Inicialmente, apresenta uma distribuição caótica, passando a decair levemente, mas sem uma definição clara de comportamento. |
| <b>Fluxo de Quantidade de Movimento</b> | M, m, x, L <sub>m</sub> , v, h <sub>0</sub>               | Decaimento bem definido ao longo do eixo longitudinal.   | Decaimento ao longo do eixo longitudinal, contudo, com valores superiores a jatos e plumas.                                  |
| <b>Fluxo de Flutuabilidade</b>          | B, β, x, L <sub>m</sub> , v                               | Relação linear bem definida com relação à velocidade do fluxo.   | Relação linear com a velocidade do fluxo, contudo, com valores superiores a jatos e plumas.                                  |
| <b>Concentração</b>                     | ρ, x, c,  | Decaimento bem definido ao longo do eixo longitudinal.   | Crescimento, até 50 cm da fonte, e decaimento, após.   |
| <b>Diluição Adimensional</b>            | q, m, B, L <sub>Q</sub> , R <sub>o</sub> , R <sub>p</sub> | Leve crescimento, no caso de jatos, e um crescimento mais abrupto, para o caso de plumas. Ambos com uma relação linear com a distância adimensional. | Crescimento, na região de plumas, contudo, a relação com a distância adimensional flutua ao longo do seu eixo.               |

Quanto às *espessuras do escoamento*, jatos e plumas são fluxos que as têm em constante crescimento, com taxa de crescimento constante e seguindo leis de tendências bem definidas em sua evolução ao longo do canal. No caso de correntes hiperpicnais e hipopicnais, não se observou um aumento gradual da espessura. Nas correntes, as espessuras tendem a se estabilizar em determinado ponto do canal, podendo, inclusive, passar a apresentar um decréscimo em seu valor, à medida que ela se afasta da sua fonte. Este comportamento demonstra que o fenômeno observado difere dos jatos e plumas, para os quais a espessura cresce constantemente ao longo do fluxo.

Sobre as *velocidades ao longo do eixo central do escoamento*, em função da distância à origem, registrou-se um decaimento das mesmas. Contudo, não se pode considerar este decaimento como sendo similar ao de jatos e plumas, pois este ocorre com uma desaceleração

bem mais definida (Rajaratnam, 1976). Inicialmente, as correntes hiperpicnais apresentam uma maior dispersão dos valores de distribuição de velocidades, sem uma clara definição de tendência. Somente após a distância  $x/h_0 = 40$ , elas passam a apresentar um comportamento decrescente, porém, não tão definido como no caso de jatos e plumas.

Analisando a variação da velocidade adimensionalizada na corrente pela velocidade na injeção em função da distância virtual à origem, o comportamento característico de jatos, ou seja, decaimento constante, não é claramente reproduzido pelas correntes de densidade. Existe uma tendência ao decaimento, contudo, em função da relação entre as massas específicas da corrente e do meio ambiente, a redução das velocidades de propagação da corrente ocorre dentro de uma faixa (região), impedindo a definição de uma única lei de tendência. Também se constatou que magnitudes de valores de velocidades adimensionalizadas registrados para jatos de parede foram observadas nas correntes simuladas, contudo obtidas com faixas de número de Reynolds bem inferiores às registradas nos jatos. Em outras palavras, os dados experimentais localizaram-se, na comparação com os jatos de parede, em região em que o número de Reynolds teria valores consideravelmente maiores do que 37000, quando, nos experimentos, uma vez que a viscosidade do fluido em escoamento foi corrigida devido à concentração de sedimentos em transporte, os valores de Reynolds eram bem menores do que esse.

Analisando o decaimento do *fluxo de quantidade de movimento* apresentado por Papanicolaou & List (1988), constatou-se que as correntes de densidade, mesmo mantendo um decaimento da quantidade de movimento ao longo do canal, apresentam magnitudes de valores maiores do que os de jatos.

Encarando o decaimento da *concentração do fluxo* ao longo do escoamento, a comparação com a tendência apresentada por Hall et al. (2010) mostrou que, mais uma vez, as correntes de densidade distinguem-se dos jatos. Enquanto a tendência nos jatos é decair constantemente, as correntes de densidade apresentaram, em geral, um acréscimo da concentração até a seção a 50 cm da fonte, para então haver um decaimento. O aumento da concentração na região proximal do canal pode ser atribuído à incorporação do fluido ambiente, acrescentando a mistura de água e sal na matriz fluida do fluxo. Já o decaimento pode ser atribuído à deposição de material à jusante.

Sobre o *fluxo de flutuabilidade*, notou-se, para as correntes simuladas, um aumento em seções próximas ao difusor, devido à incorporação do fluido ambiente (água salina), seguido de decaimento. Tomando a análise de Azimi et al. (2012), a qual correlaciona a velocidade ao longo do canal com o fluxo de flutuabilidade inicial, nota-se, a flutuabilidade inicial não é capaz de explicar a variabilidade das velocidades, ou seja, não existe uma correlação direta

entre estas grandezas. Com isso, mais uma vez, conclui-se que as correntes de densidade não são fluxos semelhantes a jatos.

Do ponto de vista da *diluição adimensional*, os valores da diluição calculados ao longo do canal desenvolvem-se em região cujo comportamento seria de plumas. Assim como para as plumas, existe uma tendência linear de crescimento da diluição adimensional local com a distância adimensional, contudo, diferentemente das plumas, esta tendência é dependente da posição ao longo do escoamento.

Por fim, analisando-se puramente a evolução dos *fluxos de quantidade de movimento e flutuabilidade* ao longo do canal, nota-se que não há uma correspondência direta entre as correntes de densidade e os jatos e plumas. A variação do primeiro, quando comparado com as tendências encontradas por Hall et al. (2010) e Papanicolau & List (1988), não mostra decaimentos tão bem definidos, como os apresentados pelos trabalhos citados. Complementarmente, para o caso do fluxo de flutuabilidade, também não se podem definir tendências claras em seu decaimento.

Da análise dos parâmetros que expressam o escoamento, pode-se afirmar, então, que na região próxima ao difusor de injeção da mistura, compreendida até cerca de 40 a 50 vezes a altura do bocal de injeção, o fenômeno de corrente de densidade ainda não está completamente desenvolvido, mas que, após esta região, o que se observa é um tipo de escoamento regido pelas diferenças de massas específicas e, portanto, pela concentração de material em suspensão. Ou seja, em distâncias superiores a cerca de 40 a 50 vezes a altura do bocal, o fenômeno em estudo estará livre das condições de admissão da mistura no canal.

Através das análises realizadas neste trabalho, pode-se concluir que correntes de densidade simuladas, sejam elas hiperpicnais ou hipopicnais, não podem ser consideradas, em sua totalidade, como fluxos semelhantes a jatos e plumas. Elas apresentam relações de comportamentos geométrico, dinâmico e de fluxos distintas daquelas reportadas para o caso de jatos e plumas.

Recomenda-se, em trabalhos futuros, que certos aspectos utilizados para a caracterização de jatos e plumas sejam avaliados ainda mais próximos do difusor, densificando as medições até a distância de 50 cm, bem como que novos ensaios sejam realizados com outras alturas de difusor, para que se possa delimitar com mais segurança a região a partir da qual os efeitos de admissão da corrente deixam de existir.

Também, uma vez que o fenômeno em estudo é fortemente dependente da variação da concentração de sedimentos, bem como da incorporação, pela corrente, do fluido ambiente, sugere-se que seja melhor estudado os métodos de calibração das sondas de medição de concentrações (sondas UHCM), bem como que sejam criados protocolos experimentais para a

avaliação da presença do sal no fluido que compõe a corrente de densidade. Com estas melhorias e com a execução de um maior número de experimentos, poder-se-á verificar a lei de tendência, encontrada neste trabalho, para o decaimento das concentrações locais com relação à concentração inicial da corrente, o que terá implicações diretas na avaliação das massas específicas inicial e locais, bem como do fluxo de fluabilidade. Com estes cuidados, haverá um melhor detalhamento das condições que regem a transformação de um fluxo hiperpicnal para um fluxo hipopicnal.

## 8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGRAWAL, A.; PRASAD, A. K. 2003. Integral solution for the mean flow profile of turbulent jets, plumes, and wakes. Journal of Fluids Engineering, n. 125, p. 813-822.

ALTINAKAR, M. S.; GRAF, W. H.; HOPFINGER, E. J. 1996. Flow structure in turbidity currents. Journal of Hydraulic Research, n. 34, p. 713-718.

AZIMI, A. H.; ZHU, D. Z.; RAJARATNAM, N. 2012. Experimental study of sand jet front in water. International Journal of Multiphase Flow, n. 40, p. 19-37.

BATES, C. C. 1953. Rational theory of delta formation. AAPG Bull., n 37, p. 2119-2162. Apud MULDER, T.; ALEXANDER, J. 2001. The physical character of subaqueous sedimentary density flows and their deposits. Sedimentology, n. 48, p 269-299.

BENTLEY, S.J., 2003. Wave-current dispersal of fine-grained fluvial sediments across continental shelves: the significance of hyperpycnal plumes. *in* E.D. Scott, A.H. Bouma and W.R. Bryant Eds., Siltstones, Mudstones and Shales: Depositional Processes and Characteristics. Society for Sedimentary Geology/Gulf Coast Association of Geological Societies Joint Publication, p. 35-48. Apud BHATTACHARYA, J. P.; MacEACHERN, J. A. 2009. Hyperpycnal rivers and prodeltaic shelves in the cretaceous seaway of North America. Journal of Sedimentary Research, n. 79, p. 184-209.

BHATTACHARYA, J. P.; MacEACHERN, J. A. 2009. Hyperpycnal rivers and prodeltaic shelves in the cretaceous seaway of North America. Journal of Sedimentary Research, n. 79, p. 184-209.

BOFFO, C. H. 2010. Simulação física de correntes de densidade em ambientes salinos sob diferentes contrastes de densidade, 129p. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos) – Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

BRITTER, R. E.; LIDEN, P. F. 1980. The motion of the front of a gravity current traveling down an incline. Journal of Fluid Mechanic, n. 91, p. 531-543.

BUSH, L. M. J. 1962. Exploratory study of sediment diffusion. Journal of Geophysical Research, n 67(4), p. 1427-1433.



BUSH, J. W. M.; THURBER, B. A.; BLANCHETTE, F. 2003. Particle clouds in homogeneous and stratified environments. Journal of Fluid Mechanics, n. 489, p. 29-54.

CRAPPER, P. F. Forced Plume Characteristics. 1977. Tellus, n. 29, p. 470-475.

FABIAN, S. 2002. Modelagem física de correntes de densidade conservativas em canal de declividade variável, 130p. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos) – Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

FAN, L. N. 1967 Turbulent buoyant jets into stratified or flowing ambient fluids. Technical Rep. KH-R-15, W. M. Keck Laboratory of Hydraulics and Water Resources, California Institute of Technology, Pasadena, California. Apud FISCHER, H. B.; LIST, E. J.; KOH, R. C. Y.; IMBERGER, J.; BROOKS, N. H. 1979. Mixing in inland and coastal waters. 1ª ed. Academic Press.

FAN, J. 1986. Turbid density currents in reservoirs. Water Int. n. 11, p.107-16. Apud MIDDLETON, G. V. 1993. Sediment deposition from turbidity currents. Annual Reviews, Earth Planet, n. 21, p. 89-114.

FAN, J., Morris, G. L. 1992. Reservoir sedimentation. I: Delta and density current deposits. J. Hydraul. Eng. N. 118(3), p. 354-69. Apud MIDDLETON, G. V. 1993. Sediment deposition from turbidity currents. Annual Reviews, Earth Planet, n. 21, p. 89-114.

FISCHER, H. B.; LIST, E. J.; KOH, R. C. Y.; IMBERGER, J.; BROOKS, N. H. 1979. Mixing in inland and coastal waters. 1ª ed. Academic Press.

GRAVINE, R. W. 1982. A steady model for buoyant surface plume hydrodynamics in coastal waters. Tellus, n. 34, p. 293-306.

HALL, N.; ELENANY, M.; ZHU, D. Z.; RAJARATNAM, N. 2010. Experimental study of sand and slurry jets in water. Journal of Hydraulic Engineering, n. 136, p. 727-738.

HOFER, K. 1979. Turbulente Wandstrahlen mit Auftrieb. Mitt.. Versuchsanst. Wasserbau, Hydrol., Glaziol., Eidg. Tech. Hochsch., Zurich 42. Apud LAUNDER, B. E.; RODI, W. 1983. The turbulent wall jet – measurements and modeling. Journal of Fluid Mechanics, n. 15, p. 429-459.

KNELLER, B.; BUCKEE, C. 2000. The structure and fluid mechanics of turbidity current: a review of some recent studies and their geological implications. Sedimentology, v. 47, n. 1, p. 62-94.

KOTSOVINOS, N. E.; LIST, E. J. 1977. Plane turbulent buoyant jets. Part 1. Integral properties. Journal of Fluid Mechanics, n. 81, p. 25-44.

LAUNDER, B. E.; RODI, W. 1983. The turbulent wall jet – measurements and modeling. Journal of Fluid Mechanics, n. 15, p. 429-459.

LIST, E. J. 1982. Turbulent jets and plumes. Journal of Fluid Mechanics, n. 14, p. 189-212.

MANICA, R. 2002. Modelagem física de correntes de densidade não conservativas em canal tridimensional de geometria simplificada, 121p. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos) – Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

MANICA, R. 2009. Geração de correntes de turbidez de alta densidade: condicionantes hidráulicos e deposicionais, 390p. Tese (Doutorado em Recursos Hídricos) – Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

MIDDLETON, G. V. 1966. Experiments on density and turbidity currents [Part 1]. Canadian Journal of Earth Science, n. 3, p. 523-546.

MIDDLETON, G. V. & HAMPTON, G. V. 1976. Subaqueous sediment transport and deposition by sediment gravity flows. In: Marine Sediment Transport and Environmental Management. New York, Wiley, p. 197-218.

MIDDLETON, G. V. 1993. Sediment deposition from turbidity currents. Annual Reviews, Earth Planet, n. 21, p. 89-114.

MORTON, B. R., TAYLOR, G. I. & TURNER, J. S. 1956, Turbulent gravitational convection from maintained and instantaneous sources, Proc. of R. Soc., A 234, P. 1-23. Apud CRAPPER, P. F. Forced Plume Characteristics. 1977. Tellus, n. 29, p. 470-475.

MULDER, T.; SYVITSKI, P. M. 1995. Turbidity currents generated at river mouths during discharge to the world oceans. The Journal of Geology, n. 103, p. 285-299.

MULDER, T.; ALEXANDER, J. 2001. The physical character of subaqueous sedimentary density flows and their deposits. Sedimentology, n. 48, p 269-299.

NEWMAN, B. G.; Patel, R. P.; Savage, S. B.;Tjio, H. K. 1972. Three-dimensional wall jet originating from a circular orifice, Aeronaut. Q. 23 : 1 87. Apud LAUNDER, B. E.; RODI, W. 1983. The turbulent wall jet – measurements and modeling. Journal of Fluid Mechanics, n. 15, p. 429-459.

PAK, J. R. V. Z. H.; SPINRAD, R. W. 1984. Vertical distribution of suspended particulate matter in the Zaire river, estuary and plume. Netherlands Journal of Sea Research, n. 17, p. 412-425.

PAPANICOLAOU, P. N. & LIST, E. J. 1988. Investigations of round vertical turbulent buoyant jets. Journal of Fluid Mechanics, n. 195, p. 341-391.

PEDOCCHI, F. & GARCÍA, M. H. 2009. Application of an ultrasonic velocity profiler for velocity and suspended sediment measurements in an oscillatory boundary layer. Civil Engineering Studies: Hydraulic Engineering Series, n. 83.

PIPPER, D. J. W.; SHOR, A. N.; CLARKE, J. E. H. 1988. The 1929 “Grand Banks” earthquake, slump, and turbidity current. Geological Society of America, special paper 229.

PUHL, E. 2007.. Parametrização de ensaios de simulação física de correntes de densidade, 123p. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos) – Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

RAJARATNAM, N. 1976. Turbulent jets. 1ª ed. Elsevier Scientific Publishing Company.

RAMIREZ, I.; IMBERGER, J. 2002. The numerical simulation of the hydrodynamics of Barbamarco Lagoon, Italy. Applied Numerical Mathematics, n. 40, p. 273-289.

ROSTMAY, N.; BERGSTROM, D. J.; SUMMER, D.; BUGG, J. D. 2011. The effect of surface roughness on the turbulence structure of a plane wall jet. Physics of Fluids, n. 23, 085103.

SENTÜRK, F. & SIMONS, D. B. 1977. Sediment Transport Technology. 1ª ed. Fort Collins, Colorado, EUA: Water Resources Publications.

SHANMUGAM, G. 2006. Deep- Water process and facies models: implications for sandstone petroleum reservoirs. 1<sup>a</sup> ed. Handbook of Petroleum Exploration and Production.

SIMPSON, J. E.; BRITTER, R. E. 1979. The dynamics of the head of a gravity current advancing over a horizontal surface. Journal of Fluid Mechanics, n. 94, p. 477-495.

SIMPSON, J. E. 1982 Gravity current in the laboratory, atmosphere, and ocean. Annual Review of Fluid Mechanics, n. 14, p. 213-234.

SINGANSETTI, S. R. 1966. Diffusion of sediment in submerged jet. Journal of the Hydraulic Division, n. 92(2), p. 153-168.

U. S. GEOLOGICAL SURVEY. 1982. Volcanic Eruptions, Blasts, Plumes, Ballistics, etc. Disponível em :  
<[http://vulcan.wr.usgs.gov/Glossary/VolcanicBlasts/description\\_volcanic\\_blasts.html](http://vulcan.wr.usgs.gov/Glossary/VolcanicBlasts/description_volcanic_blasts.html)>.

Acesso em 25 mar. 2011.

XU et al. 2002 Distribution and transport of suspended particulate matter in Monterey Canyon, California. International Journal of Marine Geology, Geochemistry and Geophysics, n. 181, p. 215-234.

## **ANEXOS**

**ANEXO A: INFORMAÇÕES TÉCNICAS DOS INSTRUMENTOS DE  
MEDIÇÕES.**

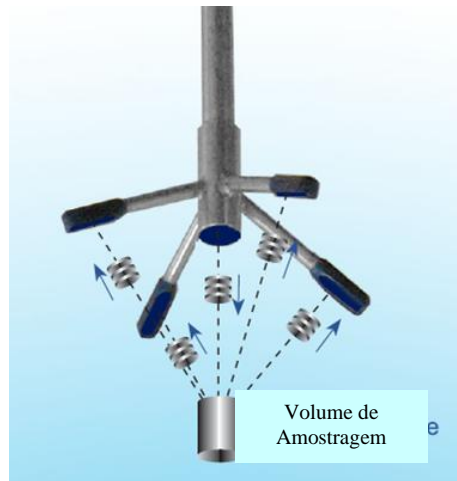
Neste anexo serão apresentados os três principais equipamentos utilizados neste trabalho (Vectrino® e UVP) e as suas características técnicas.

### **Vectrino®**

O funcionamento das sondas ultrassônicas Vectrino® (figura A.1) partem do princípio do efeito Doppler, o qual consiste na diferença entre as frequências sonoras emitidas e lidas. No caso, o aparelho possui cinco sondas, sendo uma central e outras quatro posicionadas em quatro pequenos braços, na extremidade da sua haste metálica (figura A.2). A sonda central emite o pulso sonoro, enquanto as outras quatro funcionam como receptores do seu eco. Sabendo a posição de cruzamento dos feixes, registra-se o tempo para receber o eco, bem como a sua frequência, determinando a velocidade do fluxo na região.



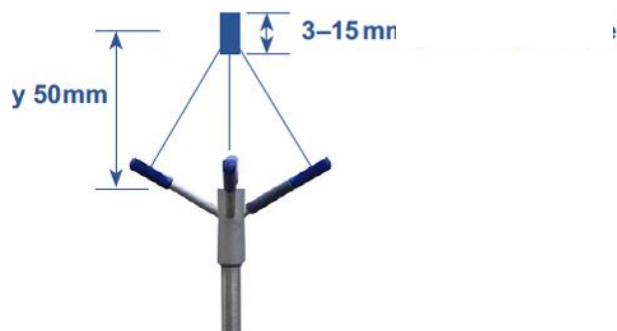
**Figura A.1: Sonda Vectrino® (manual – Nortek).**



**Figura A.2: Extremidade da sonda (adaptado do manual – Nortek).**

Cada uma das sondas tem uma função distinta. Quando o aparelho não está medindo a velocidade do fluxo, a sonda central pode medir a sua distância ao fundo (logo, saber a posição da amostragem, em relação ao ambiente), bem como a temperatura ambiente. Quanto às outras quatro sondas, a primeira mede a velocidade longitudinal, a segunda mede a velocidade transversal e as outras duas realizam uma medida redundante da velocidade vertical.

O volume de controle, onde é feita a amostragem, é variável. Tendo um formato cilíndrico, localiza-se a 5 cm da sonda central e possui um diâmetro de 6 mm, sendo a sua altura variável entre 3 mm e 15 mm, de acordo com a escolha do usuário (figura A.3). No presente trabalho, foi utilizada uma altura de 3 mm em todas as medidas.



**Figura A.3: Volume de amostragem do Vectrino® (adaptado do manual – Nortek).**

Quanto às outras características pertinentes do aparelho, segue abaixo uma relação delas:

- fabricante: Nortek;



- é possível sincronizar diversos aparelhos Vectrinos®, desta forma fazendo eles terem suas medidas realizadas de forma simultânea;
- abrangência da velocidade medida:  $\pm 0,01, 0,1, 0,3, 1, 2$  e  $4$  m/s (sendo selecionável no software da sonda);
- precisão:  $\pm 0,5\%$  do valor medido de  $\pm 1$  mm/s;
- frequência de amostragem (saída):  $1 - 200$  Hz;
- frequência de amostragem interna:  $200 - 5000$  Hz;
- frequência do pulso ultrassônico:  $10$  MHz;
- resolução do pulso:  $0,45$  dB.

### **UVP (Ultrasonic Velocity Profiler)**

Assim como os outros dois equipamentos detalhados neste anexo, funciona através de ondas ultrassônicas. Seguindo o princípio do efeito Doppler, pode-se determinar a velocidade do escoamento. Muito embora seja a mesma base de funcionamento da sonda Vectrino®, há algumas diferenças entre elas, no que se refere às especificações técnicas.

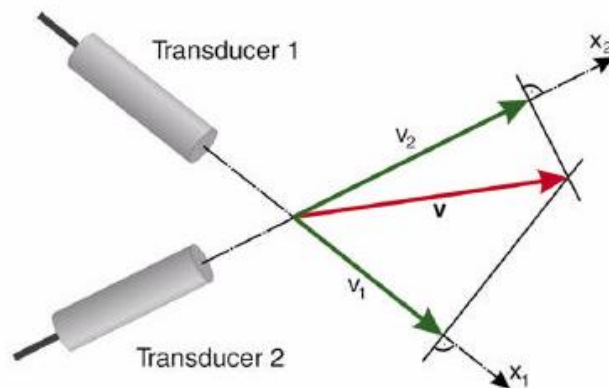
Fabricadas pela Met-flow, as sondas de UVP funcionam em conjunto com um console e um computador externo (figura A.4). Enquanto as sondas emitem os pulsos sonoros e os recebem, o console realiza as medidas, transformando as leituras em resultados. Por último, um computador, ligado ao console através de um cabo de ethernet, contém o software, o qual possui todo o controle sobre o equipamento e realiza as análises sobre as informações coletadas.



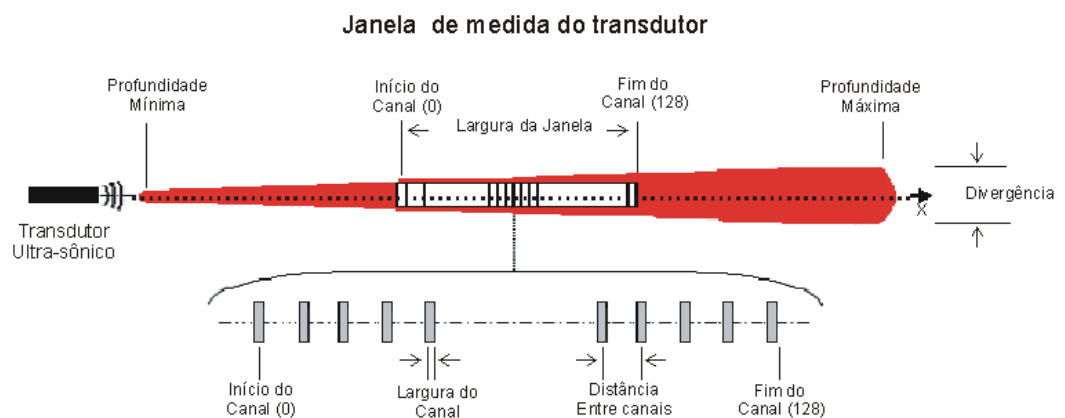
**Figura A.4: Console e sondas (manual – Met-flow).**

O laboratório NECOD possui cinco (5) tipos de sondas, trabalhando nas frequências emitidas: 0,5, 1, 2, 4 e 8 MHz. Cada uma apresenta características distintas, o que traz benefícios para determinados usos. No caso do NECOD, a sonda de maior interesse é a de 2 MHz, a qual foi utilizada neste trabalho. Ela possui ½” de diâmetro e 60 mm de comprimento, podendo realizar medidas entre 33,7 mm e 3.000 mm de sua extremidade. A abrangências das velocidades podem ir desde 0,0913 m/s, até 49,3 m/s, com resoluções de 0,00036 m/s e 0,1927 m/s, respectivamente.

As sondas podem realizar medidas de velocidade em diversos pontos ao longo de seu eixo e elas sondas são realizadas na direção do seu eixo, de forma unidirecional. Contudo, através do cruzamento de duas sondas, pode-se obter uma medida bidimensional (figura A.5). O cruzamento de três sondas, gera uma medida tridimensional. Todas as medidas são feitas através de janelas de leitura igualmente espaçadas (figura A.6).



**Figura A.5: Cruzamento de duas sondas (manual – Met-flow).**



**Figura A.6: Esquema de canais de medida (adaptado do manual – Met-flow).**

Há de se compreender o fato de que as configurações do UVP são extremamente variadas. A alteração na profundidade de leitura influencia na distância entre os canais, a qual

também é influenciada pelo tamanho destes. A profundidade de leitura também pode influenciar na resolução da velocidade medida e assim por diante. Sendo assim, um correto ajuste nos seus parâmetros se mostra fundamental.