

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

INSTITUTO DE PESQUISAS HIDRÁULICAS

MODELAGEM FÍSICA DE CORRENTES DE DENSIDADE CONSERVATIVAS EM
CANAL DE DECLIVIDADE VARIÁVEL

SAMUEL FABIAN

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 de título de Mestre em Engenharia

Porto Alegre, 15 de março de 2002.

AGRADECIMENTOS

Durante o desenvolvimento deste trabalho foram muitas as pessoas que colaboraram, apoiando ou participando da pesquisa. Por isso dedico aqui um agradecimento a essas pessoas:

A meus pais, Orestes e Célia, que sempre me incentivaram e apoiaram durante todo o período do mestrado, fica, aqui, um agradecimento especial;

A professora orientadora Ana Luiza, que muito ajudou, com sua experiência e conhecimento, para que esse trabalho tivesse a qualidade de uma pesquisa de mestrado;

Ao professor Maestri, pelas sugestões, críticas construtivas e pelo conhecimento compartilhado, que foram de grande importância na exploração do assunto estudado;

Aos colegas de mestrado e amigos, Jaime, Juliano, Paulo Henrique, Rafael, Sandro e Sávio;

Aos estagiários Daniel e Diogo que prestaram uma grande ajuda na realização dos ensaios;

A Petrobras, representada na figura do Geol. Adriano Viana e do coordenador do PROFEX, Geol. Ciro Appi, que em parceria com o Instituto de Pesquisas Hidráulicas concretizaram o projeto de pesquisa de correntes de densidade em que este trabalho esteve engajado, fornecendo todo o apoio necessário;

Agradeço também a todas as pessoas, que não foram aqui mencionadas, mas que de alguma forma apoiaram ou participaram, direta ou indiretamente, da realização deste trabalho.

APRESENTAÇÃO

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 a orientação da Professora Ana Luiza de Oliveira Borges da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

As correntes de densidade são fenômenos importantes na natureza, em especial para a indústria do petróleo. As principais reservas de petróleo exploradas no Brasil foram formadas por depósitos sedimentares de correntes de densidade em alto mar. Hoje, a procura de novas reservas de petróleo concentra esforços na identificação desses depósitos sedimentares. Portanto, o escoamento de correntes de densidade é uma área da ciência de grande interesse para a indústria do petróleo. Entretanto, esse fenômeno ainda não é totalmente compreendido, trazendo várias incertezas na procura dos depósitos sedimentares gerados por esse escoamento.

Com o intuito de conhecer melhor a dinâmica do escoamento das correntes de densidade e os depósitos sedimentares está sendo implantada uma nova linha de pesquisa no Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH-UFRGS) em parceria com o Instituto de Geociências (UFRGS) e a Petrobras, com financiamento MCT/FINEP-CTPETRO. Foi criado com esse objetivo o Núcleo de Estudos de Correntes de Densidade (NECOD), instalado no IPH.

Através da simulação física das correntes de densidade, pretende-se avaliar e conhecer melhor a dinâmica desse escoamento e os processos de formação de depósitos sedimentares. O NECOD pretende formar assim, um centro de excelência desenvolvendo conhecimento acerca das correntes de densidade para fornecer à indústria do petróleo ferramentas que auxiliem na procura de novas reservas de petróleo.

RESUMO

Este estudo avalia a dinâmica de correntes de densidade conservativas através da análise da influência dos principais parâmetros que atuam no escoamento: a diferença de massa específica (Dr) entre os fluidos, a declividade do canal e o volume inicial. As correntes simuladas com soluções salinas em canal unidimensional utilizaram massa específica inicial numa faixa que variou de 1010 kg/m^3 a 1045 kg/m^3 . Também foram conduzidos ensaios em canal bidimensional onde a declividade foi variada de $-0,5^\circ$ a 4° , utilizando soluções salinas de 1010 kg/m^3 e 1022 kg/m^3 . Em ambos os canais, os volumes iniciais foram variados para verificar sua influência no escoamento. Os resultados mostraram que a variação de apenas 1% em Dr provoca um acréscimo de 25% na velocidade média da corrente, indicando que esse parâmetro é determinante na sua dinâmica.

O escoamento da corrente apresenta um regime não permanente, sendo que há uma aceleração no início do movimento até que se atinja a velocidade máxima, seguido de uma desaceleração da corrente. Durante o escoamento, a velocidade de avanço da cabeça da corrente apresenta oscilações com uma frequência principal definida. A correlação dessa frequência com a frequência de desprendimento de vórtices, através do número de Strouhal (S_t), é forte, sugerindo que na simulação física de correntes de densidade, não só o número de Froude Densimétrico deve ser respeitado, mas também o número de Strouhal.

ABSTRACT

The present study deals with density currents dynamics analyzing the main parameters of the flow: the density difference (***Dr***) between the fluids, the channel slope and the initial volume. The density of the currents simulated in an unidimensional channel, that were made of saline solutions, ranged from 1010 kg/m³ to 1045kg/m³. A bidimensional channel with slope ranging from -0,5° to 4° was also used with saline solutions of densities from 1010 kg/m³ to 1022 kg/m³. In both channels, the initial volume were modified to verify its influence in the flow. The results showed that a 1% density variation causes a 25% raise on current mean velocity, indicating this parameter importance.

The density current shows a non-steady flow. There is an acceleration in the beginning until maximum velocity is reached, followed by a current deceleration. The head velocity showed oscillations with a main frequency defined. A correlation between this frequency and the vortex shedding, through Strouhal's number, is strong, suggesting that in physical simulation of density currents, both Densimetric Froud and Strouhal numbers should be respected.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	1
2. OBJETIVOS	2
2.1 Geral.....	2
2.2 Específicos.....	2
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	3
3.1. Descrição do Fenômeno.....	3
3.2 Aparato Experimental	5
3.3 Dinâmica da Corrente de Densidade.....	7
3.4 Estudo de Camada de Mistura.....	9
3.5 Semelhança Física em Correntes de Densidade	11
4. MÉTODOS E EQUIPAMENTOS	14
4.1 Introdução	14
4.2 Canal Unidimensional.....	14
4.3 Canal Bidimensional.....	19
4.4 Sondas de Condutividade.....	27
4.5 Sistema de Aquisição e Tratamento de Imagens	30
4.6 Conclusões Parciais	35
5. RESULTADOS E ANÁLISES	36
5.1 Calibração do Aparato Experimental e dos Ensaios.....	36
5.2 Canal Unidimensional.....	38
5.3 Canal Bidimensional.....	45
5.4 Análise do Desprendimento dos Vórtices na Interface da Corrente de Densidade	62
6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	69
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	71
8. ANEXOS	A ₁

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 – Configuração de uma corrente de densidade	3
Figura 3.2 – Rompimento de um lobo e criação de um fenda	4
Figura 3.3 – Diagrama esquemático do equipamento	5
Figura 3.4 – Canal de declividade variável	6
Figura 3.5 – Efeito da contradelividade no escoamento da corrente de densidade	8
Figura 3.6 – Influência da contradelividade no valor de Fr' de correntes de densidade	8
Figura 3.7 - Critério de estabilidade para ondas em interfaces de correntes de densidades	10
Figura 3.8 - Condição de estabilidade para diferentes distribuições de velocidade	10
Figura 4.1 – Configuração do canal unidimensional	15
Figura 4.2 – Escalas de comprimento no canal unidimensional	16
Figura 4.3 – Exemplo de configuração inicial de ensaio no canal unidimensional	18
Figura 4.4 – Vista geral do canal para escoamento bidimensional e declividade variável	21
Figura 4.5 – Sistema de acionamento da comporta	22
Figura 4.6 – Relação de sal (g) e r da solução salina (kg/m^3)	24
Figura 4.7 - Gráficos de calibração utilizados para os ensaios $-0,5^\circ$, 1° e 3° e $r = 1010 kg/m^3$	29
Figura 4.8 – Escala de referência de comprimento	32
Figura 4.9 – Representação esquemática da metodologia do sistema de aquisição e tratamento de imagens	33
Figura 4.10 – Erro devido à paralaxe	34
Figura 4.11 – Correção da paralaxe no primeiro trecho do canal	34
Figura 5.1 – Comparação dos resultados com Simpson e Britter (1979)	36
Figura 5.2 – Comparação dos resultados com Laval <i>et al.</i> (1988)	37
Figura 5.3 - Variação da velocidade média de avanço da corrente de densidade em função do volume inicial de solução salina com massa específica $1045 kg/m^3$	39
Figura 5.4 - Variação da velocidade de avanço da corrente com o volume inicial: repetições e valores médios	40

- Figura 5.5 - Variação da velocidade de avanço da cabeça da corrente de densidade em função da relação h/H , para massa específica de 1045 kg/m^3 e comprimento do compartimento inicial de $0,40\text{m}$ 41
- Figura 5.6 - Variação da velocidade de avanço da corrente em função da massa específica, fixando $h/H=2/3$ e $L_{\text{inicial}}=0,40\text{m}$ 42
- Figura 5.7 - Variação, ao longo do canal, da velocidade de avanço da corrente de densidade em função da massa específica da solução salina, fixando-se $h/H=2/3$ e $L_{\text{inicial}}=0,40\text{m}$ 43
- Figura 5.8 - Variação das alturas da cabeça e do corpo da corrente de densidade ao longo do comprimento do canal 44
- Figura 5.9 - Variação da velocidade em função da declividade média do canal e da massa específica da solução salina 46
- Figura 5.10 - Influência da declividade do canal na aceleração média da corrente em função da massa específica da solução salina. 47
- Figura 5.11 - Variação espacial da velocidades médias de avanço da corrente para massas específicas de 1010 kg/m^3 e 1020 kg/m^3 48
- Figura 5.12 - Distribuição espacial da velocidade média de avanço da corrente para $r = 1010 \text{ kg/m}^3$ 50
- Figura 5.13 - Distribuição espacial da velocidade média de avanço da corrente para $r = 1022 \text{ kg/m}^3$ 51
- Figura 5.14 - Alturas médias da corrente em função da declividade do canal 52
- Figura 5.15 - Distribuição espacial da altura média da corrente de densidade 53
- Figura 5.16 - Perfil instantâneo e composto da concentração da corrente: $\alpha=-0,5^\circ$; S200; 1010kg/m^3 55
- Figura 5.17 - Perfil instantâneo e composto da concentração da corrente: $\alpha=-0,5^\circ$; S300; 1010kg/m^3 55
- Figura 5.18 - Perfil instantâneo e composto da concentração da corrente: $\alpha=-0,5^\circ$; S400; 1010kg/m^3 55
- Figura 5.19 - Perfil instantâneo e composto da concentração da corrente: $\alpha=1^\circ$; S200; 1010kg/m^3 55

Figura 5.20 - Perfil instantâneo e composto da concentração da corrente: $\alpha=1^\circ$;S300; 1010kg/m ³	56
Figura 5.21 - Perfil instantâneo e composto da concentração da corrente: $\alpha=1^\circ$;S400; 1010kg/m ³	56
Figura 5.22 - Perfil instantâneo e composto da concentração da corrente: $\alpha=3^\circ$;S200; 1010kg/m ³	56
Figura 5.23 - Perfil instantâneo e composto da concentração da corrente: $\alpha=3^\circ$;S300; 1010kg/m ³	56
Figura 5.24 - Perfil instantâneo e composto da concentração da corrente: $\alpha=3^\circ$;S400; 1010kg/m ³	57
Figura 5.25 - Variação da velocidade em função do tempo de ensaio para os volumes de solução ensaiados. a) volume 72 L b) volume 55 L	64
Figura 5.26 - Espectro de potência para o ensaio V=72 L repetição 1 (a) e repetição 2 (b)	65
Figura 5.27 - Espectro de potência para o ensaio V=55 L repetição 1 (c) e repetição 2 (d)	65
Figura 5.28 - Seqüência de desprendimento de um vórtice – ensaio V=72 L R1	67
Figura A.1.1 – representação esquemática da corrente de turbidez.	A ₈
Figura A.2.1 – Vista geral do aparelho	A ₂₄
Figura A.2.2 – Conjunto das sondas	A ₂₄
Figura A.2.3 – Esquema da sonda	A ₂₄
Figura A.2.4 – Sensor da sonda	A ₂₄
Figura A.2.5 – Circuito simplificado das sondas de condutividade	A ₂₅
Figura A.2.6 – Central de controle do aparelho	A ₂₆
Figura A.2.7 – Programa de transmissão de dados	A ₂₇
Figura A.2.8 – Resultado dos primeiros testes das sondas de condutividade	A ₃₀
Figura A.2.9 – Não linearidade no resultado das sondas.	A ₃₀
Figura A.2.10 – Aquisição de dados com corrente de despolarização.	A ₃₁
Figura A.2.11 – Resultados depois do ajuste do tempo de despolarização	A ₃₂
Figura A.2.12– Curva de calibração da sonda 3	A ₃₃

Figura A.2.13 – Condutividade x concentração de sal na água

LISTA DE TABELAS

Tabela 5.1 - Variação do comprimento da câmara inicial	38
Tabela 5.2 - Variação da altura inicial para a massa específica de 1045 kg/m^3 e comprimento do compartimento inicial de 0.40m	40
Tabela 5.3 - Variação da massa específica, fixando $h/H=2/3$ e comprimento do compartimento inicial de 0,40m	42
Tabela 5.4 - Plano de ensaios realizado nos experimentos em canal bidimensional	45
Tabela 5.5 – Valores de massa específica obtidos para o ensaio $\alpha = -0,5^\circ$ e 1010 kg/m^3	58
Tabela 5.6 – Valores corrigidos para o ensaio $\alpha = -0,5^\circ$ e 1010 kg/m^3	58
Tabela 5.7 – Valores de massa específica obtidos para o ensaio $\alpha = 1^\circ$ e 1010 kg/m^3	59
Tabela 5.8 – Valores corrigidos para o ensaio $\alpha = 3^\circ$ e 1010 kg/m^3	59
Tabela 5.9 – Valores de massa específica obtidos para o ensaio $\alpha = 3^\circ$ e 1010 kg/m^3	60
Tabela 5.10 – Valores corrigidos para o ensaio $\alpha = 3^\circ$ e 1010 kg/m^3	60
Tabela 5.11 - Resultados da análise dos ensaios complementares para estudo do desprendimento de vórtices	64
Tabela 5.12 - Frequência dominante das oscilações de velocidade	66
Tabela 5.13 - Frequência do desprendimento dos vórtices na interface da cabeça da corrente de densidade	67
Tabela 5.14 - Número de Strouhal calculado para as frequências dominantes da oscilação de velocidade e do desprendimento dos vórtices	67

LISTA DE SÍMBOLOS

C	concentração
D	diâmetro
Fr'	número de Froude Densimétrico
g	gravidade
g'	gravidade reduzida pela diferença de massa específica
h/H	relação de altura entre a altura inicial da solução salina e da coluna de água
h_1	altura da lâmina de água
h_3	altura da cabeça da corrente de densidade
h_4	altura do corpo da corrente de densidade
Ku	número de Keulegan
l_i	comprimento da câmara inicial
Q	vazão unitária
Q_0	volume inicial unitário
Re	número de Reynolds
Ri	número de Richardson
S	declividade
T	tempo medido
X_f	distância ao longo do canal
a	declividade do canal
a_c	declividade crítica
n	viscosidade cinemática
$q_{\text{água}}$	temperatura da água
Dr	diferença de massa específica
r	massa específica
t	coeficiente de uniformidade
ω	velocidade de queda da partícula

1. INTRODUÇÃO

As correntes de densidade são fenômenos presentes na natureza em diversos campos da ciência. Esse tipo de escoamento se caracteriza pelo movimento relativo de dois fluidos com diferentes densidades. Alguns exemplos de correntes de densidade são as avalanches, a dispersão de poluentes na atmosfera e o escoamento de rios carregados de sedimentos em reservatórios.

A primeira parte dessa pesquisa, na qual está inserida esta dissertação, é o estudo de correntes de densidade conservativas. Essas correntes apresentam aspectos e características dinâmicas semelhantes as das correntes não conservativas. Por se tratarem de escoamentos sem a presença de processos de erosão e deposição de sedimentos, as correntes conservativas permitem uma análise dos parâmetros que afetam o seu movimento sem a influência dos processos de troca de sedimentos. Posteriormente, com a comparação da dinâmica de correntes conservativas e não conservativas, poderá se estabelecer, com mais precisão, a influência dos processos de erosão e deposição nessas correntes.

Inicialmente, a identificação dos principais parâmetros que atuam no escoamento pode ser feita a partir da análise das equações que definem esse tipo de escoamento. Entretanto, somente a simulação física dessas correntes permite avaliar qual a influência de cada um deles na definição de suas características geométricas (altura da cabeça, altura do corpo, entre outras) e dinâmica (velocidade de avanço da corrente e oscilações).

A importância do conhecimento da dinâmica das correntes de densidade conservativas reside na identificação de funções que estabeleçam a relação entre parâmetros/variáveis envolvidos no movimento, permitindo transpor os resultados experimentais para a realidade (protótipo).

2. OBJETIVOS

2.1 Geral

O objetivo principal deste trabalho é avaliar a dinâmica de correntes de densidade conservativas através de simulação em canal de declividade variável.

2.2 Específicos

Os objetivos específicos da análise da dinâmica das correntes de densidade conservativas são:

- * determinar os principais parâmetros que influenciam a dinâmica do escoamento de correntes de densidade conservativas. Identificar, na literatura, os parâmetros que regem o escoamento e avaliá-los num estudo inicial, procurando identificar qual a sua influência no escoamento da corrente;
- * adaptar uma metodologia de ensaios para a simulação das correntes de densidade em canal de declividade variável, a partir de metodologias verificadas na literatura para as condições de ensaio realizadas nessa pesquisa;
- * avaliar as modificações das características das correntes em diferentes condições de declividades, massa específica e volume inicial, verificando alterações da velocidade e da altura da cabeça da corrente;
- * testar a aplicabilidade de instrumentos que ajudem a avaliar a dinâmica da corrente. Para a medição de soluções salinas, que simulam a corrente de densidade, pretende-se utilizar sondas de condutividade na medição de concentração de correntes.

Para atingir estes objetivos foram delineados experimentos em duas escalas distintas de abordagem. Num primeiro momento, a simulação se fez em canal unidimensional visando conhecer os parâmetros que afetam a formação de correntes de densidade e implementar uma metodologia de ensaio. Numa segunda etapa, em canal bidimensional, foram discutidas as alterações/respostas da corrente de densidade a diferentes declividades.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. Descrição do Fenômeno

A corrente de densidade é um escoamento de um fluido mais denso imerso num fluido menos denso onde a principal força que atua sobre o escoamento é a diferença de pressão entre os fluidos. A corrente de densidade é formada por uma cabeça ou frente em forma de semi-elipse e um corpo que segue a cabeça. A figura 3.1 apresenta uma corrente de densidade escoando num plano horizontal, em que é possível perceber a cabeça e o corpo da corrente. A cabeça determina a dinâmica da corrente e depende de vários fatores como, por exemplo, a diferença de densidade com o fluido ambiente, o volume inicial da corrente e a declividade de fundo. A cabeça é a região onde ocorrem processos de mistura entre os dois fluidos. Um dos processos de mistura se dá através de turbilhões que se formam sobre a cabeça. A formação desses turbilhões pode ser comparada ao escoamento em uma camada de mistura. Simpson (1969) *apud* Simpson (1972) observou que os turbilhões podem gerar instabilidades de Kelvin-Helmholtz.

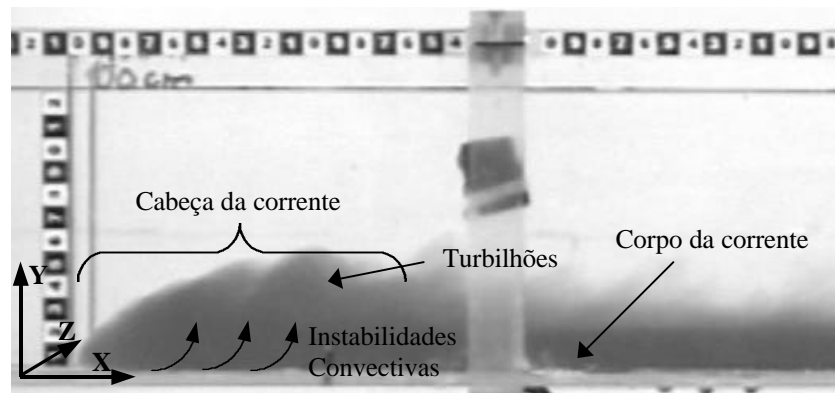


Figura 3.1 – Configuração de uma corrente de densidade

Na parte frontal de uma corrente há uma complexa configuração de lobos e fendas, indicando que o escoamento da corrente é tridimensional, ou seja, que na direção do eixo z as velocidades são significativas (Simpson, 1972). A figura 3.2 mostra uma vista frontal esquemática do escoamento onde ocorre o rompimento de um lobo. Essas estruturas também promovem o processo de mistura entre os fluidos. Elas são formadas através de instabilidades convectivas produzidas pelo fluido ambiente. Enquanto a corrente escoar, a cabeça da corrente passa por cima de uma pequena camada do fluido ambiente, provocando então, um fluxo ascendente deste fluido por dentro da cabeça da corrente, causando a mistura dos fluidos.

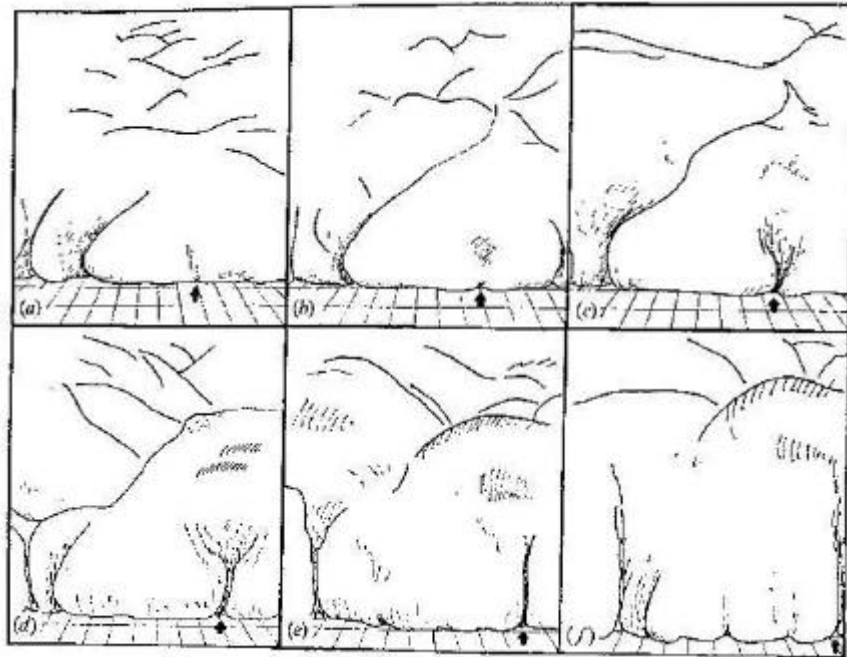


Figura 3.2 – Rompimento de um lobo e criação de um fenda
(Fonte: Simpson, 1972)

O corpo da corrente, que segue a cabeça, tem uma velocidade ligeiramente maior e altura menor que a cabeça. O corpo alimenta a cabeça com o fluido mais denso. No caso de escoamentos conservativos, os processos de mistura no corpo podem ser negligenciados, enquanto que na cabeça ocorrem os principais processos de mistura entre os fluidos.

A formação de correntes de densidade depende de algum agente que cause uma diferença de massa específica entre dois fluidos. Na natureza se observou que os principais agentes são a salinidade, a temperatura e partículas suspensas. Um exemplo de corrente de densidade pode ser o escoamento de um rio carregado de sedimentos que deságua em um reservatório. A diferença de massa específica entre a água do rio e do reservatório pode fazer com que o escoamento que chega não se misture diretamente, mas que percorra um longo caminho dentro do reservatório como uma corrente de densidade. Dois exemplos desse escoamento são apresentados por Chien e Wan, 1998: no final do século dezenove, cientistas suíços observaram que, em certas condições, quando os rios Roan e Ryan encontravam o lago Constance, as suas águas não se misturavam. A água dos rios que chegava fria e carregada de sedimentos encontrava a água do lago mais quente e limpa e, ao invés de se misturarem, continuavam mergulhando nas águas do lago como uma corrente. A barragem Hoover construída no rio Colorado, nos Estados Unidos, em 1935, tem um reservatório de 110 km de comprimento. Nas épocas de cheia foram observados escoamentos carregados de sedimentos que atravessaram todo o comprimento do reservatório como uma corrente de densidade,

chegando na barragem. Isso indica que as correntes de densidade podem carregar sedimentos por longas distâncias sem que haja uma mistura considerável com a água do ambiente.

Nos oceanos também foram observados escoamentos de correntes de densidade. Um dos primeiros eventos registrados ocorreu em 18 de novembro de 1929, quando um terremoto atingiu os Grandes Bancos na Nova Escócia. Durante as horas subseqüentes, 13 cabos de telégrafos foram rompidos nos *canyons* submarinos e no pé dos Grandes Bancos. Na plataforma continental não houve rompimento de cabos. Heezen e Ewing (1952) *apud* Selley (1988), atribuíram os rompimentos dos cabos a correntes de densidade formada por sedimentos em suspensão, também chamadas de correntes de turbidez. De acordo com a seqüência de tempo da quebra dos cabos, o escoamento atingiu velocidades de 100 km/h e cobriu uma área de aproximadamente 280.000 km². Após o evento foi encontrada nessa região uma camada plana formada por siltes bem graduados e limpos.

3.2 Aparato Experimental

O escoamento de correntes de densidade são tridimensionais, o que causa uma série de dificuldades no estudo de sua dinâmica. Por isso, nos estudos já realizados, os escoamentos são tratados de forma bidimensional, utilizando-se de alguns artifícios. Normalmente os canais têm largura pequena, sendo que os fenômenos que ocorrem na direção da largura do canal (eixo z) podem ser negligenciados. Uma estrutura bastante peculiar foi utilizada por Simpson e Britter (1979), para contornar o problema da tridimensionalidade, em que a corrente de densidade permanecia estacionária enquanto o fluido ambiente se movia contra a corrente. A figura 3.3 apresenta o aparato utilizado.

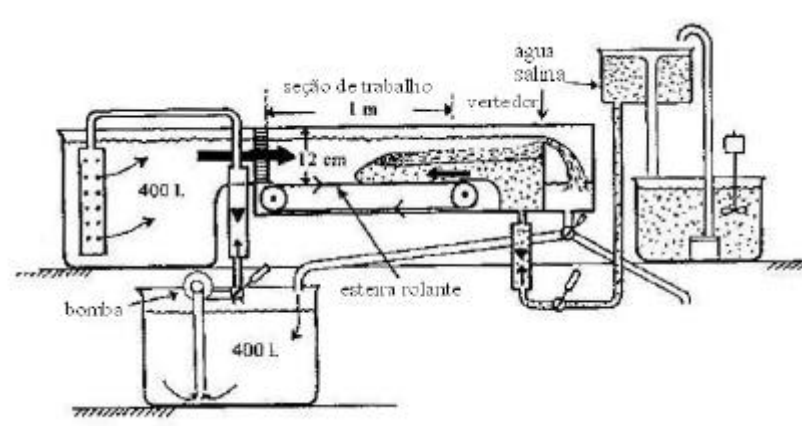


Figura 3.3 – Diagrama esquemático do equipamento

(Fonte: Simpson e Britter, 1979)

Mantendo a corrente de densidade estacionária, não ocorrem as instabilidades convectivas, pois a cabeça da corrente não passa sobre a camada do fluido ambiente. Assim as estruturas de lobos não são formadas na parte frontal da corrente e o desprendimento de turbilhões se torna regular, garantindo que o escoamento da corrente fosse bidimensional. Isso permitiu uma avaliação quantitativa do processo de mistura entre os fluidos ocasionado pelos turbilhões formados sobre a cabeça.

Outros estudos de correntes de densidade utilizaram, em sua maioria, canais em que a declividade podia ser variada. Nesses casos a simulação da corrente era feita lançando uma quantidade de fluido mais denso que o ambiente na parte inicial do canal, desenvolvendo-se o escoamento ao longo de seu comprimento. Alguns dos estudos que utilizaram esse tipo de aparato são os de Beghin *et al.* (1981), Britter e Linden (1980), Laval *et al.* (1988) entre outros. Para ilustrar o tipo de aparato utilizado nesses estudos podemos citar o de Laval *et al.* (1988) que possuía um comprimento de 4,00 m, largura de 0,20 m e altura de 0,35 m. Esse canal permanecia imerso num reservatório de água com 1,00 m de altura. A figura 3.4 apresenta o canal utilizado nesse estudo.

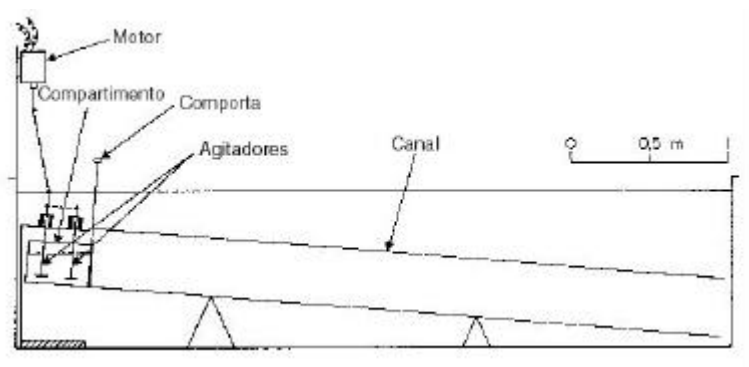


Figura 3.4 – Canal de declividade variável

(Fonte: Laval *et al.*, 1988)

A declividade é um parâmetro importante a ser avaliado, pois na natureza as correntes de densidade se desenvolvem em condições de declividades diferentes de 0° na maior parte do tempo. Nesses estudos pôde-se avaliar que a taxa de mistura entre os fluidos varia de acordo com a declividade, bem como a velocidade e a altura da cabeça da corrente.

A simulação das correntes de densidade em canais de declividade variável tiveram duas abordagens: escoamentos alimentados por uma vazão contínua do fluido mais denso, que aqui será chamado de ensaio de fluxo contínuo, e escoamentos formados pela liberação de um volume inicial pré-estabelecido de uma só vez, chamados de ensaios por pulso.

3.3 Dinâmica da Corrente de Densidade

A parte frontal de uma corrente gravitacional desempenha um papel bastante importante na dinâmica do escoamento. Algumas pesquisas foram realizadas caracterizando esse movimento, colocando como parâmetros principais de estudo: a altura da cabeça da corrente, a velocidade da cabeça e a diferença de densidade entre os fluidos.

Realizando ensaios por pulsos Huppert e Simpson (1980) estudaram o movimento inicial da corrente de densidade. Eles observaram que, ao liberar o fluido, forma-se uma corrente que pode passar por três estágios. Um primeiro estágio, onde ocorre a admissão abrupta do fluido, a corrente é retardada pelo contrafluxo formado pelo fluido ambiente. Em seguida ocorre um estágio puramente inercial, onde as forças de empuxo são balanceadas pelas forças inerciais. O terceiro estágio acontece também durante o desenvolvimento da corrente ao longo do canal quando as forças de empuxo são equilibradas pelas forças viscosas.

Britter & Linden (1980) avaliaram a velocidade da corrente em diversas condições de declividades. Utilizando ensaios com fluxo contínuo, observaram que acima de uma declividade crítica $\alpha_c > 0,5^\circ$, o escoamento era permanente. Entretanto, para o intervalo de declividades $0,5^\circ < \alpha < 5^\circ$, as forças de cisalhamento junto ao fundo tinham um papel importante no escoamento. Assim o escoamento da corrente terá velocidades distintas em declividades diferentes. Já para a faixa de declividades entre $5^\circ < \alpha < 90^\circ$ eles observaram que a velocidade da cabeça U_f é constante e proporcional à vazão unitária (Q), sendo a relação $U_f / (g'Q)^{1/3} = 1,5 \pm 0,2$, onde $g' = g \Delta\rho/\rho_a$. Outra observação é quanto à altura da corrente, que com o aumento da declividade, apresenta um crescimento da altura da cabeça. Isso se deve a dois efeitos: o fluido ambiente se mistura ao da cabeça da corrente aumentando seu tamanho e o corpo da corrente, tendo uma velocidade maior que a cabeça, fornece material para o crescimento da cabeça. A taxa de crescimento da cabeça, devido à mistura com o fluido ambiente é de aproximadamente um décimo para inclinação de 10° e dois terços para inclinação de 90° .

Outro parâmetro que influencia o escoamento da corrente é a relação entre as alturas da corrente de densidade (h_4) e da lâmina de água (h_1). Quando a relação h_4/h_1 é pequena o escoamento da corrente desloca o fluido ambiente, causando uma velocidade neste fluido no sentido contrário ao da corrente. Esse efeito é chamado de contraddeclividade do fluido ambiente e é representado na figura 3.5. A velocidade U do fluido ambiente representa o efeito da contraddeclividade na figura 3.5. Na simulação de correntes de densidade em laboratório deve se ter o cuidado de avaliar a influência desse efeito quando se pretende comparar com eventos naturais. Por exemplo, as correntes de turbidez que escoam no fundo

do oceano estão, na sua maioria, sob uma lâmina de água que varia entre 200 m a mais de 2000 m, não sofrendo influências significativas da contradeclividade.

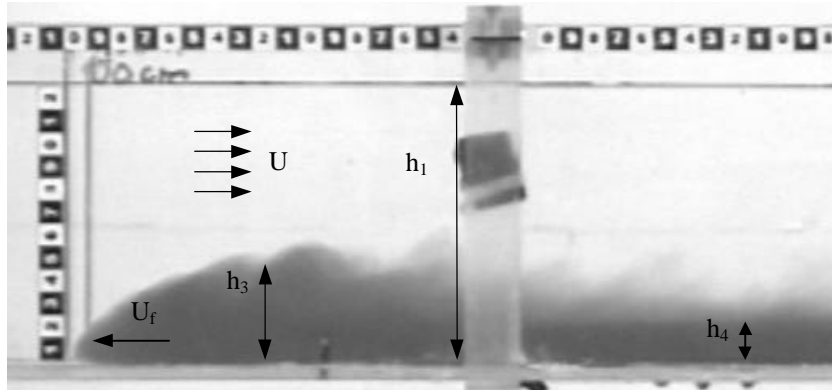


Figura 3.5 – Efeito da contradeclividade no escoamento da corrente de densidade

Em seu estudo, Simpson e Britter (1979) observaram que o valor do número de Froude Densimétrico (Fr') do escoamento de correntes de densidade varia para diferentes valores da relação de h_4/h_1 . A figura 3.6 apresenta os resultados dos ensaios realizados por eles. Os ensaios foram do tipo fluxo contínuo e por pulsos para declividade de 0° . O valor de Fr' diminui com o aumento da relação de h_4/h_1 variando entre $Fr' = 1,3$ para $h_4/h_1 \cong 0,05$ e $Fr' = 0,75$ para $h_4/h_1 \cong 0,3$. Onde $Fr' = \frac{U_f}{\sqrt{g'h_4}}$ e $g' = \frac{g\Delta r}{r_a}$.

$$Fr' = \frac{U_f}{\sqrt{g'h_4}} \text{ e } g' = \frac{g\Delta r}{r_a}.$$

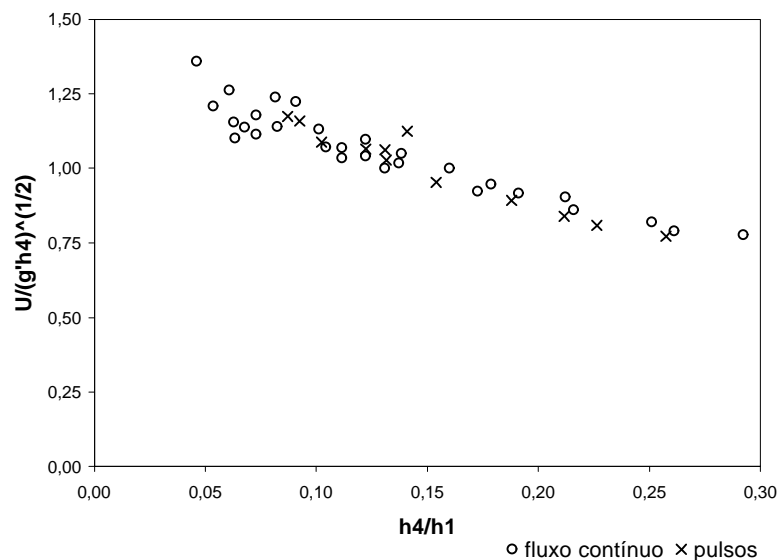


Figura 3.6 – Influência da contradeclividade no valor de Fr' de correntes de densidade

(Fonte: Simpson e Britter, 1979)

3.4 Estudo de Camada de Mistura

O processo de mistura que envolve a formação de turbilhões sobre a cabeça da corrente é um escoamento de uma camada de mistura. Cabe ressaltar que durante os ensaios realizados nessa pesquisa os processos de mistura não foram avaliados quantitativamente. Mas por se tratar de um processo importante e que influencia na dinâmica do escoamento, este item apresenta um breve estudo sobre o escoamento de camadas de mistura.

3.4.1 Estabilidade da Interface de Escoamentos Estratificados

O processo de mistura na interface pode se dar através de difusão turbulenta ou molecular, dependendo da condição de estabilidade da interface. A condição crítica, segundo Chien e Wan (1998) é dada pela equação (1):

$$\frac{U_c'}{\sqrt{g \frac{\Delta r}{r} \frac{I}{p}}} = \left[\frac{1}{2} \left(\tanh \frac{2ph}{I} + \tanh \frac{2ph'}{I} \right) \right]^{1/2} \quad (1)$$

onde: I = comprimento da onda na interface

h = altura da lâmina de água

h' = altura da corrente

Considerando o comprimento de onda pequeno a equação (1) pode ser simplificada para:

$$\frac{U_c'}{\sqrt{g \frac{\Delta r}{r} \frac{I}{p}}} = 1 \quad (2)$$

As equações (1) e (2) são apresentadas na figura 3.7:

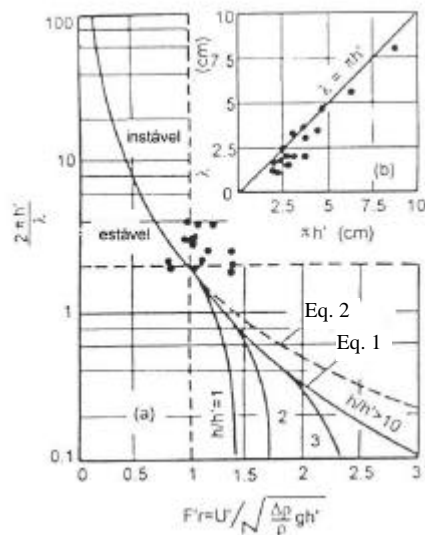


Figura 3.7 - Critério de estabilidade para ondas em interfaces de correntes de densidades.

(Fonte – Chien e Wan, 1998)

Os escoamentos da região à direita da curva são instáveis, com processo de difusão turbulenta, já para os escoamentos da região à esquerda da curva, a interface é estável e o processo de mistura ocorre por difusão molecular. Para casos de escoamentos supercríticos ($Fr' > 1$) a relação entre a altura da corrente e a altura da coluna d'água influencia no escoamento provocando algumas diferenças entre os resultados das equações (1) e (2).

Outra maneira de se avaliar a estabilidade na interface é através de uma análise pelo número de Richardson ($Ri = g'h/U_f^2$). A figura 3.8 apresenta o critério de estabilidade adotando diferentes perfis de distribuição de velocidade da corrente. Pode-se observar que para qualquer valor de Ri maior que 0,25 a interface permanece estável. No caso 3.8a foi adotada uma distribuição de velocidade linear. Para o caso 3.8b são utilizadas funções do tipo tangente hiperbólica e função distribuição erro. No caso de 3.8c repetem-se as funções de 3.8b mas considera-se a influência da relação entre a coluna de água e a altura da corrente (H/h_c). A ordenada a é definida como : $a = 0,5 \sqrt{k h'}$; onde $k = 2 p / l$.

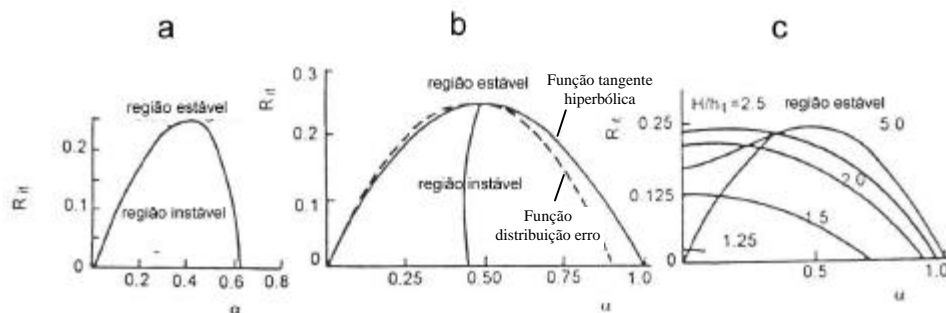


Figura 3.8 - Condição de estabilidade para diferentes distribuições de velocidade.

(Fonte – Chien e Wan, 1998)

3.4.2 Processos de mistura na interface - Camada de Mistura

O escoamento das correntes de densidade observadas na natureza, e em particular o objeto deste estudo, são turbulentos. O processo principal de mistura, para esse caso é a difusão turbulenta. Sobre a cabeça da corrente formam-se turbilhões semelhantes às instabilidades de Kelvin-Helmholtz que são responsáveis por parte da difusão turbulenta que ocorre. Uma outra parte da mistura se processa no interior da cabeça da corrente. A corrente quando se desloca incorpora uma quantidade de fluido ambiente na cabeça através dos lobos formados na parte frontal. A mistura dos dois fluidos, que é menos densa que o fluido da corrente e mais densa que o fluido do ambiente, sai da cabeça e forma uma camada sobre o corpo da corrente com um alto gradiente de concentração. Essa camada tem uma velocidade média igual a do corpo da corrente. Durante o processo de mistura entre os fluidos, o fluido ambiente vem de uma região de baixa velocidade e a mistura resultante apresenta uma velocidade igual a da corrente de densidade. Portanto, o fluido ambiente retira energia da cabeça da corrente para acelerar o fluido que se mistura. Essa ação retarda o movimento da cabeça da corrente de densidade e explica, em parte, a menor velocidade em relação ao corpo da corrente.

Os principais fatores que influenciam no processo de mistura são a velocidade da corrente, a inclinação da base e a diferença de massa específica. Portanto o número de Richardson (Ri) é importante nesse tipo de escoamento. Utiliza-se também o número de Froude Densimétrico (Fr') que tem a seguinte relação com o anterior: $Ri = 1/Fr'^2$. A viscosidade do fluido não tem grande influência no seu escoamento nos casos turbulentos [$Re = O(10^3)$]. Quando as velocidades são menores, as forças viscosas tornam-se importantes na dinâmica do escoamento e do processo de mistura e o escoamento fica dependendo do número de Reynolds (Keulegan, 1957 e Barr, 1967 *apud* Chien e Wan, 1998). Neste caso, a difusão molecular pode ser importante no processo de mistura entre os materiais.

3.5 Semelhança Física em Correntes de Densidade

A análise dimensional das equações que regem o escoamento das correntes de densidade permitem estabelecer quais são os principais fatores que influenciam na sua dinâmica. O conhecimento desses fatores permite estabelecer os números adimensionais que melhor representam esse escoamento. Os números adimensionais são importantes para a

comparação de resultados já que eles não dependem de uma unidade. Ensaio com formulações diferentes podem ser comparados com o emprego desses números.

Neste item são apresentados os fatores de maior importância para os escoamentos de densidade, inclusive para os casos de correntes não conservativas. A análise dimensional das equações que estabelecem o escoamento e a identificação desses fatores nas equações é apresentada com detalhes no Anexo 1: Análise Dimensional.

Segundo Middleton (1966), os principais fatores que influenciam no escoamento permanente e uniforme de correntes gravitacionais são: a diferença de massa específica entre os fluidos, expresso pelo termo $g' = g \frac{D\rho}{\rho}$; a velocidade média (U), a altura do escoamento (h), a declividade (\mathbf{a}) e o fator de perda de carga nas interfaces superiores e inferiores, (f_i, f_o). Considerando que f_i parece ser uma função do número de Reynolds, então a viscosidade cinemática, ν , também é importante.

Da análise dimensional tem-se:

$$f_1(g', U, h, \mathbf{a}, f_i, f_o, \nu) = 0 \quad (1)$$

ou

$$f_2\left(\frac{U}{\sqrt{g'h}}, \frac{Uh}{\nu}, \mathbf{a}, f_i, f_o\right) = 0 \quad (2)$$

O efeito do número de Reynolds é pequeno se comparado com o efeito do número de Froude, por isso ele é desprezado (Middleton, 1966). Então a equação (2) fica:

$$f_2\left(\frac{U}{\sqrt{g'h}}, \mathbf{a}, f_i, f_o\right) = 0 \quad (3)$$

A construção de modelos deve manter, portanto, identidade de cada um dos fatores adimensionais da equação (3) entre o modelo e o protótipo. Uma análise das leis gerais de semelhança para escoamentos não permanentes foi discutido por Keulegan (1951) *apud* Middleton (1966) o qual introduziu na relação de semelhança (3) um termo referente a escala de tempo (Ut/h).

Na modelagem de correntes de densidade não conservativas, a prática corrente de substituir sedimentos grossos por soluções salinas ou por partículas muito finas (argila)

introduz uma série de complicações. Portanto, outras variáveis devem ser incluídas na equação (3) para manter a identidade do comportamento dos sedimentos em suspensão. As mais importantes são o diâmetro (D), o coeficiente de uniformidade (\mathbf{s}), e a concentração (C) do sedimento.

Uma simplificação que é adotada em diversos estudos de sedimentos é a suposição que o comportamento hidrodinâmico do sedimento pode ser descrito por sua velocidade de queda (w) (Vergara, 1995). Assim a relação adimensional (3) pode ser escrita:

$$f_3 \left(\frac{U}{\sqrt{g'h}}, \mathbf{a}, f_i, f_o, \frac{w}{U}, \mathbf{s} \right) = 0 \quad (4)$$

Aceitando que na relação (4) estão representados os principais fatores determinantes do movimento, as seguintes observações sobre modelos de correntes de densidade devem ser realizadas (Middleton, 1966):

1. O número de Froude Densimétrico (ou número de Richardson) deve ser similar entre o modelo e o protótipo para assegurar semelhança entre os regimes de escoamento.
2. O fator de perda de carga entre a interface superior e a corrente devem ser aproximadamente iguais. Experimentos com soluções salinas sugerem que a resistência na interface diminui com o aumento do número de Reynolds.
3. Como o número de Froude deve ser mantido, a velocidade do modelo deve ser diminuída em relação a do protótipo. Supondo que a diferença de densidades permaneça a mesma, a escala de velocidades deve ser igual à raiz quadrada da escala de comprimento.
4. A velocidade de queda deve ter escala proporcional à velocidade média.
5. O coeficiente de distribuição e a concentração do sedimento têm efeito na velocidade de queda.

4. MÉTODOS E EQUIPAMENTOS

4.1 Introdução

Nesta pesquisa foram utilizados dois canais com diferentes escalas. Na primeira etapa de ensaios foi utilizado um canal de pequenas dimensões onde se desenvolveu a metodologia de ensaios e se estudou a influência de alguns parâmetros na dinâmica da corrente de densidade. Este canal é referido como canal unidimensional. A segunda etapa de ensaios foi realizada num canal de grandes dimensões com declividade variável. A corrente gerada no canal permitiu uma análise mais detalhada das características e da dinâmica da corrente de densidade. Este canal foi chamado de canal bidimensional. Nele também foram utilizadas sondas de condutividade, que foram desenvolvidas pelo Setor de Instrumentação do IPH durante essa pesquisa, para avaliar o perfil de concentração das correntes formadas.

4.2 Canal Unidimensional

4.2.1 Descrição Geral

Os primeiros ensaios simulando correntes de densidade foram conduzidos num canal de pequeno porte, sendo que aqui o escoamento foi considerado unidimensional (escoamento com pequena altura e largura). Esses ensaios tiveram como motivação um estudo preliminar para determinar algumas relações entre as características iniciais da solução e a dinâmica do escoamento. Os parâmetros variados foram o volume inicial e a massa específica da solução. O controle do escoamento foi feito através da determinação da velocidade e da altura da corrente.

As dimensões do canal utilizado são 2,955 m de comprimento; 0,125 m de largura e 0,150 m de altura, sendo construído em acrílico transparente, o que favorece a visualização do escoamento. O canal foi desenvolvido inicialmente para escoamento em circuito fechado e com declividade variável para demonstrar escoamentos fluviais subcríticos e supercríticos. Este canal já existente no laboratório do Instituto de Pesquisas Hidráulicas foi incorporada à pesquisa de correntes de densidade, sofrendo algumas modificações estruturais.

As características dos ensaios com correntes de densidade exigiram algumas adaptações no canal. O canal deveria ser fechado em suas extremidades permitindo seu enchimento com água e ainda deveria ser montada uma câmara inicial na parte montante do canal para receber uma solução salina mais densa que formaria a corrente de densidade. O canal funciona assim como um reservatório em que a corrente pode escoar ao longo de seu comprimento. A seguinte solução foi adotada para transformar o canal em um reservatório: os dois extremos do canal foram vedados por duas comportas de acrílico e uma terceira comporta forma uma câmara inicial onde a solução salina é injetada. A figura 4.1 mostra a configuração do canal de pequeno porte. As duas comportas que ficam nos extremos do canal têm em seu contorno, nos lados em contato com o canal, fitas de borracha de 2 mm de espessura por 10 mm de largura, fazendo sua vedação. Essas comportas também podem ser removidas facilitando a manutenção e o preparo dos ensaios no canal. A terceira comporta, colocada em seu lugar após o enchimento do canal com água, veda a câmara somente por contato com a parede do canal. Em sua parte superior, acima dos 10 cm de altura, esta comporta recebeu nove furos para equilibrar o nível entre a câmara inicial e o resto do canal enquanto a solução é injetada.

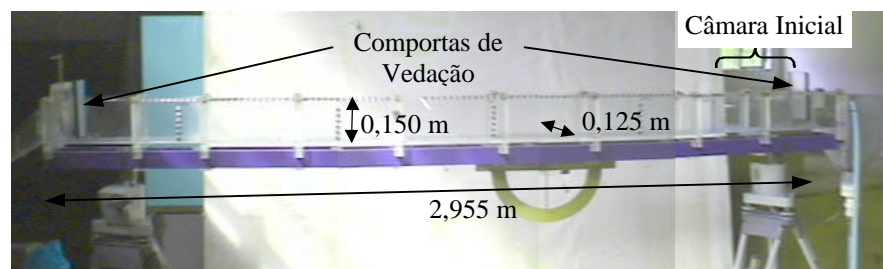


Figura 4.1 – Configuração do canal unidimensional

Com esta configuração, a distância livre para o escoamento da corrente no canal é de aproximadamente 2,00 m. Nas paredes do canal foram marcadas seções a cada 0,50 m para medição da velocidade da corrente. Os equipamentos utilizados para medir o tempo de deslocamento foram inicialmente um cronômetro analógico de dois ponteiros e, numa segunda etapa, uma filmadora. O cronômetro tem precisão de 0,20 s e permite a medição em apenas duas seções distintas num ensaio.

Numa segunda etapa o laboratório adquiriu uma filmadora que permitiu um grande avanço nas análises dos ensaios. As características da filmadora são tratadas no item 4.3. Com ela as medições de tempo de deslocamento puderam ser realizadas em diferentes seções do canal no mesmo ensaio. Outra vantagem da filmagem é que as imagens extraídas podem ser analisadas e tratadas através de programas computacionais. Com a anexação de uma escala de

comprimento ao canal, a análise pode ser estendida à avaliação da variação da altura da corrente durante o escoamento. A escala anexada é composta por uma seqüência numerada de quadrados, a cada 1 cm. Na figura 4.2 pode-se ver a escala de comprimento adotada e a marca de uma seção.

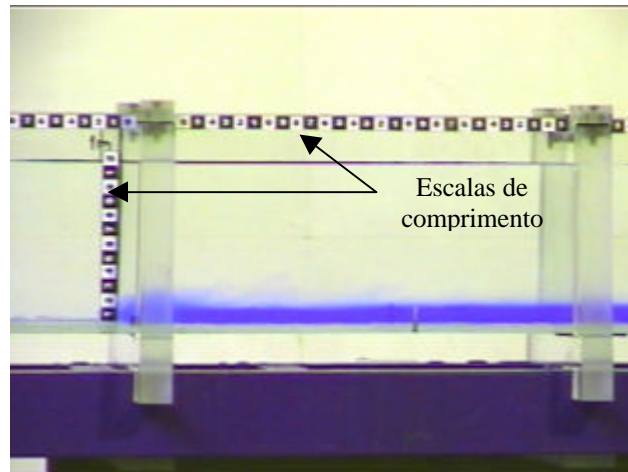


Figura 4.2 – Escalas de comprimento no canal unidimensional

4.2.2. Metodologia do Ensaio

Inicialmente foram realizados alguns testes para definir o material a ser utilizado para simular a corrente e também a forma de visualização dos ensaios. Como já havia sido definido que a análise dos ensaios seria feita através de filmagens, a preocupação inicial foi fazer uma avaliação de corantes a serem adicionados à solução salina. As características do corante procurado deveriam destacar o escoamento da corrente durante o ensaio e não modificar significativamente a massa específica da solução preparada previamente. Adotou-se uma solução salina para simular a corrente de densidade porque esta é a melhor forma de simular correntes conservativas, além de ter sido adotada em outras pesquisas (*e.g.* Britter e Linden 1980; Laval *et al.* 1988) mostrando bons resultados, e também pela facilidade de aquisição do material. A utilização de uma solução salina permite uma grande variação da massa específica antes que se atinja seu ponto de saturação. Os valores podem variar desde 998 kg/m^3 até mais de 1100 kg/m^3 com solubilização total do sal.

Os corantes testados foram azul de metileno, permanganato de potássio e corante de tinta PVA (várias cores). Durante esses testes, os corantes foram adicionados à solução salina e as correntes de densidade formadas no canal foram filmadas e comparadas entre si. O corante vermelho não apresentou um bom resultado, sendo que a cor resultante não apresentou contraste suficiente. Os corantes azul de metileno e o de tinta PVA azul

apresentaram bons resultados. Entre os dois o escolhido foi o corante de tinta PVA azul porque é de fácil aquisição, baixo custo e não tóxico.

A metodologia adotada para o ensaio foi a seguinte: primeiramente, a solução salina é preparada em recipiente separado num volume suficiente para realizar o ensaio pretendido em três repetições. Para a verificação da massa específica utiliza-se um densímetro flutuante, com precisão de 1 kg/m^3 . A adição do corante à solução salina é o passo seguinte do processo. A preparação do canal para o ensaio é a seguinte: inicialmente é verificada a declividade do canal e então se dá o enchimento com água. A terceira comporta que forma a câmara inicial é baixada e se inicia a injeção da solução. Nesse processo se utiliza funil e mangueira para injetar a solução pelo fundo da câmara tendo cuidado para que as velocidades sejam baixas evitando que os dois fluidos se misturem. Com a configuração do ensaio pronta, a comporta é acionada liberando a solução e iniciando o ensaio. O escoamento da corrente é acompanhado, então, através de filmagem, até atingir a seção de 2 m. No caso da primeira fase, quando foi utilizado o cronômetro de dois ponteiros, era marcado o tempo de passagem da corrente pelas seções de 1 m e 2 m. As imagens gravadas eram analisadas em computador para se obter o tempo de passagem da corrente e a altura da frente nas seções 0,5 m, 1,0 m, 1,5 m e 2,0 m.

4.2.3. Ensaio Realizados

Os ensaios realizados nessa fase tiveram como objetivo avaliar a influência de alguns parâmetros iniciais na dinâmica da corrente. Esses parâmetros foram a massa específica e o volume inicial da solução. O volume inicial foi variado de duas formas distintas: variação da relação h/H , sendo h – altura inicial da solução salina e H – nível de água, e variação do comprimento da câmara inicial. As relações de altura testadas durante os ensaios foram $h/H = 3/3$, $h/H = 2/3$, e $h/H = 1/3$. O comprimento inicial da câmara (l_i) foi variado de 7,5 cm, 15 cm, 25 cm, 30 cm e 40 cm. As massas específicas (ρ) da solução selecionadas para os ensaios foram 1010 kg/m^3 , 1020 kg/m^3 , 1030 kg/m^3 e 1045 kg/m^3 .

A figura 4.3 mostra a configuração inicial de um dos ensaios realizados. O comprimento da câmara inicial (l_i) é de 40 cm, a relação h/H é de $2/3$ e a solução salina utilizada tem massa específica de 1045 kg/m^3 .

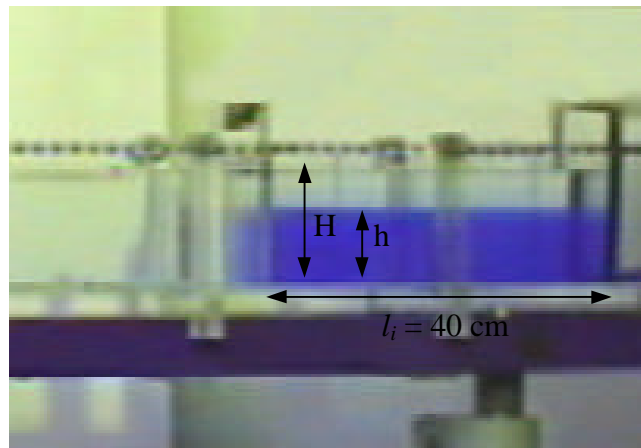


Figura 4.3 – Exemplo de configuração inicial de ensaio no canal unidimensional

O primeiro parâmetro a ser avaliado foi o comprimento da câmara inicial. Pretendia-se verificar o volume da câmara que permitisse gerar uma corrente com regime permanente. A massa específica da solução para esses ensaios foi de 1045 kg/m^3 e a relação de altura foi fixada em $h/H = 2/3$, resultando em 4 ensaios com quatro repetições. A relação de altura $h/H = 2/3$ foi escolhida por permitir uma visualização melhor da corrente que para $h/H = 1/3$ e por ter menos efeito da contradeclividade no escoamento que para $h/H = 3/3$. Nessa primeira etapa foi utilizado somente o cronômetro de dois ponteiros para fazer a aquisição de dados.

A etapa seguinte foi avaliar a influência da relação de altura h/H . Assim se fixou o comprimento da câmara em $0,40 \text{ m}$ e a massa específica em 1045 kg/m^3 , resultando em três ensaios com três repetições em cada um. A terceira etapa foi variar a massa específica da solução mantendo o volume inicial constante. O comprimento da câmara foi fixado em $0,40 \text{ m}$ e a relação de altura foi $h/H = 2/3$.

4.2.4. Vantagens e Desvantagens do Canal Unidimensional

Devido a suas dimensões, o canal apresenta uma boa versatilidade podendo-se mudar as configurações iniciais do ensaio rapidamente. A agilidade no preparo dos ensaios também é um ponto a favor desse canal. Porém, o canal apresenta algumas desvantagens: o nível máximo de água é pequeno o que ocasiona uma interferência no escoamento da corrente (contradeclividade da linha de água). Apesar da possibilidade de variar a declividade do canal, um aumento na declividade causaria uma diminuição significativa no nível máximo de água no canal. Por isso os ensaios foram realizados com declividade nula. A dimensão da corrente formada no canal conjugada com a técnica de visualização utilizada através de filmagem da

corrente, não proporcionou a apreciação de detalhes do escoamento, como por exemplo a observação de desprendimento de turbilhões da cabeça da corrente.

4.3 Canal Bidimensional

4.3.1 Descrição Geral

A primeira etapa desta pesquisa foi o estudo de correntes de densidade em canal de escoamento unidimensional. A etapa seguinte no desenvolvimento da pesquisa foram estudos em canal com escoamento bidimensional.

A estrutura física idealizada para a segunda etapa da pesquisa foi a de um canal de grande porte com declividade ajustável que permite os estudos de correntes bidimensionais conservativas e não conservativas.

O canal projetado tinha que apresentar dimensões compatíveis com o nível do detalhamento requerido para a avaliação da dinâmica do escoamento das correntes de densidade. Por isso sua concepção foi de dimensões grandes, para um canal de declividade variável, e que apresentasse também uma boa operacionalidade. Para a concepção do canal também se levou em conta a análise dimensional apresentada no Anexo 1 – Análise Dimensional e que mostrou que um dos parâmetros que influenciam o escoamento das correntes de densidade é a contradclividade. A influência é maior quando a altura da corrente (h) é mais próximo da altura do fluido ambiente (H), causando uma velocidade relativa maior na interface da corrente, que a velocidade observada na frente da corrente, já que o fluido ambiente escoava no sentido contrário, influenciando o escoamento da corrente. Quando h é pequeno em relação a H , a contradclividade não apresenta uma influência significativa. Como as correntes de densidade formadas nos oceanos não sofrem influência significativa da contradclividade, essa característica deve ser representada em laboratório, portanto a altura do canal deve ser suficiente para que esse efeito não seja significativo.

A estrutura de suporte do canal é uma treliça metálica formada por barras de perfil L de 40 mm x 40 mm e espessura de 4 mm. O comprimento total da treliça é de 5,45 cm e sua altura é de 50 cm. Essa estrutura foi dimensionada para minimizar as deformações do canal quando completamente cheio de água. A treliça metálica é apoiada apenas em dois pontos, permitindo a variação de sua declividade. Um dos apoios é um cavalete metálico, fixo ao chão, que apoia a treliça através de um eixo de rotação. O outro ponto de apoio é formado por

um parafuso de diâmetro igual a 2,54 cm em sua extremidade superior. A estrutura de suporte do parafuso permite levantar ou baixar o canal, variando a declividade.

Nas laterais da treliça foram fixadas, por solda, barras metálicas de perfil I com dimensões de 150 cm de comprimento e seção transversal com alma de 80 mm; abas com 60 mm e espessura de 4 mm. Esses perfis servem de apoio aos vidros que formam a parede do canal.

Na parte jusante da treliça foi colocada uma câmara de dissipação, para que o escoamento que atinge o final do canal não perturbe aquele ainda remanescente. Essa câmara é formada por chapas metálicas e tem dimensões iguais a 1,00 m de comprimento; 2,00 m de altura e 0,47 m de largura. O fundo dessa câmara está 1,00 m abaixo do fundo do canal sendo que a parte superior dessa câmara coincide com a altura do canal. Nas laterais e na parte oposta ao canal existem janelas de vidro que permitem a visualização do escoamento.

Na parte montante do canal, entre o primeiro e o segundo perfil I, foi instalada uma comporta, formando uma câmara inicial, onde a solução salina é injetada. Das análises feitas no canal de acrílico, verificou-se que o volume da câmara inicial do canal metálico era insuficiente. Para atender essa necessidade foi anexada uma caixa metálica a parte montante do canal. Essa caixa metálica tem dimensões de 1,00 m de comprimento; 0,90 m de altura e 0,40 m de largura. Após essa modificação a câmara inicial aumentou seu comprimento de 0,45 m para 1,45 m.

Internamente o canal tem fundo e paredes de vidro. As placas de vidro que formam o fundo estão niveladas e são apoiadas sobre a treliça metálica através de uma camada de silicone. Além de suporte, o silicone atua como vedação entre as placas. As juntas entre as placas de vidro foram cuidadosamente alisadas para ter mínima influência no escoamento. As placas de vidro da parede são apoiadas nos perfis I também com uma camada de silicone. A figura 4.4 apresenta uma vista geral do canal utilizado na pesquisa.

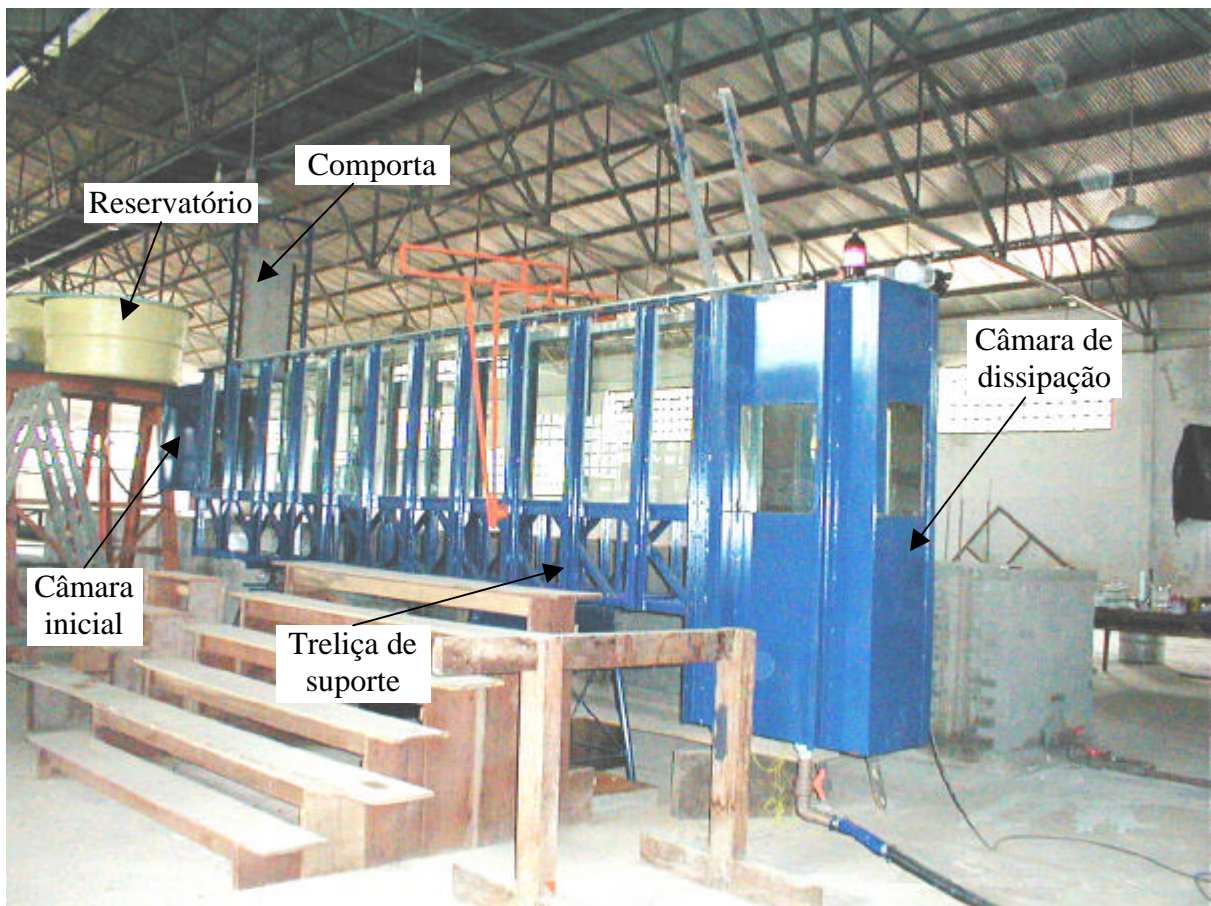


Figura 4.4 – Vista geral do canal para escoamento bidimensional e declividade variável

A comporta utilizada para separar a câmara inicial é uma chapa metálica de aço inoxidável. Em sua parte superior é presa por um cabo de aço. O sistema de acionamento da comporta é automatizado. Um motor elétrico ligado a um inversor de frequências controla a velocidade do movimento da comporta. Ainda um controle remoto foi desenvolvido pelo Setor de Instrumentação do IPH e acoplado ao inversor. O controle possui três comandos: acionamento do movimento; controle de velocidade e chave seletora que controla o sentido do movimento da comporta. O sistema automatizado de acionamento da comporta é de grande importância para garantir a repetibilidade nos ensaios. O sistema mecânico ligado ao motor elétrico consiste em um parafuso de 1,00 m de comprimento e um carro que se movimenta dentro de trilhos. Através de um sistema de polias e cabo, o sistema pode movimentar a comporta. Como uma das polias é ligada diretamente ao carro, a velocidade com que a comporta é movimentada é duas vezes a velocidade do carro. A figura 4.5 mostra o sistema de acionamento da comporta.



Figura 4.5 – Sistema de acionamento da comporta

Durante a concepção do canal também preocupou-se em montar uma estrutura para facilitar a filmagem. A idéia foi de colocar um carro sobre trilhos controlado automaticamente. Esse carro foi montado sobre o canal. A estrutura corresponde a um carro metálico que desliza sobre trilhos conduzido por um conjunto mecânico semelhante àquele utilizado na comporta. De um lado o carro possui quatro rolamentos que são apoiados sobre um trilho cilíndrico. O outro lado é conectado diretamente a um parafuso que se estende por todo o canal. Um motor elétrico ligado ao parafuso controla o movimento do carro metálico. Outro inversor de frequência com controle remoto é utilizado para controlar a velocidade do equipamento. A velocidade que o carro pode atingir é de aproximadamente 25 cm/s e que se mostrou suficiente durante os testes preliminares. Com a câmera conectada ao carro metálico a filmagem se dá de uma vista superior. Unido ao carro metálico está um braço que se projeta para o lado do canal. O braço permite filmagens num plano perpendicular ao movimento da corrente de densidade sendo outra opção para a análise do escoamento. O braço permite o ajuste de altura da câmara em relação ao fundo do canal e também a distância entre a câmara e a parede do canal possibilitando um melhor ajuste da posição de filmagem.

A alimentação do canal se dá de duas formas distintas. Há uma alimentação de água potável e outra de solução salina. A água potável é utilizada para encher o canal e simular o

fluido ambiente. A solução é injetada no canal após o enchimento e simula a corrente de densidade. O enchimento do canal é feito através de bombeamento de água captada no reservatório do laboratório. A tubulação de adução está conectada ao fundo da câmara de dissipação. O volume necessário para o enchimento do canal varia, conforme a declividade, entre $3,5 \text{ m}^3$ e $4,0 \text{ m}^3$. O tempo de enchimento é de aproximadamente 25 minutos.

A estrutura montada para o preparo e armazenamento da solução salina consiste em quatro reservatórios de 1 m^3 . Eles são interligados através de tubulações mas podem ser operados separadamente. Os reservatórios são apoiados sobre dois cavaletes metálicos de 2,80 m de altura, ficando acima do nível do canal. A solução preparada pode, portanto, ser injetada na câmara inicial por gravidade. A configuração de quatro reservatórios permite agilidade no preparo dos ensaios, podendo se preparar soluções de massa específica distintas e volume suficiente para repetir os ensaios com a mesma solução salina.

4.3.2 Metodologia dos Ensaios

A metodologia de estudo da dinâmica do escoamento foi semelhante à adotada nos ensaios do canal unidimensional e se baseou na observação e análise do escoamento das correntes através da variação de parâmetros. Os parâmetros que foram variados no estudo do canal bidimensional foram a massa específica da corrente, a declividade de fundo e o volume inicial da solução salina.

Os procedimentos para o ensaio começavam com a preparação da solução salina utilizada para simular a corrente de densidade. A solução era preparada nos reservatórios elevados. A massa específica necessária para os ensaios era conseguida adicionando-se sal numa quantidade aproximada em peso. A figura 4.6 mostra a relação de sal adicionado à água potável e a massa específica resultante conseguida experimentalmente.

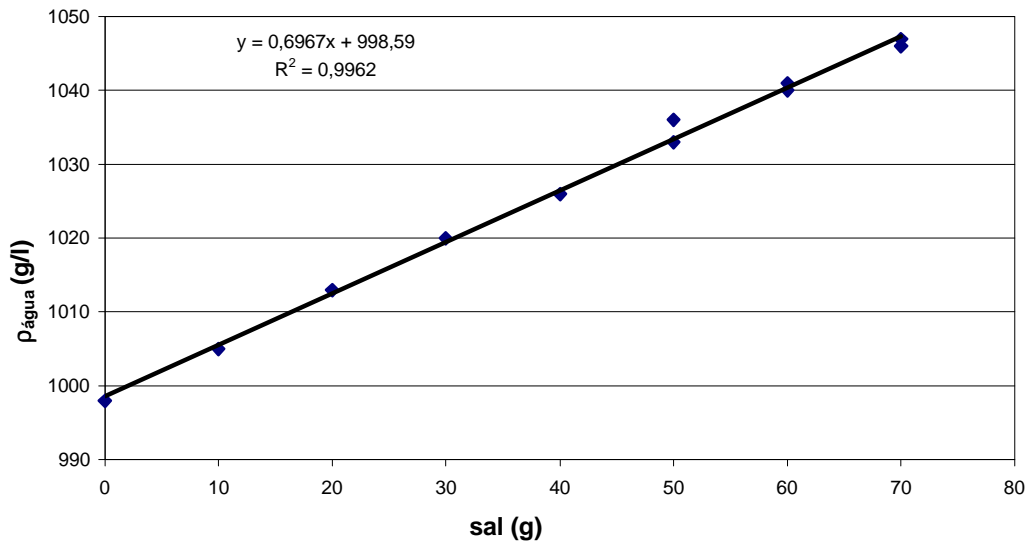


Figura 4.6 – Relação de sal (g) e ρ da solução salina (kg/m^3)

A verificação da massa específica da solução foi feita com densímetro flutuante. O corante era adicionado posteriormente até se chegar numa tonalidade considerada adequada. Essa tonalidade era atingida quando o acréscimo de corante não a mudava significativamente. O volume de solução salina preparada era de aproximadamente 700 L, garantindo uma quantidade suficiente para a repetição dos ensaios com mesma massa específica.

O passo seguinte era preparar o canal para receber a água e a solução. Inicialmente a declividade do canal era ajustada com a ajuda de um nível. Após o ajuste da declividade, o canal era enchido com água proveniente do reservatório do laboratório. A comporta do canal permanecia aberta durante o enchimento. Quando o nível de água atingia a marca determinada, a bomba era desligada e o registro na entrada do canal fechado. Nesse momento a comporta era baixada e se iniciava a injeção da solução salina na câmara inicial. A solução salina entrava com vazões bastante baixas ($\sim 0,06$ L/s) para haver o mínimo possível de trocas com o fluido ambiente. Durante o processo de enchimento a filmadora era posicionada e o ensaio identificado através de uma claquete.

Outro aparato utilizado para acompanhar o desenvolvimento do escoamento da corrente de densidade foram as sondas de condutividade. Elas foram instaladas em três seções do canal. A finalidade das sondas era medir o perfil de concentração e avaliar o processo de mistura na cabeça da corrente.

Antes de iniciar o ensaio, as sondas de condutividade eram testadas e preparadas para o início da aquisição. Assim, o ensaio estava pronto para ser realizado. As sondas de condutividade eram acionadas, a câmera iniciava a filmagem e então se procedia o levantamento da comporta. A corrente formada era acompanhada pela filmagem até atingir a

câmara de dissipação quando o ensaio era dado como encerrado. As sondas eram então desativadas permitindo a transferência dos dados para computador.

4.3.3 Ensaio Realizados

Durante os ensaios no canal unidimensional se observou que a contradeclividade estava influenciando o escoamento. Isso se deve a pequena altura do canal. As correntes formadas nele apresentavam uma relação de altura h/H considerável, principalmente para os ensaios com relações iniciais de altura de $h/H = 3/3$. Mesmo na relação $h/H = 2/3$ ainda se verificou um pouco de influência. O canal bidimensional foi construído com uma altura suficiente para simular as correntes sem o efeito da contradeclividade. Os ensaios programados para o canal de grande porte tiveram uma relação inicial h/H variando entre $1/6$ e $1/5$ conforme a declividade adotada.

Para a massa específica os valores adotados foram dois: 1010 kg/m^3 e 1022 kg/m^3 . O primeiro valor foi adotado para representar uma corrente com baixa massa específica. Valores menores também foram testados durante os ensaios no canal de pequeno porte, mas apresentaram um processo de troca com o fluido ambiente mais acentuada no momento da injeção na câmara inicial. Essa mistura causava uma perda no controle dos parâmetros do ensaio, já que a massa específica era reduzida com a mistura. Com $r = 1010 \text{ kg/m}^3$ ou superiores o processo de troca era reduzido garantindo a manutenção das características iniciais. A formação de uma superfície de separação bem definida para esse caso, era um indício que o processo de troca de fluidos era minimizado. A solução salina de $r = 1022 \text{ kg/m}^3$ foi adotada para representar uma corrente de densidade maior. Valores maiores também foram testados durante os ensaios em canal unidimensional chegando a $r = 1100 \text{ kg/m}^3$. Na natureza se verificam correntes de turbidez que alcançam mais de 1100 kg/m^3 (Bagnold, 1962 *apud* Mulder e Alexander, 2001) porém para esses ensaios, a adoção de valores muito altos deixaria um intervalo muito grande nas avaliações, de onde se explica a adoção do valor de $r = 1022 \text{ kg/m}^3$.

A declividade, outro fator considerado nos ensaios, foi variada entre $-0,5^\circ$ e 4° . No total foram 6 declividades testadas ($-0,5^\circ$; 0° ; 1° ; 2° ; 3° e 4°). A declividade de $-0,5^\circ$ foi adotada para verificar o comportamento da corrente em rampas ascendentes. Como a declividade média dos taludes nos oceanos onde ocorrem as correntes de turbidez é de 4° , os valores adotados permitem representar bem as considerações naturais.

Por fim, foi estudada a influência do volume inicial no comportamento da corrente. No canal de pequeno porte já haviam sido realizados ensaios com esse enfoque, mas agora pôde-se garantir a não influência da contradeclividade da linha de água. A variação do volume se deu através da variação da altura inicial da corrente.

Portanto, os ensaios realizados no canal de grande porte tiveram as seguintes configurações: variação da declividade $-0,5^\circ$; 0° ; 1° ; 2° ; 3° e 4° , cada um com soluções de $r = 1010 \text{ kg/m}^3$ e $r = 1022 \text{ kg/m}^3$ e três repetições. Os ensaios seguintes para avaliar a influência do volume inicial tiveram a seguinte configuração: declividade 2° e $r = 1022 \text{ kg/m}^3$. Os volumes iniciais da solução salina utilizados foram 72 L e 55 L, o que representam uma altura junto a comporta de 0,15 m e 0,12 m, respectivamente. Também para esse caso foram feitas três repetições.

A análise dos ensaios foi baseada nas informações coletadas pela filmagem e sondas de condutividade. As sondas foram instaladas em três seções do canal (2 m, 3 m e 4 m). A primeira sonda é formada por dois conjuntos de oito sensores com uma altura total de 30 cm. Nas segunda e terceira seções, as sondas são simples (8 sensores) e têm 15 cm de altura. Elas foram instaladas no meio do canal (20 cm da parede) apoiadas sobre o fundo. O sinal que as sondas captam se referem, portanto, à parte central da corrente de densidade. As informações fornecidas pela sonda de condutividade são valores que variam numa escada de 1 a 1024. Num processo de calibração, as soluções salinas com massa específica conhecida são relacionadas com os dados de saída das sondas formando curvas de calibração. No item 4.4 – Sondas de Condutividade, a descrição e o funcionamento das sondas de condutividade são tratados mais detalhadamente.

Para fazer a filmagem dos ensaios foram testadas algumas configurações. Inicialmente, a câmera foi instalada no braço conectado ao carrinho que percorre o canal. Os testes mostraram que a filmagem estava muito próxima do canal. Por isso o *zoom* tinha de ser afastado o máximo possível para visualizar a corrente. Colocado desse modo o *zoom* causa uma distorção na imagem; no centro a imagem é maior do que nas bordas, causando uma deformação ovalada. Outro problema verificado foram vibrações no braço durante o movimento do carro. Por causa desses problemas uma outra configuração foi montada. A câmera foi instalada num ponto fixo e o acompanhamento do escoamento foi feito girando-se a câmera. Para diminuir o erro de paralaxe causado nos ângulos de giro diferentes de 90° , o ponto escolhido foi o mais afastado possível do canal, tendo como limitador as dimensões físicas do laboratório. O local escolhido ficou a 17 m de distância do canal. A câmera foi instalada sobre um tripé nivelado formando um ângulo de 90° com a seção 2,75 m do canal. O ângulo de giro da câmera é de aproximadamente 18° (9° para a direita e 9° para a esquerda do

eixo). Essa configuração ficou mais adequada, apesar do erro induzido pela paralaxe, tendo sido adotada para os ensaios no canal bidimensional. No item 4.5 – Sistema de Aquisição e Tratamento de Imagens, a metodologia de filmagem, a descrição dos aparelhos utilizados e as análises realizadas sobre as imagens são tratadas com mais detalhes.

4.4 Sondas de Condutividade

As sondas de condutividade foram utilizadas nos ensaios para tentar relacionar a condutividade da solução salina com sua concentração. Partindo da idéia que a quantidade de íons livres na solução salina determina uma certa condutividade, é possível estabelecer uma correlação da concentração da solução com a condutividade medida. Então foram desenvolvidas, durante a pesquisa, sondas de condutividade para determinar o perfil de concentração da corrente de densidade. O desenvolvimento das sondas ocorreu junto ao Setor de Instrumentação do IPH. Até se chegar numa configuração final de *hardware* e *software*, foram implementadas várias modificações nas sondas de condutividade. Essa fase de desenvolvimento, bem como os detalhes de funcionamento, são apresentados no Anexo II – Desenvolvimento das Sondas de Condutividade.

Neste item serão abordadas a metodologia aplicada ao uso das sondas e uma breve descrição do aparelho e seu funcionamento.

4.4.1 Descrição e Funcionamento do Aparelho

O aparelho é formado por quatro sondas, uma placa de aquisição de dados e uma fonte de alimentação. Duas das sondas estão acopladas formando uma peça única, portanto é possível medir simultaneamente três seções distintas. Cada sonda é formada por oito sensores dispostos a 2 cm um do outro. O sensor número 1 (primeiro de baixo para cima) está a 1 cm de altura e o sensor número oito a 15 cm. Na sonda dupla a altura total dos dezesseis sensores é de 30 cm. Cada sensor consiste em dois pinos metálicos separados por uma distância fixa e que ficam em contato com o fluido ambiente.

A placa de aquisição, além de registrar os dados, tem a função de controlar o aparelho. A placa induz uma corrente elétrica entre os pinos metálicos atravessando a solução entre eles. Enquanto a corrente elétrica é transmitida pela solução ela se comporta como uma resistência variável que depende da concentração. Então através da medida da queda de

tensão na resistência interna do aparelho, através de um conversor A/D (analógico/digital), é possível determinar a resistência equivalente da solução e assim correlacioná-la a sua concentração. A placa adquire os dados a uma taxa de 5 aquisições por segundo para cada sensor. Considerando que as quatro sondas possuem oito sensores cada, são feitas 160 aquisições por segundo.

4.4.2 Metodologia

A utilização das sondas nos ensaios pode ser dividida em duas etapas. A primeira foi realizada com os ensaios de: $\rho = 1010 \text{ kg/m}^3$ e $\alpha = 0^\circ, 2^\circ$ e 4° e a segunda etapa para os ensaios de mesma massa específica e declividades de $\alpha = -0,5^\circ, 1^\circ$ e 3° . Entre a primeira e segunda etapas as sondas foram modificadas com o acréscimo de um *booster* no circuito da placa de aquisição. O *booster* produz uma corrente elétrica mais intensa e com menos oscilações, função exercida anteriormente pelo microprocessador da placa. Essa mudança foi necessária porque os ensaios da primeira etapa apresentaram oscilações nos resultados das sondas que impossibilitaram sua correlação com a calibração realizada. Já para a segunda etapa, o melhor funcionamento das sondas permitiu a correlação dos dados obtidos com a massa específica da solução salina. O desenvolvimento realizado nas sondas de condutividade são apresentados com mais detalhes no Anexo 2 – Desenvolvimento de Sondas de Condutividade.

Os dados adquiridos pelas sondas são valores que variam numa faixa de 1 a 1024. Os valores apresentados pelo conversor A/D não apresentam unidades de condutividade (Siemens/cm), mas sim uma escala relativa sendo que o aumento da condutividade representa um aumento na faixa de resposta. Para relacionar esses valores com a concentração da solução é necessário estabelecer uma calibração das sondas para a faixa de concentrações utilizadas.

A calibração das sondas foi feita relacionando-se os dados de saída com a medição de soluções com massa específica conhecidas na faixa de valores em que os ensaios se realizaram. O procedimento de calibração das sondas é descrito a seguir: a solução era preparada sendo que o parâmetro de controle era a massa específica. Com a utilização de um densímetro flutuante se adicionava uma quantidade estimada de sal na solução para se obter um valor de massa específica desejado. A figura 4.6 relaciona a massa específica obtida com o acréscimo em peso de uma quantidade de sal. Após a preparação da solução, ela era repartida em três provetas de 1 L. As sondas eram posicionadas separadamente nas provetas para evitar interferência durante a aquisição dos dados, estando totalmente imersas na solução. Os dados eram adquiridos por aproximadamente 60 s, o que representa um total de

300 aquisições por sensor. Essas informações eram transmitidas para uma planilha eletrônica, aonde se fazia uma análise estatística (média e desvio padrão). Assim a calibração se procedeu com soluções variando entre $r = 998 \text{ kg/m}^3$ e 1037 kg/m^3 . Ao final foram elaboradas curvas de calibração específicas para cada um dos 32 sensores que compõem as quatro sondas. A figura 4.7 apresenta as curvas de calibração para as quatro sondas. Cada sensor está indicado pela letra *S*, o número da sonda a qual pertence e a ordem em relação a altura em que está. Por exemplo, o sensor *S23* é o terceiro, de baixo para cima da sonda 2.

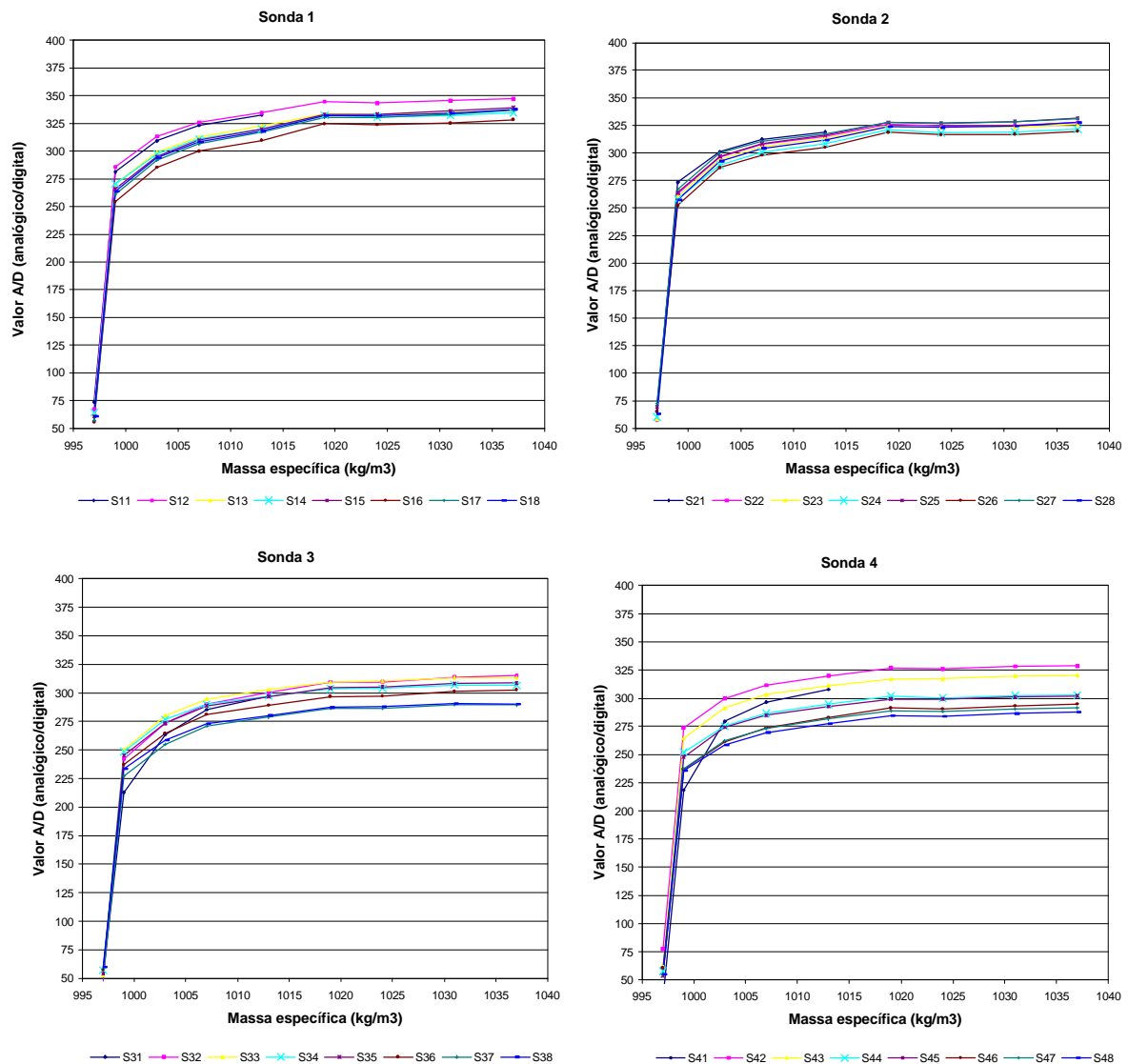


Figura 4.7 - Gráficos de calibração utilizados para os ensaios $-0,5^\circ$, 1° e 3° e $r = 1010 \text{ kg/m}^3$

Durante a calibração se verificou que os sensores S11, S21, S31 e S41 apresentaram problemas para as massas específicas superiores a 1013 kg/m^3 com fortes oscilações dos resultados, por isso as curvas de calibração desses sensores são apresentadas apenas até

1013 kg/m³. A provável causa do problema apresentado é a oxidação dos sensores pelo rompimento do banho de ouro.

A faixa de maior precisão das sondas de condutividade está entre 998 kg/m³ (água pura) e solução salina de 1001 kg/m³. Entre a faixa de 1001 kg/m³ e 1020 kg/m³ há uma gradativa redução da sensibilidade nas respostas e para soluções salinas superiores a 1020 kg/m³ apresentaram perda na precisão, permanecendo praticamente estáveis com o aumento da massa específica. Por isso os ensaios avaliados com as sondas de condutividade foram aqueles com massa específica inicial de 1010 kg/m³.

4.5 Sistema de Aquisição e Tratamento de Imagens

A análise principal dos ensaios foi baseada no uso de um sistema de aquisição e tratamento de imagens. Essa metodologia se baseia em filmar os ensaios e transferi-los para o computador para que as imagens sejam analisadas. Por isso, durante a fase inicial do projeto, foi prevista a compra de equipamento para viabilizar esse método. Foram adquiridos um computador e uma câmera para as filmagens. Aproveitando um novo padrão de filmagem lançado no mercado há pouco tempo, a câmera escolhida grava o vídeo em formato digital. A câmera digital possui um circuito interno que comprime a imagem antes dela ser gravada na fita digital. O *codec* padrão (método de codificação de imagem) é o DV. Esse sistema mantém todas as informações da imagem, diferente de outros sistemas que tentam economizar memória, como o M-JPEG, que eliminam partes da imagem. Assim a transferência de informações da câmera para o PC não sofre perdas inerentes ao processo de transformação analógico-digital. Isso é de grande importância na análise, já que a perda de quadros durante a transferência poderia prejudicar de forma significativa os resultados obtidos.

A filmadora escolhida para desempenhar essa função foi uma *SONY* modelo *TRV 110* que utiliza fitas do formato Hi 8 mm. As características das imagens gravadas são as seguintes: 30 quadros por segundo, padrão de vídeo NTSC e resolução de imagem de 720 x 480 linhas. Uma peculiaridade das imagens gravadas nesse sistema é que os pontos que formam a imagem não são quadrados. A relação da altura e largura do ponto é de 0,9, ou seja, a largura do ponto é igual a 0,9 vezes a altura (0,9 x 1,0). Portanto o tamanho da imagem gerada (720 x 480) equivale a 648 x 480 linhas quando comparadas a imagens de pontos quadrados (1,0 x 1,0) A câmera ainda possui zoom ótico de 20 vezes e zoom digital de 360 vezes. Durante a pesquisa teve-se o cuidado de utilizar apenas o zoom ótico garantindo assim que não haveria perda de qualidade nas imagens. O zoom digital amplia a imagem

umentando o tamanho dos pontos que a formam o que ocasiona uma perda de qualidade. Outra característica da filmadora é a capacidade de filmar com baixa luminosidade. Através de um sistema de infravermelho é possível filmar com luminosidade zero (0 lux), mas nesse caso a imagem fica comprometida para utilizá-la em estudo científico. Apesar dessa capacidade, durante os ensaios teve-se um cuidado especial com a iluminação, para garantir uma boa qualidade das imagens.

Para controlar a luminosidade foi necessário identificar todas as fontes luminosas externas e verificar a interferência sobre o canal. As janelas do laboratório que causavam reflexos nos vidros do canal foram cobertas com lonas plásticas pretas. O passo seguinte foi criar uma fonte luminosa controlada sobre o canal. Foram instaladas três lâmpadas de vapor de mercúrio de 500 W em luminárias circulares, com espaçamento de 1,50 m e a uma altura de 1,50 m acima do canal. Com a fonte luminosa controlada os reflexos foram eliminados e a visualização melhorou. No lado oposto do canal ao da visualização, foi instalado um fundo branco para isolar a imagem do escoamento, já que ambas as paredes do canal são transparentes. O fundo branco utilizado, além de isolar, aumentou o brilho e o contraste da imagem.

A transmissão de dados da filmadora para o computador foi feita através de uma porta padrão IEEE 1394 ou também conhecida como *Firewire*. A taxa de transmissão de dados da filmadora para o computador é de 3,6 MB/s. Como a taxa de transferência é alta os arquivos gerados pelos ensaios são grandes (100 MB a 200 MB). Isso exige que o disco rígido do computador seja de grande capacidade e relativamente veloz. A taxa de gravação deve ser de pelo menos 4 MB/s, o que já é comum nos discos mais recentes.

O computador utilizado para adquirir os dados foi um Macintosh iMac G3. A sua configuração é descrita a seguir: processador PowerPC 400 MHz, memória RAM 128 MB, disco rígido ATA 12,8 GB. Esse computador já possui portas padrão IEEE 1394 e USB instaladas. Também foi adquirido um gravador de CD com conexão USB para a transferência dos vídeos para outros computadores. A vantagem desse computador é sua configuração própria para a manipulação de imagens e vídeos. A desvantagem, entretanto, é a pouca versatilidade do sistema operacional (SO) utilizado (MAC OS) que não é compatível com os programas para o SO WINDOWS. Como os programas computacionais utilizados na pesquisa foram para este último, as filmagens foram adquiridas no iMAC, gravadas em CD e analisadas em computador com o SO WINDOWS.

A análise das imagens foi realizada com a ajuda de alguns programas específicos. Os parâmetros que se pretendiam avaliar foram a velocidade da corrente durante o escoamento e a evolução da altura. Para essas análises foram utilizados dois programas diferentes. O

primeiro foi o editor de vídeo ADOBE PREMIERE 6.0; o segundo, foi o programa desenvolvido pela UTHSCSA (University of Texas Health Science in San Antonio) utilizado para análise de imagens. Esse programa é o IMAGE TOOL 2.0 e reúne um conjunto de ferramentas para medir ângulos, áreas, distâncias, além de oferecer vários filtros para as imagens. As medidas de área e distância podem ser calibradas a partir de alguma escala de dimensão conhecida na imagem.

Com o programa ADOBE PREMIERE 6.0 foi possível medir o tempo de deslocamento da corrente. Durante a visualização do vídeo há um contador de tempo que marca o avanço quadro a quadro. Assim é possível medir o tempo com a precisão de 1 quadro, ou também, 0,033 s. Para cada seção onde o tempo foi medido exportou-se a imagem referente a esse quadro para um arquivo separado. A análise dessa imagem pôde ser feita no segundo programa, o IMAGE TOOL.

A metodologia de análise para os ensaios utilizou primeiro o ADOBE PREMIERE 6.0 para medir o tempo e isolar as imagens. Em cada uma das seções marcadas no canal e com distância conhecida foi feita a medição do tempo e exportada a imagem correspondente. As imagens exportadas eram, então, analisadas no IMAGE TOOL. Esse programa pode medir distâncias a partir de uma calibração de um comprimento conhecido. A calibração é feita medindo a escala de referência fixada no canal, sendo que cada quadro tem 5 cm de comprimento. A figura 4.8 mostra com mais detalhes a escala fixada no canal.

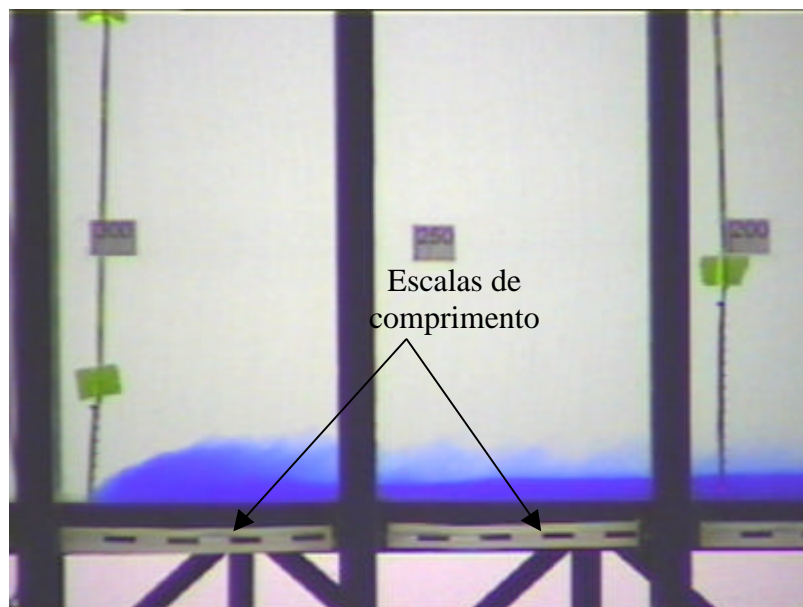


Figura 4.8 – Escala de referência de comprimento

Ainda com referência à calibração, deve-se considerar que durante o giro da filmadora no acompanhamento do escoamento, a escala horizontal sofre uma deformação. Por isso, para cada trecho do canal, é necessário fazer uma calibração.

Mesmo conhecendo a distância das marcas fixadas no canal, as imagens exportadas foram medidas para aumentar a precisão na distância da corrente. Com os dados de tempo e distância do escoamento é possível fazer a análise de velocidades e aceleração dos ensaios. Outro dado medido nas imagens foi a altura em diferentes pontos da corrente em cada imagem.

A figura 4.9 apresenta esquematicamente a metodologia utilizada no sistema de aquisição e tratamento de imagens. Inicialmente é realizada a filmagem do ensaios (a) e posteriormente as imagens são transferidas para o computador (b). A análise dos ensaios é feita em dois programas. No Adobe Premiere (c) são avaliadas as velocidades de avanço da corrente e no Image Tool (d) são feitas as medições de comprimento e altura da cabeça da corrente de densidade.

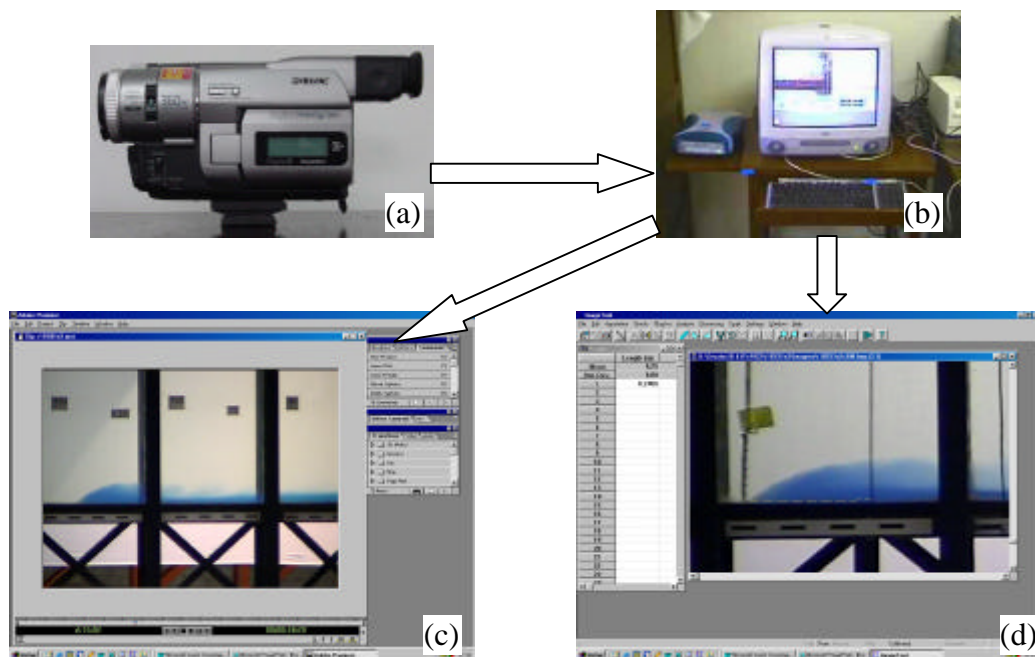


Figura 4.9 – Representação esquemática da metodologia do sistema de aquisição e tratamento de imagens

A sistemática utilizada de girar a câmera para acompanhar o escoamento implica numa correção a ser aplicada às medidas de distância causada pela paralaxe. No trecho inicial do canal, da comporta até a seção 2,75 m, esse efeito é significativo e deve ser corrigido. Nas seções mais próximas à comporta a paralaxe é maior diminuindo ao se aproximar da seção central do canal. No trecho final, esse efeito não é significativo. O erro referente à paralaxe

consiste na diferença entre a distância medida e a distância real da corrente. Como a análise é feita para a porção central do escoamento, o valor do erro é metade da diferença das distâncias mencionadas acima. A figura 4.10 representa esquematicamente o erro causado pela paralaxe.

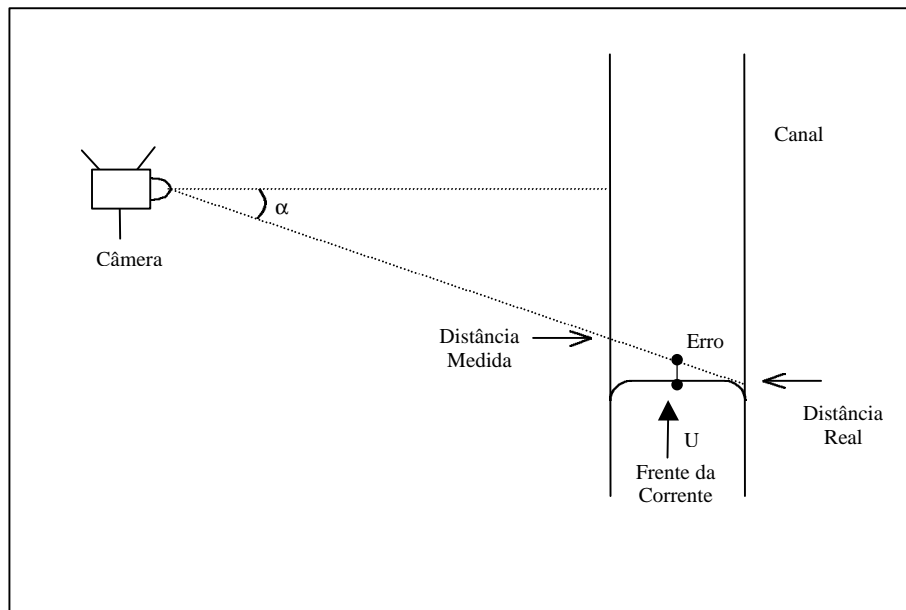


Figura 4.10 – Erro devido à paralaxe

A correção da distância no primeiro trecho é feita através da relação expressa na figura 4.11.

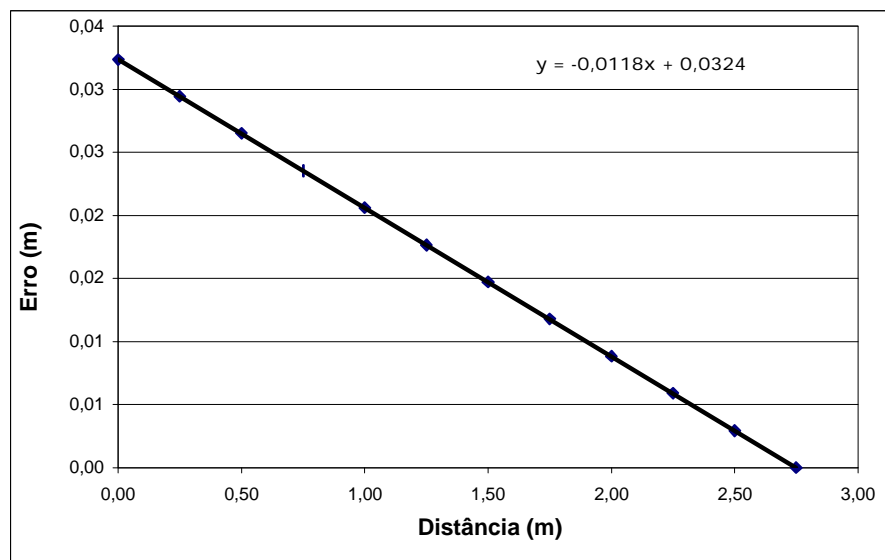


Figura 4.11 – Correção da paralaxe no primeiro trecho do canal

A correção da distância medida nas seções iniciais do canal é feita, para cada medição, subtraindo a correção devido ao efeito de paralaxe da distância medida sobre a imagem extraída do vídeo.

4.6 Conclusões Parciais

Durante a formulação da metodologia se observaram alguns detalhes que foram decisivos para a configuração final dos ensaios. Na fase de estudos preliminares, no canal unidimensional, procurou-se estabelecer um volume inicial de solução salina para que o escoamento chegasse ao final do canal sem haver variações significativas da velocidade da corrente. Em outras palavras, procurou-se estabelecer uma condição de regime permanente. O volume foi variado modificando a altura da solução e o comprimento da câmara inicial. A relação entre o volume unitário e a distância para que houvesse uma velocidade aproximadamente constante do escoamento é de $0,014 \text{ m}^2/\text{m}$ no canal de pequeno porte. Essa relação foi tirada do ensaio 3 da tabela 5.1 de configuração: $l_i = 0,25 \text{ m}$, $h/H = 2/3$ e $r = 1045 \text{ kg/m}^3$. O comprimento deste canal é de 2 m e a altura é de $0,115 \text{ m}$. Para o canal bidimensional utilizou-se uma relação um pouco maior pois a massa específica utilizada foi menor ($r = 1010 \text{ kg/m}^3$, $r = 1022 \text{ kg/m}^3$). A relação utilizada foi de $0,047 \text{ m}^2/\text{m}$ ($l_i = 1,5 \text{ m}$; $h/H = 1/6$ comprimento do canal: $4,5 \text{ m}$; altura da lâmina de água: $0,85 \text{ m}$)

O desenvolvimento das sondas de condutividade mostrou algumas limitações do aparelho. A faixa de medição das sondas apresentou um patamar limite para as soluções salinas testadas. Esse limite está na faixa de 1020 kg/m^3 , acima desse valor a resposta da sonda permanece praticamente constante. Isso se torna um limitador para a configuração dos ensaios limitando a massa específica máxima a ser utilizada.

Outra questão quanto à massa específica é o menor valor que se pode utilizar. Valores menores que $r = 1010 \text{ kg/m}^3$ trazem complicações na preparação do ensaio. Durante a injeção da solução salina na câmara inicial ocorre mistura entre a solução e a água e, quanto menor é Dr , maior é a mistura. Por isso utilizar soluções com Dr pequeno causa um erro maior dos parâmetros iniciais do ensaio.

5. RESULTADOS E ANÁLISES

5.1 Calibração do Aparato Experimental e dos Ensaio

A pesquisa de correntes de densidade realizada no NECOD, no IPH, teve início com este trabalho. Por isso, ainda não há uma base de dados própria do laboratório para comparação de resultados. A comparação é feita então, com aqueles encontrados na literatura. Considerando também que a metodologia e os aparatos experimentais foram baseados nos estudos de outras pesquisas, espera-se que os resultados obtidos aqui sejam semelhantes. Portanto, antes de apresentar com mais detalhes os ensaios realizados neste trabalho, são feitas comparações com os resultados encontrados na literatura. Essa comparação serve como uma calibração do aparato experimental e da metodologia empregada, permitindo, assim, uma análise mais segura dos resultados obtidos.

Na figura 5.1 são comparados os resultados obtidos por Simpson e Britter (1979) (figura 3.6) e os resultados dos ensaios no canal unidimensional e no canal bidimensional. É comparado o número de Froude Densimétrico (Fr') do escoamento com a relação entre a altura da lâmina de água (h_1) e a altura da corrente de densidade (h_4), ambas relações adimensionais. Os ensaios têm como característica semelhante a declividade de 0° do canal. Os dados referentes a Simpson e Britter são apresentados como *S & B – pulsos* e *S & B – contínuo*. Pulsos e contínuo se referem ao tipo de ensaio realizado: fluxo contínuo e por pulsos.

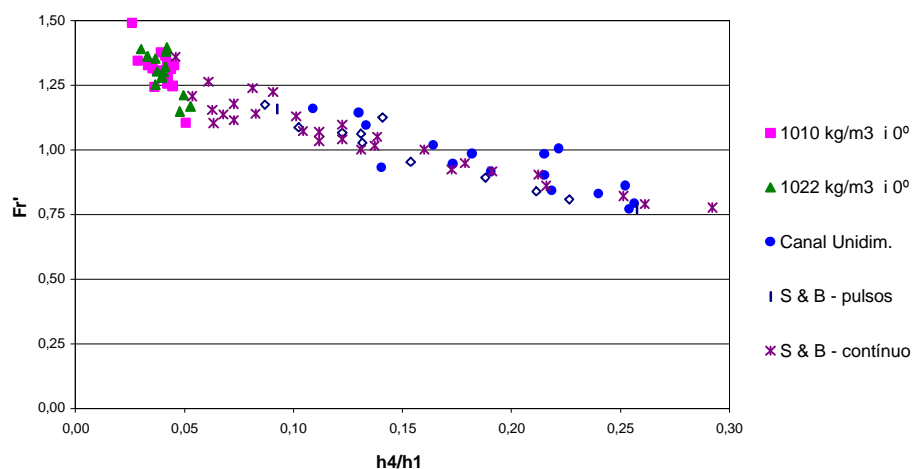


Figura 5.1 – Comparação dos resultados com Simpson e Britter (1979)

Pode-se verificar que os resultados do canal unidimensional e canal bidimensional (1010 kg/m^3 e 1022 kg/m^3) apresentam a mesma faixa de resultados de Simpson e Britter (1979).

Outra comparação é feita com Laval *et al.* (1988). Na figura 5.2 são comparadas as velocidades da corrente de densidade ao longo do canal em função de sua massa específica para escoamentos com declividade de 1° . A relação $\{U_f^*(X_f)^{0,5}\}$, que representa a velocidade ao longo do canal, tem unidade igual a $[\text{m}^{3/2} \cdot \text{s}^{-1}]$ e a relação $\{(\Delta r/r)^{0,5}\}$, que representa a massa específica, é adimensional.

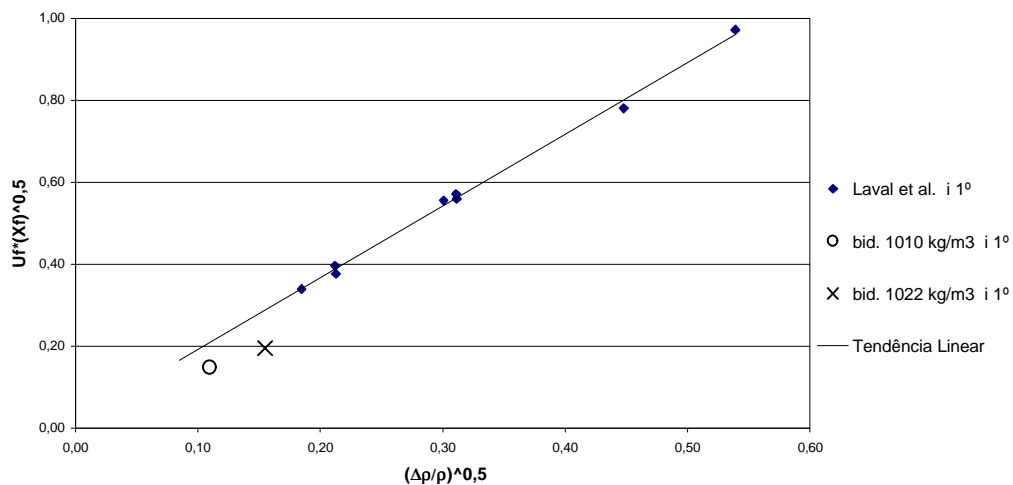


Figura 5.2 – Comparação dos resultados com Laval *et al.* (1988)

Neste caso os resultados se apresentam um pouco abaixo da tendência esperada. Uma possibilidade para explicar essa diferença é que em seu ensaios Laval *et al.* (1988) utilizaram sedimentos finos misturados a soluções salinas para simular a corrente de densidade, podendo ter uma dinâmica um pouco diferente das correntes sem sedimentos. Também o volume inicial utilizado por eles é de aproximadamente 8 L, enquanto nos ensaios aqui realizados o volume inicial é de 72 L, sendo nove vezes superior. Esses fatores podem influenciar na dinâmica da corrente, mas ainda assim os resultados obtidos apresentam-se próximos da tendência apresentada por Laval *et al.* (1988).

A comparação dos resultados indica que tanto o aparato experimental montado para a pesquisa quanto a metodologia de ensaios empregada, reproduzem resultados semelhantes das pesquisas encontradas na literatura.

5.2 Canal Unidimensional

Os ensaios iniciais nesse canal tinham o objetivo de avaliar a influência de alguns parâmetros no escoamento da corrente, tais como o volume inicial e massa específica da solução salina. O volume inicial foi variado de duas formas distintas: variação do comprimento da câmara inicial e variação da relação h/H , sendo h – altura inicial da solução e H – nível de água. O comprimento da câmara inicial (l_i) foi variado de 7,5 cm, 15 cm, 25 cm, 30 cm e 40 cm. As relações de altura testadas durante os ensaios foram $h/H=3/3$, $h/H=2/3$, e $h/H=1/3$. As massas específicas (r) da solução selecionadas para os ensaios foram 1010 kg/m^3 , 1020 kg/m^3 , 1030 kg/m^3 e 1045 kg/m^3 .

5.2.1 Influência do Comprimento da Câmara Inicial na Velocidade de Avanço da Corrente

Os primeiros ensaios realizados no canal pequeno tiveram o objetivo de avaliar a influência do volume inicial da solução na velocidade de avanço da corrente. A solução utilizada apresentou $r=1045 \text{ kg/m}^3$ e o volume foi variado alterando o comprimento da câmara inicial. A relação de altura foi mantida constante e igual a $h/H=2/3$, mas os comprimentos da câmara inicial foram de 7,5 cm, 15 cm, 25 cm, 30 cm e 40 cm. O canal foi mantido com declividade nula (horizontal). A velocidade dos ensaios foi marcada apenas em duas seções (1 m e 2 m) com o cronômetro de dois ponteiros. A tabela 5.1 apresenta o plano de ensaios executado. Para cada ensaio foram realizadas quatro repetições; os resultados apresentados são a média dessas repetições.

Tabela 5.1 - Variação do comprimento da câmara inicial

Ensaio	Inicial m	ρ kg / m ³	págua kg / m ³	$\theta_{\text{água}}$ °C	V inicial m ³	T médio (s)		Velocidades (m/s)		g'	Q_o
						1	2	1	2		
1	0,075	1045	998	18	0,0011	11,40	32,40	0,088	0,062	0,4615	0,0086
2	0,15	1045	998	19	0,0022	10,70	24,35	0,094	0,082	0,4615	0,0173
3	0,25	1045	998	19	0,0036	10,00	20,20	0,100	0,099	0,4615	0,0288
4	0,3	1045	998	18	0,0043	10,25	20,35	0,098	0,099	0,4615	0,0345
5	0,4	1045	998		0,0058	10,00	20,80	0,100	0,096	0,4615	0,0460

Na tabela 5.1 $g' = g \frac{Dr}{r}$ e representa a gravidade reduzida pela diferença de massa específica entre a corrente e o fluido ambiente; Q_o (m²) é o volume inicial unitário (volume inicial dividido pela largura do canal).

Observando-se a figura 5.3 nota-se que, para volumes iniciais inferiores a $0,0035 \text{ m}^3$, o que corresponde a um compartimento inicial de 25 cm (0,25 x 0,125 x 0,115), as velocidades de avanço medidas na seção 1 m são superiores àquelas medidas a 2 m, ou seja, a velocidade

de avanço da corrente varia ao longo do canal. Para volumes superiores a este, a velocidade de avanço permanece praticamente constante nas duas seções avaliadas.

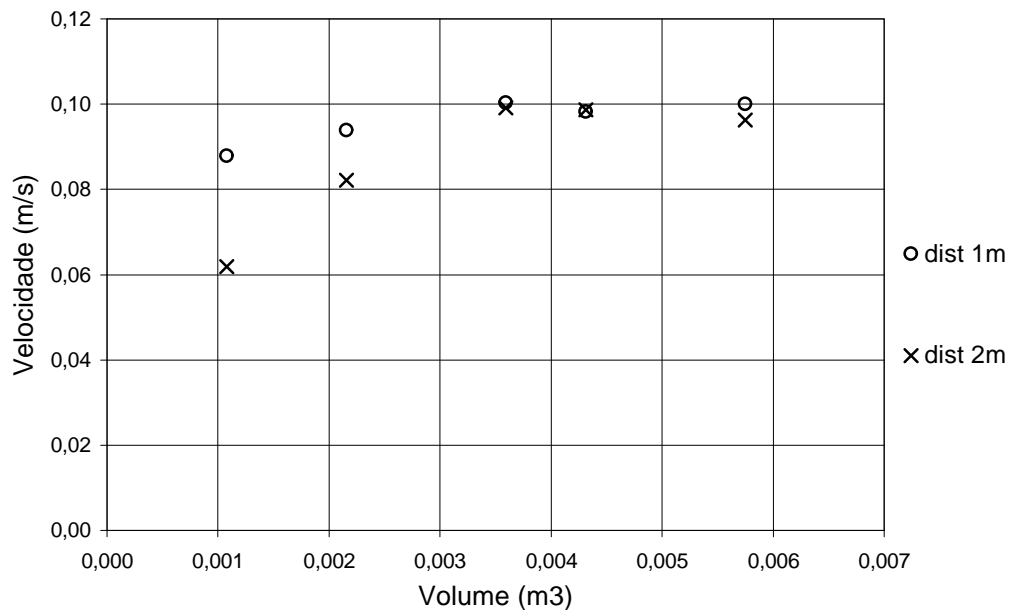


Figura 5.3 - Variação da velocidade média de avanço da corrente de densidade em função do volume inicial de solução salina com massa específica 1045 kg/m^3

A figura 5.4 apresenta o resultado das repetições dos ensaios realizados para a avaliação da velocidade de avanço da corrente de densidade. Para cada volume de solução colocado na câmara inicial são apresentados os resultados de velocidade medidos em cada uma das quatro repetições realizadas, tanto para a seção situada a 1 m, quanto para a seção situada a 2 m. Em geral, as velocidades avaliadas a 2 m do início do canal foram inferiores àquelas medidas a 1 m. À medida que o volume da solução aumenta, sobretudo para a velocidade medida na seção a 1m, aumenta a dispersão dos resultados das repetições, sendo máxima para volumes da ordem de $0,004 \text{ m}^3$. Como a relação entre a altura da solução (h) e a profundidade do fluido ambiente (H) foi mantida constante e igual a $2/3$, surge a dúvida que esta relação poderia estar afetando o desenvolvimento da corrente. A altura relativa da corrente com o fluido ambiente é alta introduzindo perturbações que poderiam estar afetando os resultados das repetições dos ensaios. Devido a isto, foi implementada uma série de ensaios objetivando verificar a influência da altura inicial da corrente na sua velocidade de propagação.

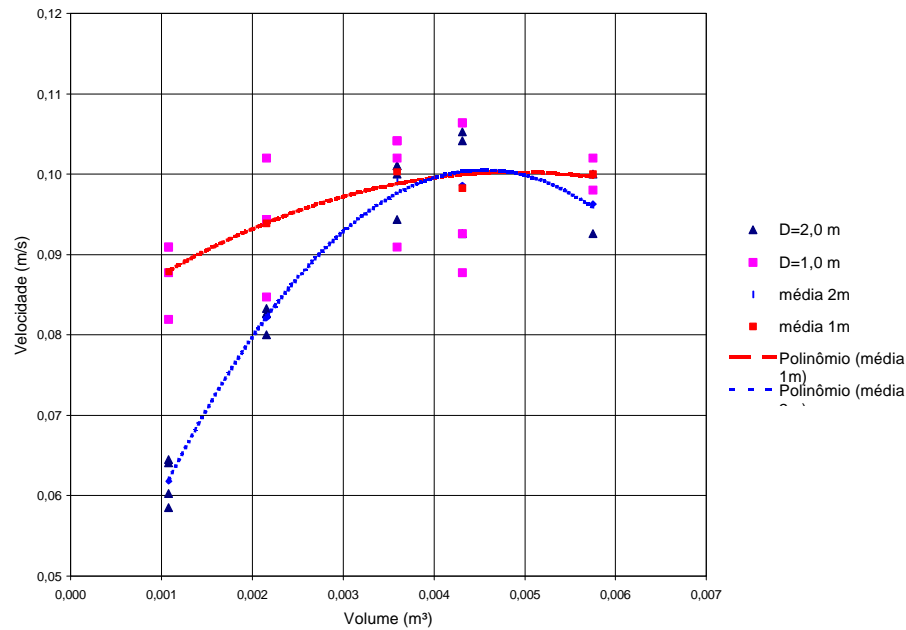


Figura 5.4 - Variação da velocidade de avanço da corrente com o volume inicial: repetições e valores médios

5.2.2 Influência da Altura Inicial na Velocidade de Avanço da Corrente

A variação da altura inicial na velocidade de avanço foi estudada empregando-se uma solução com $\rho=1045 \text{ kg/m}^3$ e fixando o comprimento da câmara inicial $l_i=0,40 \text{ m}$. As relações de altura avaliadas foram $h/H=1/3$, $h/H=2/3$ e $h/H=3/3$. A tabela 5.2 apresenta o plano de ensaios executado. Nela X_f indica a distância ao longo do canal onde as características da corrente foram avaliadas, h_3 é a altura da cabeça da corrente, h_4 é a altura do corpo, U_f é a velocidade da frente e Q_0 é o volume inicial da solução por unidade de largura do canal.

Tabela 5.2 - Variação da altura inicial para a massa específica de 1045 kg/m^3 e comprimento do compartimento inicial de 0.40m

Ensaio	altura (m)	prof. (m)	X_f (m)	ρ	$\rho_{\text{água}}$	h_3 frente (m)	h_4 cauda (m)	U_f (m/s)	g' (m/s ²)	Q_0 (m ²)
1	0,038	0,4	0,5	1045	998	0,023	0,016	0,075	0,4612	0,0153
2	0,038	0,4	1,0	1045	998	0,017	0,013	0,063	0,4612	0,0153
3	0,038	0,4	1,5	1045	998	0,014	0,009	0,052	0,4612	0,0153
4	0,038	0,4	2,0	1045	998	0,012	0,007	0,032	0,4612	0,0153
5	0,077	0,4	0,5	1045	998	0,039	0,029	0,089	0,4612	0,0307
6	0,077	0,4	1,0	1045	998	0,035	0,025	0,105	0,4612	0,0307
7	0,077	0,4	1,5	1045	998	0,036	0,020	0,091	0,4612	0,0307
8	0,077	0,4	2,0	1045	998	0,033	0,015	0,092	0,4612	0,0307
9	0,115	0,4	0,5	1045	998	0,047	0,048	0,088	0,4612	0,0460
10	0,115	0,4	1,0	1045	998	0,045	0,043	0,104	0,4612	0,0460
11	0,115	0,4	1,5	1045	998	0,049	0,040	0,100	0,4612	0,0460
12	0,115	0,4	2,0	1045	998	0,049	0,041	0,096	0,4612	0,0460

A figura 5.5 apresenta a variação da velocidade em função da relação h/H . Os diferentes valores para uma mesma altura relativa representam as velocidades medidas nas quatro seções do canal. Para a relação menor de $h/H=1/3$, a desaceleração que a corrente sofre ao longo do canal é grande. Ao passo que a altura da solução salina se aproxima da altura do fluido ambiente, mais homogêneo é o avanço da corrente. Para as relações $h/H=2/3$ e $h/H=3/3$ a velocidade média de propagação da frente pouco se altera. Sabe-se também que quando a relação de alturas h/H é mais próxima de 1, maior será o efeito da contradecividade. Então a relação de alturas que apresenta um avanço homogêneo da velocidade e menor influência da contradecividade é $h/H=2/3$.

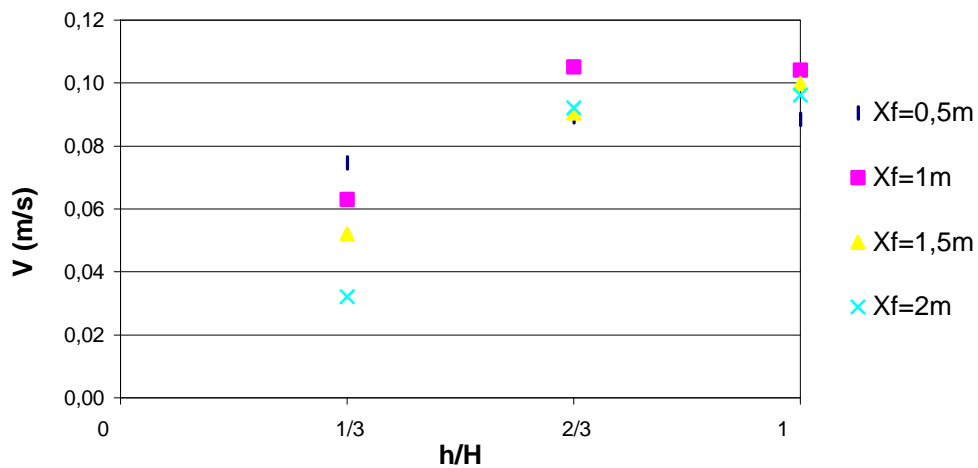


Figura 5.5 - Variação da velocidade de avanço da cabeça da corrente de densidade em função da relação h/H , para massa específica de 1045 kg/m^3 e comprimento do compartimento inicial de $0,40m$

5.2.3 Influência da massa específica na velocidade de avanço da corrente

A influência da massa específica foi determinada através de ensaios realizados fixando o comprimento da câmara inicial em $l_i=0,40 \text{ m}$, a relação de alturas em $h/H=2/3$ e variando a densidade da solução salina. As massas específicas das soluções analisadas nesta fase foram $\rho=1010 \text{ kg/m}^3$, $\rho=1020 \text{ kg/m}^3$, $\rho=1030 \text{ kg/m}^3$ (tabela 3), as quais foram acrescidos os resultados dos ensaios anteriores, efetuados para $\rho=1045 \text{ kg/m}^3$, $l_i=0,40 \text{ m}$ e $h/H=2/3$ (tabela 5.3).

Tabela 5.3 - Variação da massa específica, fixando $h/H=2/3$ e comprimento do compartimento inicial de 0,40m

Ensaio	altura (m)	l_i (m)	X_f (m)	ρ	$\rho_{\text{água}}$	h3 frente (m)	h4 cauda (m)	U_f (m/s)	g' (m/s ²)	Q_o (m ²)
13	0,077	0,4	0,5	1030	998	0,039	0,029	0,082	0,3140	0,0307
14	0,077	0,4	1,0	1030	998	0,041	0,025	0,080	0,3140	0,0307
15	0,077	0,4	1,5	1030	998	0,041	0,021	0,080	0,3140	0,0307
16	0,077	0,4	2,0	1030	998	0,034	0,015	0,078	0,3140	0,0307
17	0,077	0,4	0,5	1020	998	0,041	0,029	0,063	0,2159	0,0307
18	0,077	0,4	1,0	1020	998	0,039	0,026	0,075	0,2159	0,0307
19	0,077	0,4	1,5	1020	998	0,037	0,019	0,065	0,2159	0,0307
20	0,077	0,4	2,0	1020	998	0,031	0,013	0,060	0,2159	0,0307
21	0,077	0,4	0,5	1010	998	0,042	0,028	0,047	0,1178	0,0307
22	0,077	0,4	1,0	1010	998	0,040	0,025	0,046	0,1178	0,0307
23	0,077	0,4	1,5	1010	998	0,039	0,022	0,046	0,1178	0,0307
24	0,077	0,4	2,0	1010	998	0,029	0,016	0,041	0,1178	0,0307

A figura 5.6 apresenta a relação entre a velocidade da frente da corrente e a massa específica da solução que a constitui. Os diferentes pontos, para uma mesma massa específica, representam as velocidades medidas em diferentes seções do canal; também são apresentados os valores médios de cada ensaio. Nota-se que há um aumento da velocidade média com o aumento da densidade da solução, como era de se esperar. Em média, um acréscimo de 1% na massa específica provoca um aumento da ordem de 25% na velocidade. Nota-se, também, que a velocidade tende a variar menos ao longo do canal à medida que diminui a massa específica da solução.

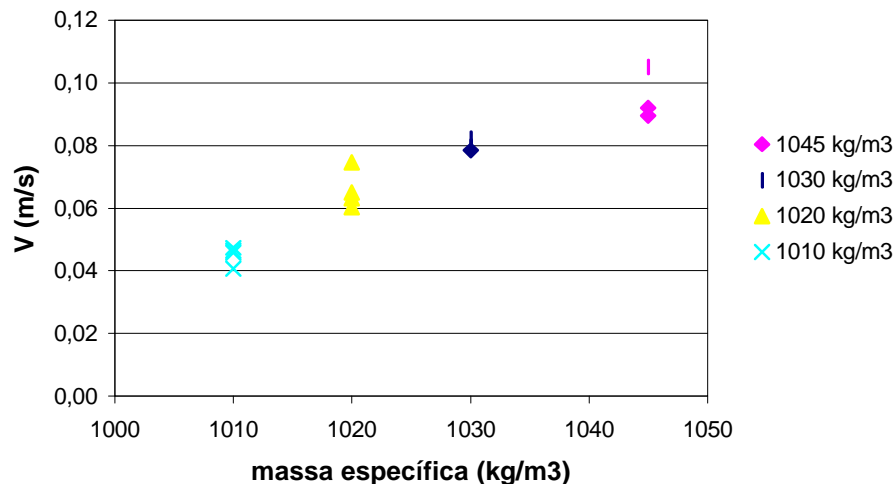


Figura 5.6 - Variação da velocidade de avanço da corrente em função da massa específica, fixando $h/H=2/3$ e $L_{\text{inicial}}=0,40\text{m}$

Além da análise da variação da velocidade em função de parâmetros como o volume inicial e a altura inicial da corrente, os ensaios acima apresentados permitiram, graças à utilização de imagens filmadas, descrever a variação de outros parâmetros, tais como: a

evolução da velocidade em diferentes seções do canal (as seções medidas para esses ensaios foram 0,50 m; 1,00 m; 1,50 m e 2,00 m) e o desenvolvimento da altura da corrente, caracterizada através da altura da cabeça (h_3) e altura do corpo (h_4) da corrente. Estas caracterizações foram realizadas fixando-se um $h/H=2/3$, um comprimento inicial (l_i) da câmara inicial de 0,40 m e fazendo variar a massa específica do fluido em movimento.

5.2.4 Evolução da velocidade de avanço da cabeça ao longo do canal

A figura 5.7 apresenta a evolução da velocidade ao longo do comprimento do canal para as diferentes correntes lançadas. Os pontos representam as velocidades médias atingidas pelas diferentes densidades das correntes. Nota-se que, em geral, há uma leve tendência de diminuição da velocidade de avanço ao longo da distância; exceto para as soluções de 1020 kg/m^3 e 1045 kg/m^3 , onde, no trecho inicial do canal, o escoamento sofre uma aceleração, para após desacelerar. A causa provável dessa discrepância em relação aos outros ensaios (1010 kg/m^3 e 1030 kg/m^3) para a seção de 1 m pode ser a variabilidade das velocidades medidas nas diferentes repetições de cada ensaio.

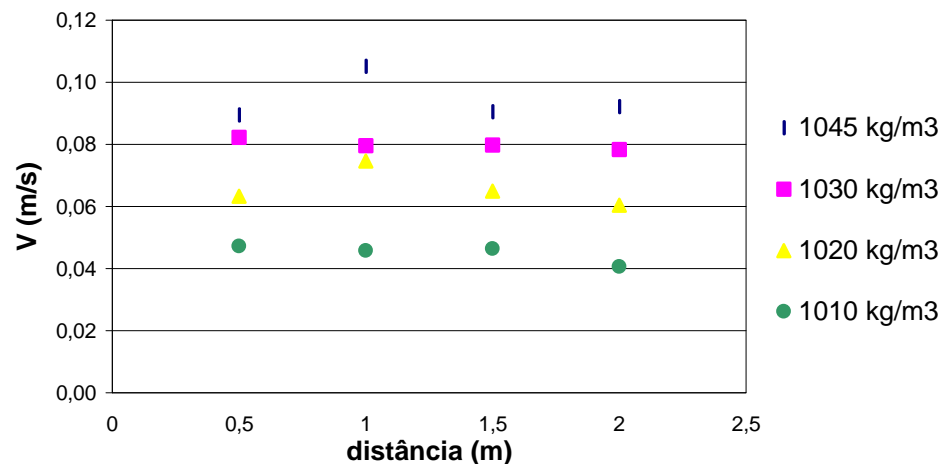


Figura 5.7 - Variação, ao longo do canal, da velocidade de avanço da corrente de densidade em função da massa específica da solução salina, fixando-se $h/H=2/3$ e $L_{inicial}=0,40\text{m}$

5.2.5 Evolução das alturas da cabeça e do corpo ao longo do canal

A figura 5.8 apresenta a variação da altura da corrente de densidade tanto de sua cabeça (h_3) quanto de seu corpo (h_4), ao longo do comprimento do canal (valores médios).

Nota-se que, a massa específica da corrente pouco influencia, em uma dada seção do canal, a altura média de seu corpo e que esta altura tende a diminuir à medida que a corrente progride ao longo do canal. Por outro lado, a velocidade de propagação da cabeça da corrente é afetada pela massa específica da corrente, não tanto em seu início, mas sobretudo à medida que ela se desenvolve no canal. Percebe-se, também, que ocorre uma atenuação da altura da cabeça ao longo do canal.

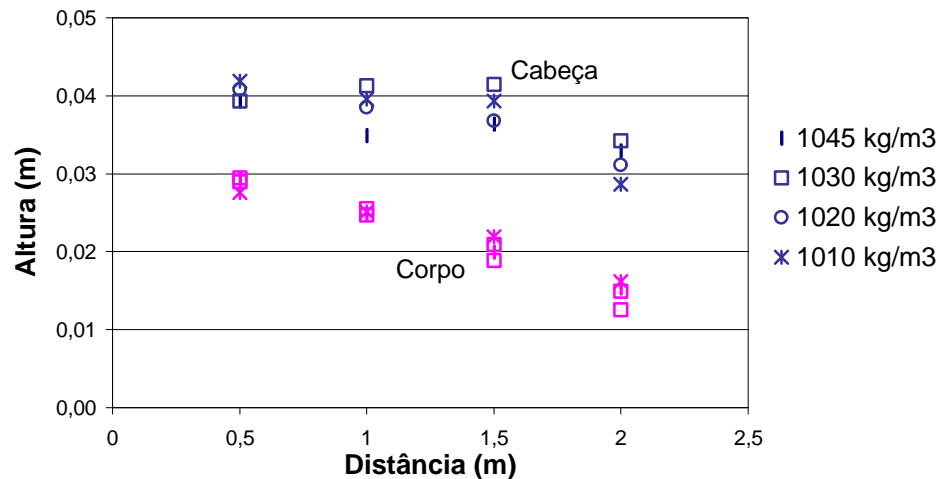


Figura 5.8 - Variação das alturas da cabeça e do corpo da corrente de densidade ao longo do comprimento do canal

5.2.6 Conclusões Parciais

Através dos resultados apresentados na tabela 5.1 foi possível estabelecer um volume inicial mínimo da solução para que o escoamento apresentasse pouca variação de velocidade. O ensaio 3 dessa tabela indica que o volume inicial mínimo deve ser de 3,5 L para a corrente de 1045 kg/m^3 . Isso foi levado em consideração na concepção do canal de grande porte no dimensionamento da câmara inicial. Assim se espera que a velocidade do escoamento resultante dos ensaios no canal de grande porte tenham pouca variação ao longo do comprimento. Os ensaios mostraram que o acréscimo de 1% na massa específica da corrente causa um aumento de 25% na velocidade média da corrente.

Os ensaios realizados no canal unidimensional foram de grande importância para determinar a metodologia a ser empregada no canal bidimensional. Desde a preparação do ensaio, como a injeção da solução salina na câmara inicial até o processo de filmagem, que permitiu a análise dos ensaios, foram processos que foram desenvolvidos no canal unidimensional e utilizados no canal bidimensional.

5.3 Canal Bidimensional

5.3.1 Plano de Ensaios

Na tabela 5.4 é apresentado o plano de ensaios executado. Este plano procurou variar os principais parâmetros que influenciam a dinâmica do escoamento: massa específica (ρ), declividade do canal (α) e volume inicial da solução salina (V). Como alguns testes preliminares e a bibliografia estudada mostraram que os dois primeiros parâmetros (ρ , α) têm maior importância, os ensaios realizados privilegiaram a variação desses dois parâmetros.

Para a massa específica (ρ) foram estabelecidos dois valores: 1010 kg/m^3 e 1022 kg/m^3 . As declividades utilizadas são de 4° , 3° , 2° , 1° , 0° e $-0,5^\circ$. Para cada tipo de ensaio com ρ e α específicos foram realizadas três repetições, totalizando 36 ensaios. Para todos os ensaios a solução injetada na câmara inicial tinha uma altura, junto a comporta, constante e igual a 13,5 cm, o que representa 1/6 da altura total da lâmina d'água no canal para a declividade de 0° .

Tabela 5.4 - Plano de ensaios realizado nos experimentos em canal bidimensional.

Data	Ensaio	Repetição	Declividade (graus)	h_{inicial} (m)	ρ (kg/m^3)	$\rho_{\text{água}}$ (kg/m^3)	$\theta_{\text{água}}$ ($^\circ\text{C}$)	V_{inicial} (m^3)	Tempo (s)	Veloc. (m/s)	Acel. (m/s^2)
04/05/01		1	-0,5	0,136	1010	998	21	0,079	66,00	0,072	0,0011
04/05/01	1	2	-0,5	0,136	1010	998	21	0,079	65,93	0,072	0,0011
17/05/01		3	-0,5	0,136	1010	998	19	0,079	67,40	0,070	0,0011
13/02/01		1	0	0,136	1010	998	24	0,079	62,03	0,077	0,0011
13/02/01	2	2	0	0,136	1010	998	24	0,079	57,67	0,083	0,0015
13/02/01		3	0	0,136	1010	998	24	0,079	60,63	0,078	0,0012
03/04/01		1	1	0,136	1010	998	24	0,072	53,43	0,089	0,0017
03/04/01	3	2	1	0,136	1010	998	24	0,072	52,27	0,091	0,0019
03/04/01		3	1	0,136	1010	998	24	0,072	53,47	0,090	0,0018
13/02/01		1	2	0,136	1010	998	24	0,064	57,13	0,084	0,0014
13/02/01	4	2	2	0,136	1010	998	24	0,064	56,07	0,085	0,0016
13/02/01		3	2	0,136	1010	998	24	0,064	59,04	0,081	0,0013
06/04/01		1	3	0,136	1010	998	24	0,057	59,17	0,081	0,0014
06/04/01	5	2	3	0,136	1010	998	24	0,057	58,37	0,082	0,0015
06/04/01		3	3	0,136	1010	998	24	0,057	56,43	0,085	0,0015
14/02/01		1	4	0,136	1010	998	24	0,049	68,77	0,069	0,0010
14/02/01	6	2	4	0,136	1010	998	24	0,049	65,77	0,072	0,0012
14/02/01		3	4	0,136	1010	998	24	0,049	63,90	0,075	0,0013
10/05/01		1	-0,5	0,136	1022	998	20	0,079	50,00	0,096	0,0020
10/05/01	7	2	-0,5	0,136	1022	998	20	0,079	50,80	0,095	0,0019
10/05/01		3	-0,5	0,136	1022	998	20	0,079	48,83	0,099	0,0020
08/02/01		1	0	0,136	1022	998	24	0,079	41,87	0,115	0,0029
08/02/01	8	2	0	0,136	1022	998	24	0,079	44,67	0,108	0,0024
08/02/01		3	0	0,136	1022	998	24	0,079	43,50	0,111	0,0024
10/04/01		1	1	0,136	1022	998	24	0,072	40,43	0,120	0,0031
20/04/01	9	2	1	0,136	1022	998	22	0,072	41,97	0,116	0,0029
20/04/01		3	1	0,136	1022	998	22	0,072	42,10	0,116	0,0028
08/02/01		1	2	0,136	1022	998	24	0,064	40,20	0,121	0,0033
08/02/01	10	2	2	0,136	1022	998	24	0,064	42,27	0,115	0,0029
08/02/01		3	2	0,136	1022	998	24	0,064	41,63	0,117	0,0032
23/04/01		1	3	0,136	1022	998	22	0,057	50,47	0,096	0,0020
23/04/01	11	2	3	0,136	1022	998	22	0,057	47,27	0,102	0,0024
26/04/01		3	3	0,136	1022	998	22	0,057	45,63	0,107	0,0024

Data	Ensaio	Repetição	Declividade (graus)	$h_{inicial}$ (m)	r (kg/m^3)	$r_{\text{água}}$ (kg/m^3)	$\theta_{\text{água}}$ ($^{\circ}C$)	$V_{inicial}$ (m^3)	Tempo (s)	Veloc. (m/s)	Acel. (m/s^2)
09/02/01		1	4	0,136	1022	998	24	0,049	49,93	0,097	0,0020
09/02/01	12	2	4	0,136	1022	998	24	0,049	51,40	0,093	0,0020
09/02/01		3	4	0,136	1022	998	24	0,049	51,93	0,093	0,0017

As informações coletadas nos ensaios através das filmagens e das sondas de condutividade permitiram uma série de análises do comportamento da corrente de densidade.

O primeiro parâmetro analisado dos ensaios foi o desenvolvimento da velocidade de propagação da corrente de densidade. As velocidades foram calculadas através da medição do tempo de deslocamento para determinada seção do canal, segundo a metodologia exposta no item 4.4 – Sistema de Aquisição e Tratamento de Imagens. As medições de tempo são feitas em seções do canal a cada 25 cm, iniciando na seção 0,00 m até a seção 4,50 m, totalizando 19 seções.

5.3.2 Velocidade média da cabeça da corrente

A variação da velocidade média da cabeça da corrente de densidade para as duas massas específicas ensaiadas e as diferentes inclinações do canal é mostrada na figura 5.9.

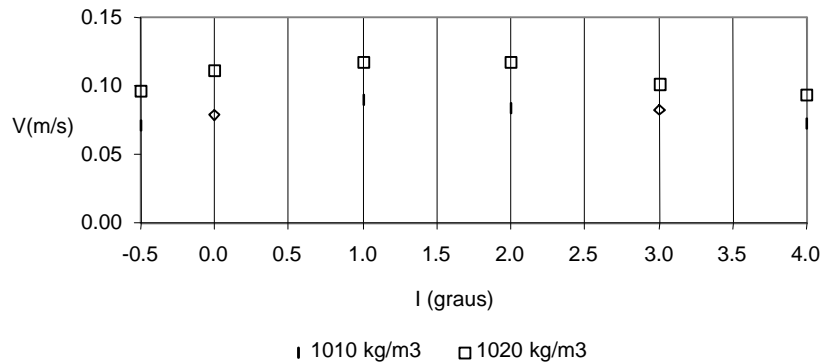


Figura 5.9 - Variação da velocidade em função da declividade média do canal e da massa específica da solução salina

Nota-se que a velocidade média de avanço da cabeça variou entre 0,0715 m/s e 0,0899 m/s, para corrente de 1010 kg/m^3 e entre 0,0942 m/s e 0,1178 m/s, para a corrente de 1022 kg/m^3 . Da declividade menor para a maior, ocorre um crescimento da velocidade até a declividade de 1°, para após ela decrescer. Comparando a magnitude de variação das

velocidades para as duas densidades, nota-se que um acréscimo da ordem de 1% na densidade da solução causa um acréscimo da ordem de 25% na velocidade média de avanço da frente.

5.3.3 Aceleração média da cabeça da corrente

Com os valores de velocidade levantados a partir do tratamento das imagens dos ensaios, foram determinadas as acelerações sofridas pela frente da corrente. A figura 5.10 apresenta esta variação em termos de aceleração média (média das três repetições de cada ensaio), expressa em função da declividade imposta ao canal.

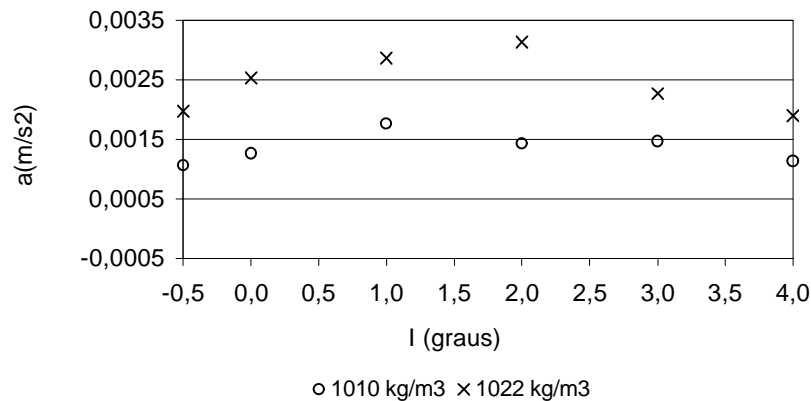


Figura 5.10 - Influência da declividade do canal na aceleração média da corrente em função da massa específica da solução salina.

O comportamento da variação da aceleração segue, como era de se esperar, o comportamento já descrito para a variação da velocidades. A corrente composta por material de menor densidade sofre acelerações mais tênues do que com material mais denso. Cabe também mencionar que o tempo de percurso da corrente no canal varia em função de sua densidade: para a solução de 1010 kg/m^3 , ele variou entre 53 s e 66 s, e para a solução de 1022 kg/m^3 , entre 41 s e 51 s.

5.3.4 Variação espacial da velocidade de avanço da corrente

A análise da evolução espacial da velocidade de avanço da corrente de densidade parte do levantamento, ao longo do canal, em seções pré-determinadas, da velocidade instantânea.

Os dados apresentados na figura 5.10 representam o valor médio das velocidades avaliadas em diferentes seções do canal e em três repetições do mesmo ensaio. Também foram calculadas as acelerações da corrente para cada trecho do canal. A figura 5.11 apresenta a tendência da velocidade média para as diferentes inclinações do canal para os ensaios com massa específica de 1010 kg/m^3 e massa específica de 1022 kg/m^3 .

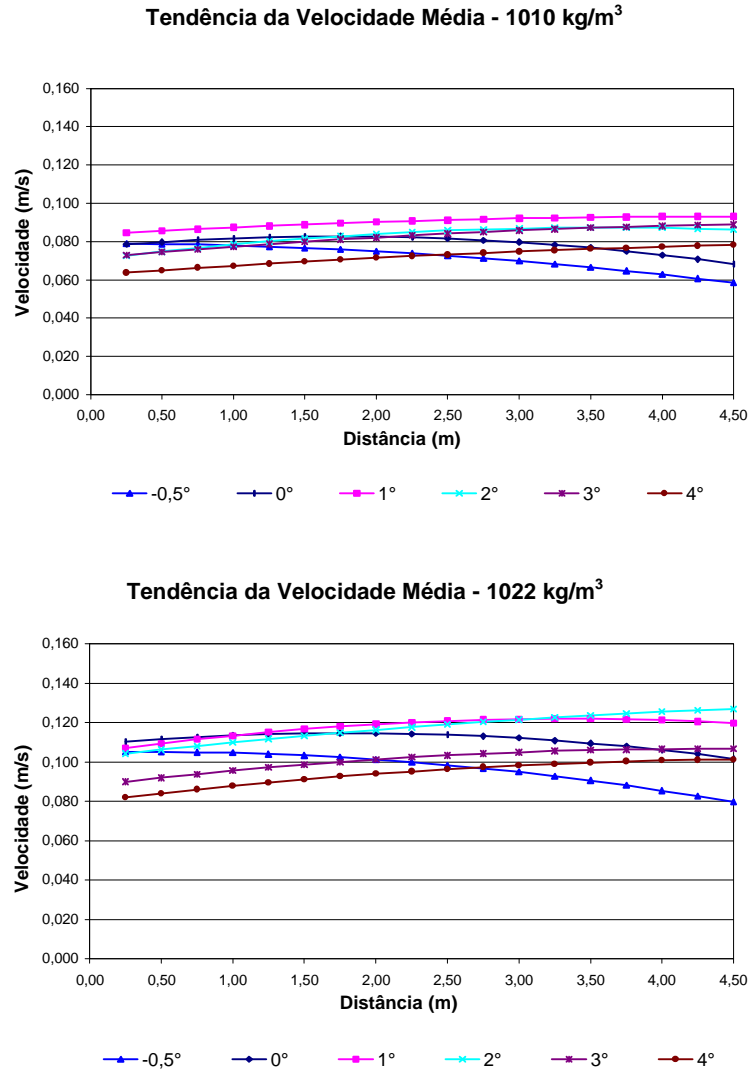


Figura 5.11 - Variação espacial da velocidades médias de avanço da corrente para massas específicas de 1010 kg/m^3 e 1020 kg/m^3

A partir desses gráficos pode-se observar que as velocidades nas seções iniciais, dos ensaios realizados com uma declividade do canal menor ($-0,5^\circ$; 0°), são maiores que aqueles com declividade maior (3° , 4°). Em todos os ensaios foi utilizada uma altura padrão junto a comporta, o que significa que o volume inicial da solução varia de um ensaio para o outro. Naqueles com declividade menor o volume da solução é maior que aqueles com declividade maior.

A hipótese formulada para explicar esse comportamento é que a aceleração inicial da corrente e, por consequência, a velocidade inicial, é proporcional ao volume da solução, sendo pouco influenciada pela declividade do canal.

Outra observação que pode ser feita sobre a figura 5.11 é que, nos casos com declividade baixa (0° e 1°), a velocidade atinge um valor máximo e depois começa a cair; enquanto nas declividades altas (3° e 4°) a velocidade aumenta até o final do percurso. Nas declividades baixas, o escoamento não atinge um regime permanente. Nas declividades altas, o escoamento tem um aumento progressivo da velocidade, com uma tendência a atingir um valor máximo. Vários pesquisadores afirmam que o escoamento das correntes de densidade atinge um regime permanente quando a inclinação é alta (Britter & Linden, 1980; Laval *et al.* 1988). O estudo realizado até aqui mostrou que as correntes não atingem um escoamento permanente e que sofrem acelerações e desacelerações durante seu escoamento.

Na figura 5.11 foram mostradas tendências das velocidades do escoamento. Para cada um dos ensaios foi elaborado um gráfico com a velocidade em cada seção do canal e calculada uma linha de tendência média da velocidade.

A figura 5.12 apresenta, além da tendência da velocidade, os valores da velocidade para cada seção para um ensaio com massa específica $\rho = 1010 \text{ kg/m}^3$ em função das inclinações ensaiadas ($-0,5^\circ$, 0° , 1° , 2° , 3° e 4°). O mesmo se encontra representado na figura 5.13 para a massa específica $\rho = 1022 \text{ kg/m}^3$.

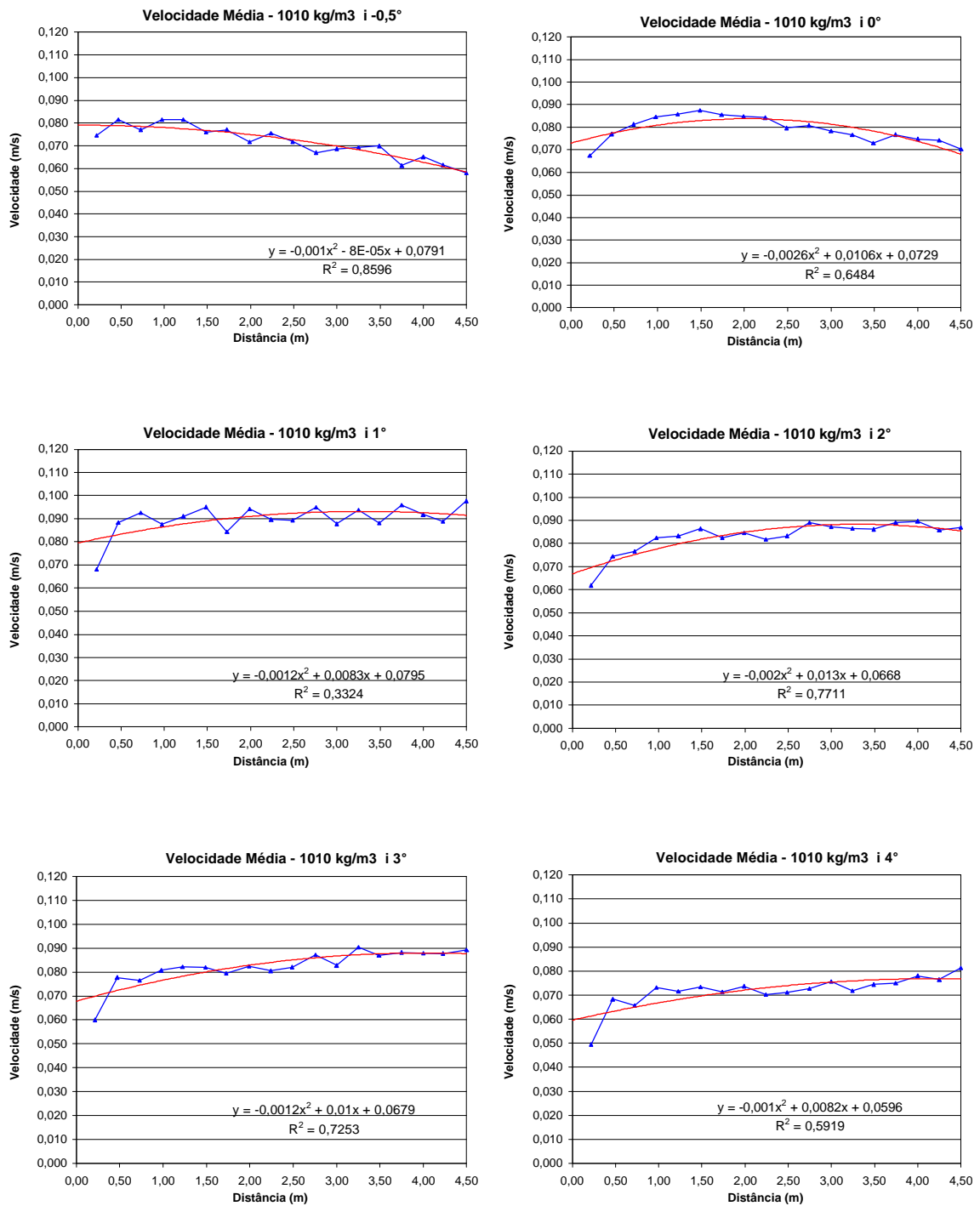


Figura 5.12 - Distribuição espacial da velocidade média de avanço da corrente para

$$r = 1010 \text{ kg/m}^3$$

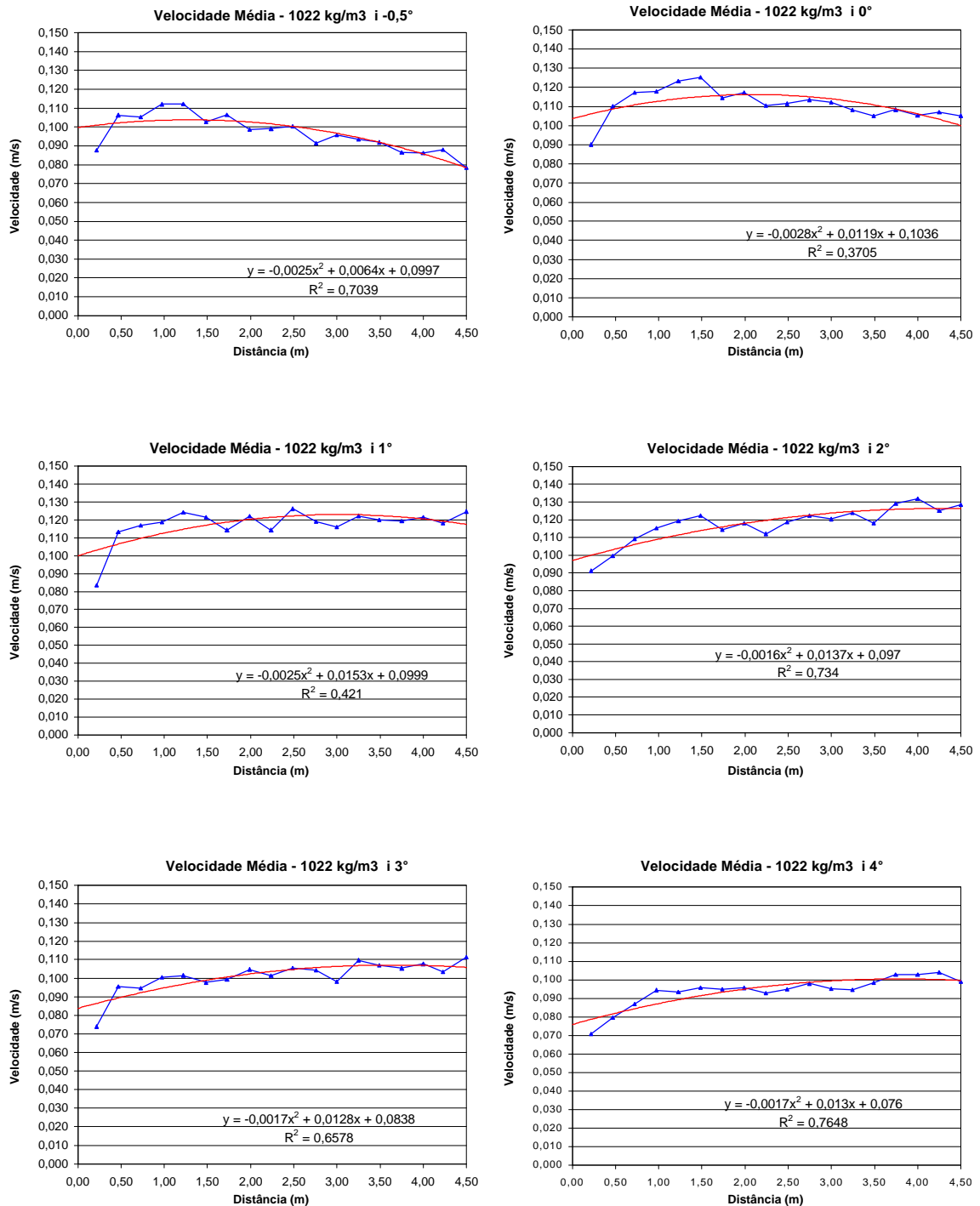


Figura 5.13 - Distribuição espacial da velocidade média de avanço da corrente para

$$r = 1022 \text{ kg/m}^3$$

Pode-se observar nas figuras 5.12 e 5.13 que os valores de velocidade oscilam em torno da tendência média. A fim de avaliar se as oscilações em torno da média eram decorrentes de problemas intrínsecos do ensaio ou se esse fenômeno fazia parte da dinâmica do escoamento esse assunto foi tratado com uma maior profundidade no item 5.4. A partir dessa constatação formulou-se a hipótese que existem frequências internas na corrente de

densidade que provocam a aceleração e desaceleração em pequenos trechos de seu escoamento.

5.3.5 Altura média da corrente

A partir das imagens extraídas dos ensaios, a altura da corrente foi medida. A medição da altura foi feita em duas partes distintas da corrente para cada imagem; a altura da cabeça (h_3) e a altura do corpo (h_4). A figura 5.14 apresenta as alturas médias (h_3 e h_4) para as duas densidades e seis declividades ensaiadas.

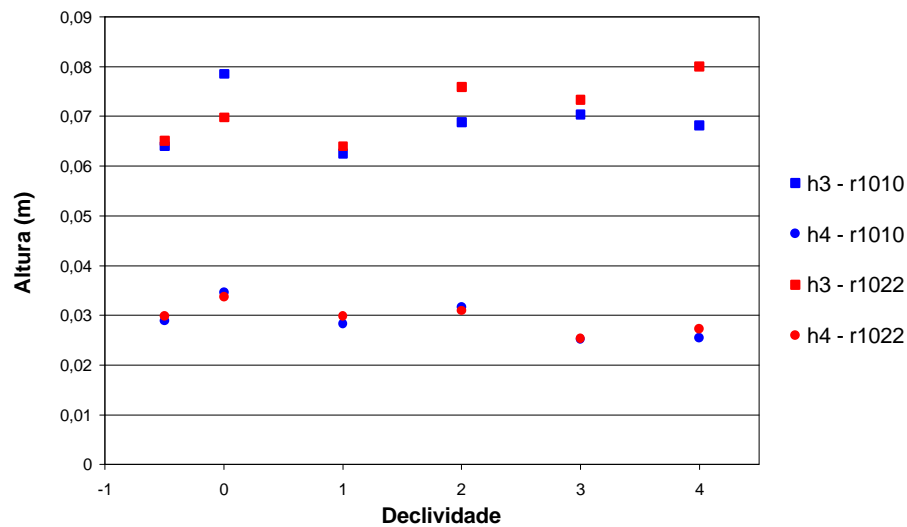


Figura 5.14 - Alturas médias da corrente em função da declividade do canal

Pode-se observar que para as declividades até 1° a altura da cabeça (h_3) não sofre uma influência significativa da densidade. Já para as declividades maiores (2°, 3° e 4°) nota-se um aumento da altura h_3 para $\rho = 1022 \text{ kg/m}^3$ em relação a solução de menor densidade. A altura do corpo (h_4) mantém o mesmo comportamento para as duas densidades nas diferentes declividades.

5.3.6 Variação espacial da altura da corrente

Para as mesmas seções onde a velocidade foi avaliada, procedeu-se à medição da altura da corrente, tendo sido avaliada em duas partes distintas da corrente: a altura da cabeça

(h_3) e altura do corpo (h_4). A figura 5.15 apresentam a média das três repetições para cada ensaio.

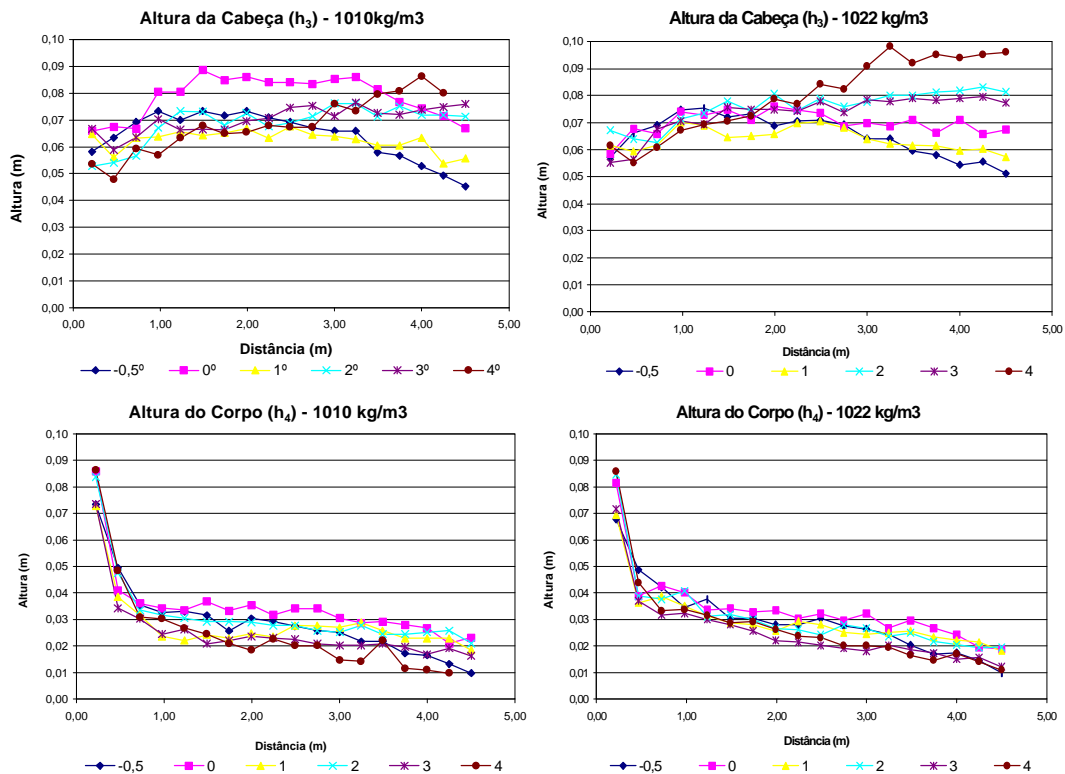


Figura 5.15 - Distribuição espacial da altura média da corrente de densidade

Pode-se observar que para as declividades menores ($-0,5^\circ$ a 1°) a altura da cabeça atinge um valor máximo em torno da seção 1,75 m e depois decresce até o final do canal para ambos os ensaios de 1010 kg/m^3 e 1022 kg/m^3 . Para as declividades maiores (2° a 4°) a altura da cabeça sofre um crescimento ao longo do canal, sendo mais pronunciado na declividade de 4° .

A altura do corpo (h_4) apresenta uma diminuição constante ao longo do canal, se for desconsiderada a seção 0,25 m. Como já mencionado anteriormente, os ensaios com menor declividade apresentam maior volume inicial, explicando a maior altura h_4 destes em relação aos de maior declividade.

5.3.7 Perfil de concentração da cabeça da corrente

As sondas de condutividade desenvolvidas durante a pesquisa foram utilizadas para avaliar o perfil de concentração da cabeça da corrente em diferentes situações. As sondas estavam posicionadas em três diferentes seções ao longo do canal: seção a 2,00 m, a 3,00 m e 4,00 m a jusante da comporta. A primeira sonda é formada por um conjunto duplo com um

total de 16 sensores, enquanto nas seções de 3,00 m e 4,00 m as sondas são simples com 8 sensores cada. Durante os ensaios verificou-se que o escoamento não atingiu a parte superior da sonda dupla. A parte superior seria utilizada caso fosse empregado um volume inicial maior de solução, provocando um aumento na altura da cabeça da corrente.

Foram realizados, nessa etapa, três ensaios com mesma massa específica ($\rho=1010 \text{ kg/m}^3$) e diferentes declividades ($\alpha=-0,5^\circ$; 1° e 3°). Durante o desenvolvimento das sondas se observou que a sua precisão não consegue diferenciar soluções acima de 1020 kg/m^3 , por isso a escolha de uma solução com massa específica mais baixa que o valor limite. Por terem sido realizados durante uma fase mais desenvolvida das sondas de condutividade, a calibração das sondas para os ensaios de declividade $\alpha=-0,5^\circ$; 1° e 3° foi mais acertada que para os ensaios anteriores ($\alpha=0^\circ, 2^\circ$ e 4°) permitindo a correlação dos dados obtidos com a densidade da solução. Durante os ensaios anteriores, o resultado das sondas apresentaram uma discrepância grande em relação a calibração, prejudicando a utilização dessas informações.

Para formar um perfil de concentração de toda a cabeça da corrente foram realizadas seis medições para uma mesma sonda numa seqüência de tempo. Os tempos foram determinados pela frequência de aquisição das sondas (5 Hz). As primeiras quatro aquisições amostradas são feitas a cada 0,4 s, a partir do momento em que a sonda capta a passagem da corrente. As duas amostragens restantes são feitas a cada 0,8 s para captar a camada de mistura formada atrás da cabeça da corrente. Para cada uma das seis medições foi medida a distância do nariz da corrente (parte mais avançada da cabeça) até a sonda. As figuras 5.16 a 5.24 apresentam o perfil de concentração medido pelas sondas, em cada uma das três seções do canal (S200, S300 e S400) nos referidos ensaios de duas formas distintas: a primeira mostra o perfil de concentração medido através de um gráfico de linha, em que cada linha representa a concentração instantânea em cada uma das seis medições. A legenda apresenta a distância em que o nariz da corrente estava em relação à sonda no momento da medição. A figura à direita do gráfico de linhas mostra uma composição das medições através de um gráfico de isolinhas, onde no eixo das coordenadas são apresentadas as distâncias da frente da corrente até a sonda e no eixo das abcissas a altura dos sensores da sonda.

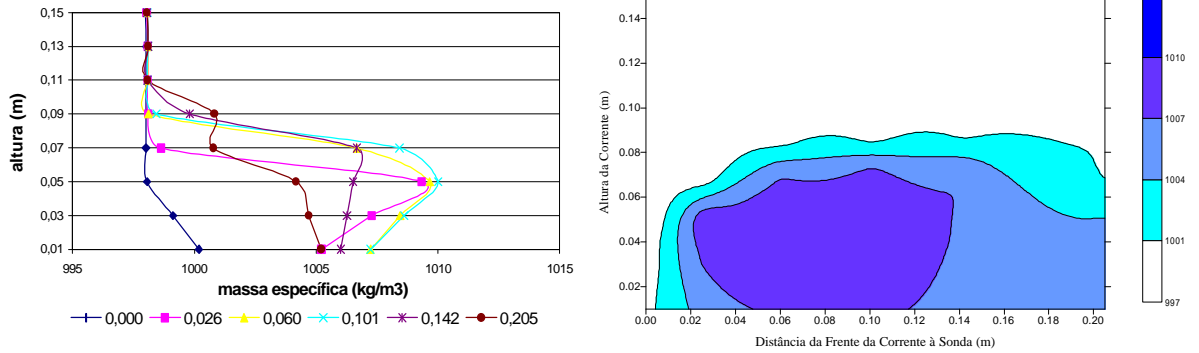


Figura 5.16 - Perfil instantâneo e composto da concentração da corrente: $\alpha=-0,5^\circ$;S200;
1010kg/m³

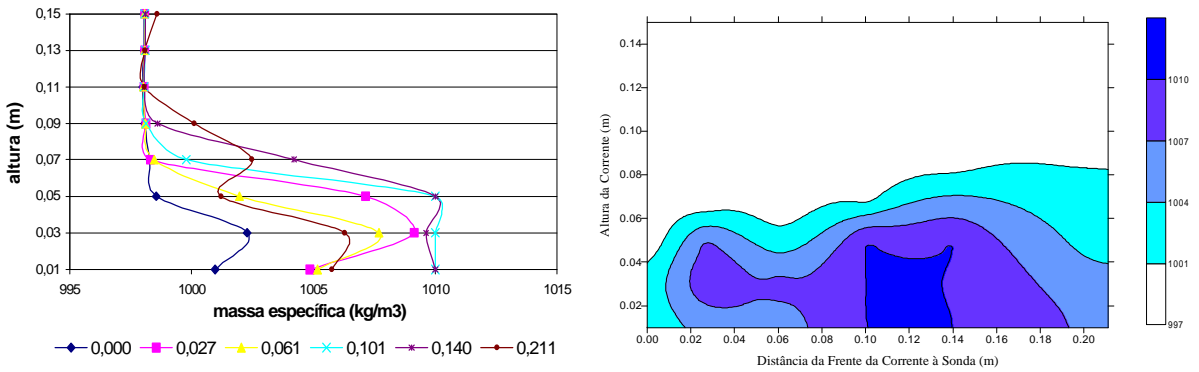


Figura 5.17 - Perfil instantâneo e composto da concentração da corrente: $\alpha=-0,5^\circ$;S300;
1010kg/m³

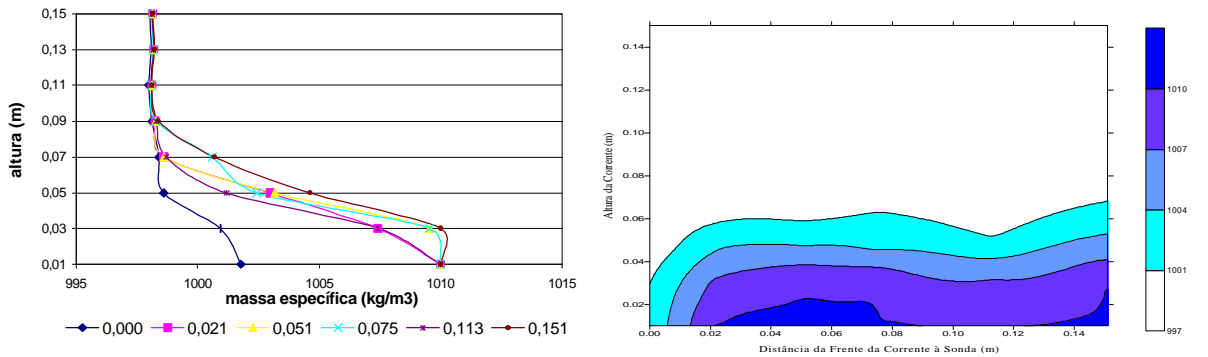


Figura 5.18 - Perfil instantâneo e composto da concentração da corrente: $\alpha=-0,5^\circ$;S400;
1010kg/m³

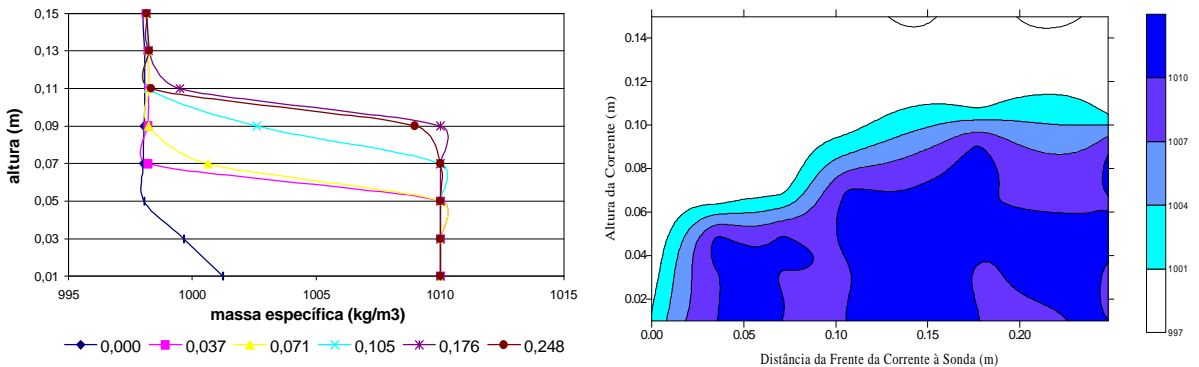


Figura 5.19 - Perfil instantâneo e composto da concentração da corrente: $\alpha=1^\circ$;S200;
1010kg/m³

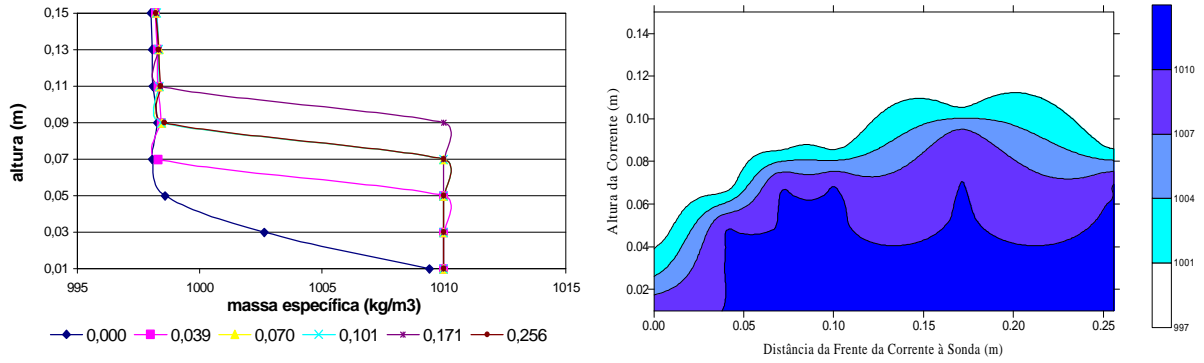


Figura 5.20 - Perfil instantâneo e composto da concentração da corrente: $\alpha=1^\circ$;S300;
1010kg/m³

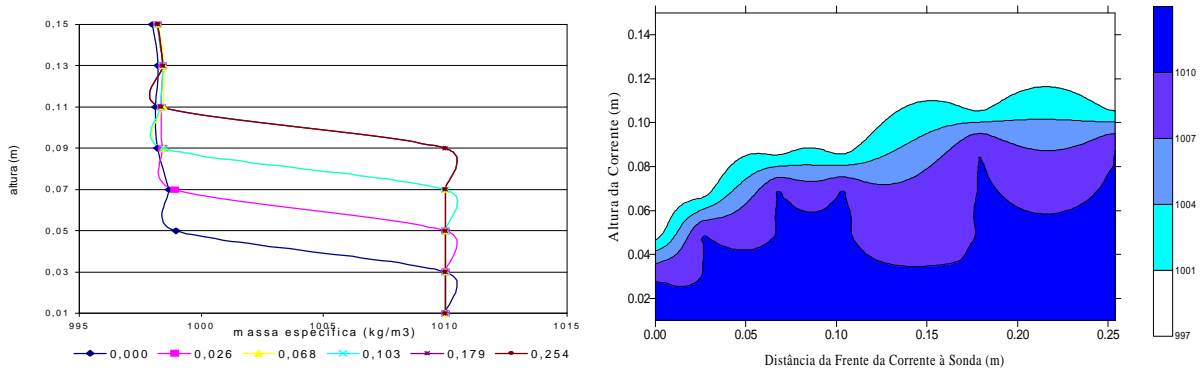


Figura 5.21 - Perfil instantâneo e composto da concentração da corrente: $\alpha=1^\circ$;S400;
1010kg/m³

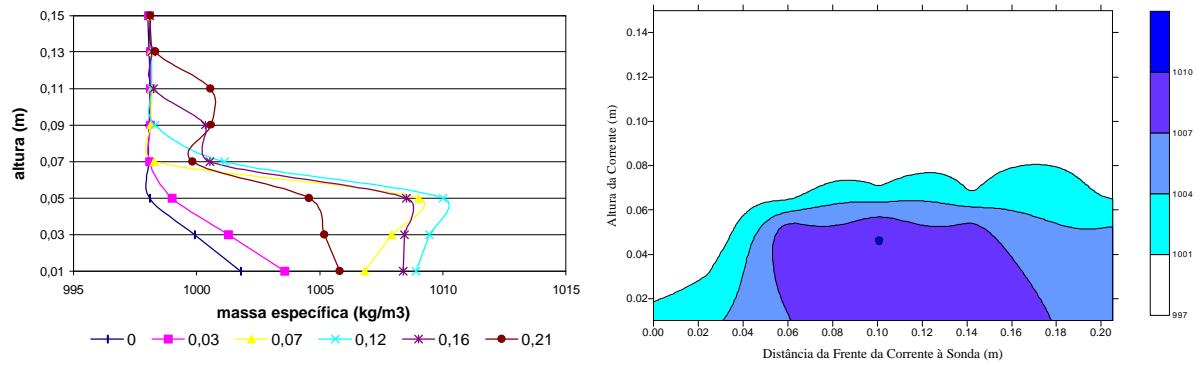


Figura 5.22 - Perfil instantâneo e composto da concentração da corrente: $\alpha=3^\circ$;S200;
1010kg/m³

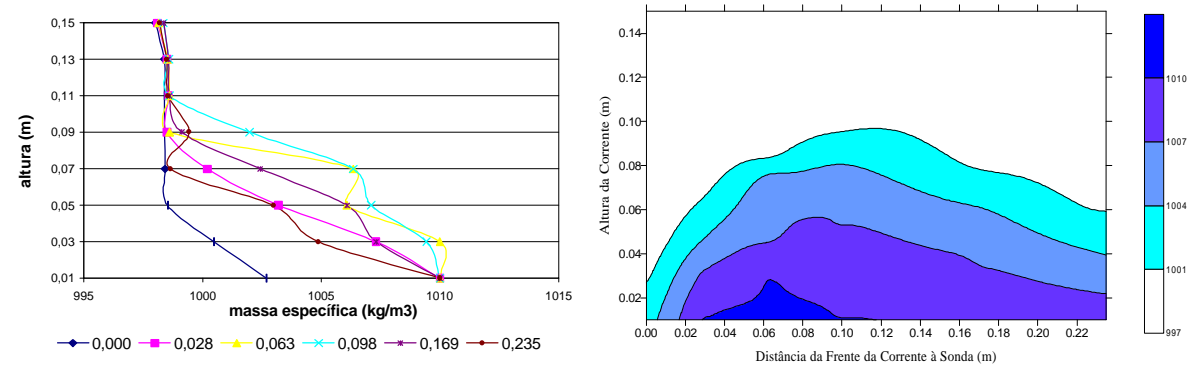


Figura 5.23 - Perfil instantâneo e composto da concentração da corrente: $\alpha=3^\circ$;S300;
1010kg/m³

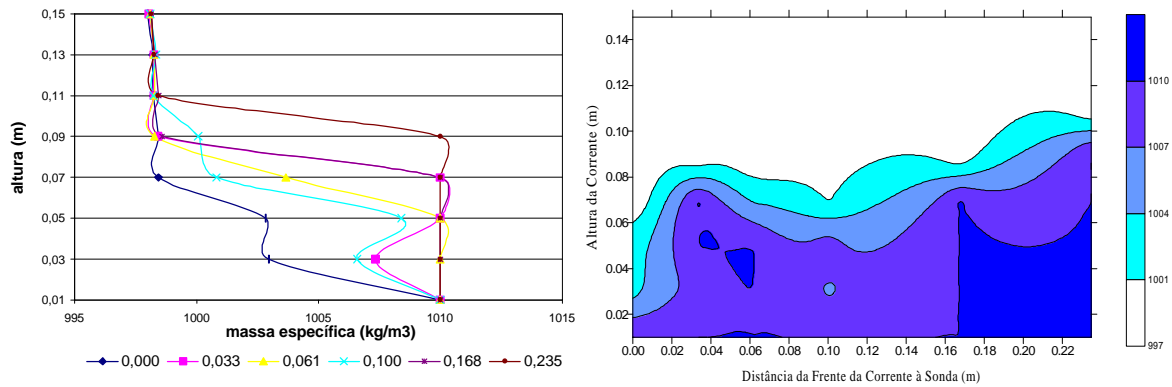


Figura 5.24 - Perfil instantâneo e composto da concentração da corrente: $\alpha=3^\circ$; S400;
 1010kg/m^3

Os resultados obtidos pelas sondas não apresentaram precisão suficiente para se fazer uma análise quantitativa. Alguns problemas durante a calibração e também variações no sinal das sondas impossibilitaram a correlação com precisão do sinal obtido com a massa específica, principalmente na faixa de densidades próximas a da solução (1010 kg/m^3). Em diversos pontos as sondas mediram densidades superiores à própria solução original, o que indica problemas de precisão da medida, já que o valor máximo de densidade é o da solução original. Não existe nenhum processo que possa aumentar a densidade da corrente durante o escoamento. Esse comportamento mostrou que o sinal medido pela sonda atingiu um ponto de saturação, em que não há mais precisão suficiente para determinar a densidade. Nesta faixa o sinal também sofre oscilações, o que explica os pontos com densidades acima daquela da solução inicial. Para contornar esse problema foi aplicada uma correção dos dados de saída. As medidas tomadas para estabelecer a correção foram as seguintes: para cada conjunto de dados foi identificado o valor máximo e mínimo de massa específica medidos pela sonda. A partir desses valores extremos foi aplicada uma redução linear dos valores para a faixa de $998\text{ kg/m}^3 < r < 1010\text{ kg/m}^3$. Em alguns casos a sonda registrou valores superiores aqueles da faixa de calibração, portanto não haviam valores de massa específica relacionados com o sinal registrado. Nesses casos adotou-se o valor de $r = 1010\text{ kg/m}^3$ para esses pontos. As tabelas 5.5, 5.7 e 5.9 apresentam os resultados obtidos pelas sondas de condutividade para os ensaios de $r = 1010\text{ kg/m}^3$ e declividades $-0,5^\circ$, 1° e 3° , respectivamente. As tabelas 5.6, 5.8 e 5.10 apresentam os resultados corrigidos pela metodologia acima citada das tabelas 5.5, 5.7 e 5.9. Os valores apresentados na primeira linha das tabelas para cada uma das seções indica a altura do sensor (distância no eixo y), enquanto a primeira coluna das tabelas indicam a seção em que a sonda estava instalada e a segunda coluna indica a distância no eixo x do nariz da corrente em relação a posição da sonda, para cada umas das medições. Os valores de massa específica apresentados tem unidade de kg/m^3 .

Tabela 5.5 – Valores de massa específica obtidos para o ensaio $\alpha = -0,5^\circ$ e 1010 kg/m^3

Seção	ds(m)	0,01	0,03	0,05	0,07	0,09	0,11	0,13	0,15
S200	0,000	1001	1000	998	998	998	998	998	998
	0,026	1009	1013	1016	999	998	998	998	998
	0,060	1013	1015	1016	1012	998	998	998	998
	0,101	1013	1015	1017	1014	999	998	998	998
	0,142	1011	1011	1011	1012	1001	998	998	998
	0,205	1009	1009	1008	1002	1002	998	998	998
	ds(m)	0,01	0,03	0,05	0,07	0,09	0,11	0,13	0,15
S300	0,000	1003	1005	999	998	998	998	998	998
	0,027	1010	1017	1014	999	998	998	998	998
	0,061	1010	1015	1005	999	998	998	998	998
	0,101	1010	1010	1019	1001	998	998	998	998
	0,140	1010	1018	1010	1009	999	998	998	998
	0,211	1011	1012	1004	1006	1002	998	998	999
	ds(m)	0,01	0,03	0,05	0,07	0,09	0,11	0,13	0,15
S400	0,000	1004	1002	999	998	998	998	998	998
	0,021	1010	1012	1005	999	998	998	998	998
	0,051	1010	1015	1006	999	998	998	998	998
	0,075	1010	1015	1005	1002	998	998	998	998
	0,113	1010	1012	1003	999	998	998	998	998
	0,151	1010	1016	1008	1002	998	998	998	998

Tabela 5.6 – Valores corrigidos para o ensaio $\alpha = -0,5^\circ$ e 1010 kg/m^3

Seção	ds(m)	0,01	0,03	0,05	0,07	0,09	0,11	0,13	0,15
S200	0,000	1000	999	998	998	998	998	998	998
	0,026	1005	1007	1009	999	998	998	998	998
	0,060	1007	1008	1010	1007	998	998	998	998
	0,101	1007	1009	1010	1008	998	998	998	998
	0,142	1006	1006	1007	1007	1000	998	998	998
	0,205	1005	1005	1004	1001	1001	998	998	998
	ds(m)	0,01	0,03	0,05	0,07	0,09	0,11	0,13	0,15
S300	0,000	1001	1002	999	998	998	998	998	998
	0,027	1005	1009	1007	998	998	998	998	998
	0,061	1005	1008	1002	998	998	998	998	998
	0,101	1010	1010	1010	1000	998	998	998	998
	0,140	1010	1010	1010	1004	999	998	998	998
	0,211	1006	1006	1001	1002	1000	998	998	999
	ds(m)	0,01	0,03	0,05	0,07	0,09	0,11	0,13	0,15
S400	0,000	1002	1001	999	998	998	998	998	998
	0,021	1010	1007	1003	999	998	998	998	998
	0,051	1010	1010	1003	999	998	998	998	998
	0,075	1010	1010	1002	1001	998	998	998	998
	0,113	1010	1007	1001	999	998	998	998	998
	0,151	1010	1010	1005	1001	998	998	998	998

Tabela 5.7 – Valores de massa específica obtidos para o ensaio $\alpha = 1^\circ$ e 1010 kg/m^3

Seção	ds(m)	0,01	0,03	0,05	0,07	0,09	0,11	0,13	0,15
S200	0,000	1003	1000	998	998	998	998	998	998
	0,037	1010	1010	1010	998	998	998	998	998
	0,071	1010	1010	1010	1002	998	998	998	998
	0,105	1010	1010	1010	1010	1005	998	998	998
	0,176	1010	1010	1010	1016	1010	1000	998	998
	0,248	1010	1010	1010	1016	1015	998	998	998
	ds(m)	0,01	0,03	0,05	0,07	0,09	0,11	0,13	0,15
S300	0,000	1009	1003	998	998	998	998	998	998
	0,039	1010	1010	1010	998	998	998	998	998
	0,070	1010	1010	1010	1010	998	998	998	998
	0,101	1010	1010	1010	1010	998	998	998	998
	0,171	1010	1010	1010	1010	1010	998	998	998
	0,256	1010	1010	1010	1010	998	998	998	998
	ds(m)	0,01	0,03	0,05	0,07	0,09	0,11	0,13	0,15
S400	0,000	1010	1010	999	999	998	998	998	998
	0,026	1010	1010	1010	999	998	998	998	998
	0,068	1010	1010	1010	1010	998	998	998	998
	0,103	1010	1010	1010	1010	998	998	998	998
	0,179	1010	1010	1010	1010	1010	998	998	998
	0,254	1010	1010	1010	1010	1010	998	998	998

Tabela 5.8 – Valores corrigidos para o ensaio $\alpha = 3^\circ$ e 1010 kg/m^3

Seção	ds(m)	0,01	0,03	0,05	0,07	0,09	0,11	0,13	0,15
S200	0,000	1001	1000	998	998	998	998	998	998
	0,037	1010	1010	1010	998	998	998	998	998
	0,071	1010	1010	1010	1001	998	998	998	998
	0,105	1010	1010	1010	1010	1003	998	998	998
	0,176	1010	1010	1010	1010	1010	999	998	998
	0,248	1010	1010	1010	1010	1009	998	998	998
	ds(m)	0,01	0,03	0,05	0,07	0,09	0,11	0,13	0,15
S300	0,000	1009	1003	999	998	998	998	998	998
	0,039	1010	1010	1010	998	998	998	998	998
	0,070	1010	1010	1010	1010	998	998	998	998
	0,101	1010	1010	1010	1010	998	998	998	998
	0,171	1010	1010	1010	1010	1010	998	998	998
	0,256	1010	1010	1010	1010	999	998	998	998
	ds(m)	0,01	0,03	0,05	0,07	0,09	0,11	0,13	0,15
S400	0,000	1010	1010	999	999	998	998	998	998
	0,026	1010	1010	1010	999	998	998	998	998
	0,068	1010	1010	1010	1010	998	998	998	998
	0,103	1010	1010	1010	1010	999	998	998	998
	0,179	1010	1010	1010	1010	1010	998	998	998
	0,254	1010	1010	1010	1010	1010	998	998	998

Tabela 5.9 – Valores de massa específica obtidos para o ensaio $\alpha = 3^\circ$ e 1010 kg/m^3

Seção	ds(m)	0,01	0,03	0,05	0,07	0,09	0,11	0,13	0,15
S200	0,000	1002	1000	998	998	998	998	998	998
	0,026	1005	1002	999	998	998	998	998	998
	0,071	1009	1010	1011	998	998	998	998	998
	0,116	1011	1012	1013	1002	998	998	998	998
	0,155	1011	1011	1011	1001	1001	998	998	998
	0,213	1007	1007	1006	1000	1001	1001	998	998
	ds(m)	0,01	0,03	0,05	0,07	0,09	0,11	0,13	0,15
S300	0,000	1005	1001	999	998	998	998	998	998
	0,028	1010	1012	1006	1001	999	999	999	998
	0,063	1010	1016	1010	1010	999	999	999	998
	0,098	1010	1015	1011	1010	1004	999	999	998
	0,169	1010	1012	1010	1004	999	999	999	998
	0,235	1010	1008	1005	999	1000	999	999	998
	ds(m)	0,01	0,03	0,05	0,07	0,09	0,11	0,13	0,15
S400	0,000	1010	1006	1006	999	999	998	998	998
	0,033	1010	1014	1019	1010	999	998	998	998
	0,061	1010	1010	1010	1008	998	998	998	998
	0,100	1010	1013	1016	1003	1002	998	999	998
	0,168	1010	1010	1010	1010	999	999	998	998
	0,235	1010	1010	1010	1010	1010	999	998	998

Tabela 5.10 – Valores corrigidos para o ensaio $\alpha = 3^\circ$ e 1010 kg/m^3

Seção	ds(m)	0,01	0,03	0,05	0,07	0,09	0,11	0,13	0,15
S200	0,000	1002	1000	998	998	998	998	998	998
	0,026	1004	1001	999	998	998	998	998	998
	0,060	1007	1008	1009	998	998	998	998	998
	0,101	1009	1009	1010	1001	998	998	998	998
	0,142	1008	1008	1009	1001	1000	998	998	998
	0,205	1006	1005	1005	1000	1001	1001	998	998
	ds(m)	0,01	0,03	0,05	0,07	0,09	0,11	0,13	0,15
S300	0,000	1003	1000	999	998	998	998	998	998
	0,028	1010	1007	1003	1000	999	999	999	998
	0,063	1010	1010	1006	1006	999	999	999	998
	0,098	1010	1009	1007	1006	1002	999	999	998
	0,169	1010	1007	1006	1002	999	999	999	998
	0,235	1010	1005	1003	999	999	999	999	998
	ds(m)	0,01	0,03	0,05	0,07	0,09	0,11	0,13	0,15
S400	0,000	1010	1003	1003	998	998	998	998	998
	0,033	1010	1007	1010	1010	998	998	998	998
	0,061	1010	1010	1010	1004	998	998	998	998
	0,100	1010	1007	1008	1001	1000	998	998	998
	0,168	1010	1010	1010	1010	999	998	998	998
	0,235	1010	1010	1010	1010	1010	998	998	998

Com relação aos resultados apresentados pelas sondas de condutividade se podem fazer algumas observações interessantes a respeito do perfil de concentração da corrente de uma forma qualitativa. As figuras apresentadas mostram que a mistura que ocorre na cabeça é mais intensa na parte externa, onde há o contato com o fluido ambiente, mantendo em seu núcleo uma densidade praticamente igual a da solução original. A faixa de massa específica entre 1001 kg/m^3 e 1004 kg/m^3 , representada pela primeira faixa de azul no sentido crescente da escala das figuras, indica que a camada de mistura, principal processo de trocas entre os fluidos, está na parte externa da cabeça e se desenvolve desde o nariz da corrente.

No ensaio com declividade $\alpha = -0,5^\circ$ há um gradativo aumento na espessura da camada de mistura em torno do núcleo da cabeça. Já para os ensaios de $\alpha = 1^\circ$ e $\alpha = 3^\circ$ a camada permanece com uma espessura constante ao longo das seções. Isso pode ser explicado pela velocidade da corrente para as diferentes declividades ao longo das seções. Para as duas declividades positivas a corrente aumenta a velocidade, enquanto para a declividade negativa a corrente diminui a velocidade durante o escoamento. Pode-se dizer que quando a corrente diminui sua velocidade a camada de mistura aumenta, causando uma diminuição no gradiente de concentração.

5.4 Análise do Desprendimento dos Vórtices na Interface da Corrente de Densidade

5.4.1 Descrição geral

Durante a análise das filmagens dos ensaios observou-se que a velocidade da cabeça da corrente de densidade apresentava uma oscilação em torno de um valor médio. Constatou-se, também, uma variação da velocidade ao longo do canal, mesmo para as inclinações maiores. Esta oscilação, inicialmente atribuída a possíveis erros de aquisição de dados, foi confirmada em ensaios específicos para esse fim. Nestes ensaios verificou-se uma determinada regularidade de frequência (ou de período) de oscilação destes valores ao longo de trechos característicos (início, meio e fim da corrente). Como não há registros na bibliografia da origem desta variabilidade, passou-se a estudá-la em maior detalhe.

A hipótese levantada para explicar a variação da velocidade em torno da média é da influência dos desprendimentos dos vórtices, na interface entre a cabeça da corrente e o fluido ambiente, no coeficiente de arraste. Quando do desprendimento de cada vórtice, supõe-se uma diminuição do coeficiente de arraste, com conseqüente aceleração do movimento, causada por uma menor área transversal resistindo ao fluxo. Por outro lado, à medida que cresce o vórtice junto à cabeça, o comportamento é inverso.

Este fenômeno é importante na modelagem física das corrente de densidade, pois supõe-se que a frequência de desprendimento dos vórtices, no nosso caso, talvez seja regida pelo número de Strouhal ($S_t = \omega L / U_f$, onde ω é uma frequência característica, L e U_f são, respectivamente, uma dimensão e uma velocidade características do fluxo), o que ocorre quando do movimento de um corpo sólido num meio fluido. Guardada as devidas proporções, meio líquido de maior densidade deslocando-se num meio líquido de menor densidade, a correlação entre o número de Strouhal do protótipo e do modelo poderá indicar um efeito de escala que deverá ser corrigido na transposição de um resultado para outro.

As oscilações de velocidade terão forte influência sobre os depósitos gerados pela passagem da corrente de densidade não conservativas, pois quando ocorre a desaceleração do fluxo, haverá um ambiente mais propício da deposição do material, o que se traduziria pela presença de ondulações (camadas) nos padrões deposicionais.

Para testar a validade dessas suposições, procedeu-se à realização de ensaios específicos, para os quais foram tomados cuidados especiais no registro por filmagem, na análise das velocidades e na determinação do momento do desprendimento dos vórtices.

Cabe ressaltar que uma análise mais detalhada das filmagens é possível graças ao advento da filmagem digital e ao aperfeiçoamento dos aplicativos de tratamento de imagens, permitindo e facilitando a detecção de pequenas variações do movimento.

5.4.2 Ensaios Realizados

Foram realizados quatro ensaios complementares, com o canal na declividade de 2° , massa específica de 1022 kg/m^3 e volume inicial variando entre 55 L e 72 L, o que representa uma altura na comporta de 0,12 m e 0,15 m, respectivamente.

Os ensaios foram filmados, priorizando o acompanhamento da cabeça da corrente. Essas imagens foram analisadas, aplicando-se dois tratamentos distintos: o primeiro visando estabelecer, de forma mais detalhada, a velocidade de avanço da corrente; o segundo visando estabelecer um critério para identificação dos vórtices e do instante de seu desprendimento.

5.4.3 Avaliação da Frequência Dominante nas Oscilações da Velocidade

A figura 5.25 apresenta a variação, ao longo do tempo, da velocidade média do avanço da corrente para as duas situações de volumes. Nela estão presentes as duas repetições realizadas; nota-se a boa reprodutibilidade dos resultados. A maior discrepância notada nos ensaios com volume $V = 55 \text{ L}$ ocorre devido ao fato de que eles foram realizados em dias distintos. Confirma-se a oscilação dessas velocidades, demonstrando que o regime permanente não se estabelece tão facilmente no fluxo.

A tabela 5.5 apresenta, em termos médios, as velocidades média, máxima e mínima registradas nos ensaios, as alturas médias, máxima e mínima atingidas pela cabeça da corrente em algum instante ao longo do canal e algumas outras informações relativas às condições de ensaio. Destas, cabe comentar os volumes, os quais correspondem a um acréscimo ou decréscimo de 10% da altura da solução na comporta em relação aos ensaios com altura inicial de 13,5 cm.

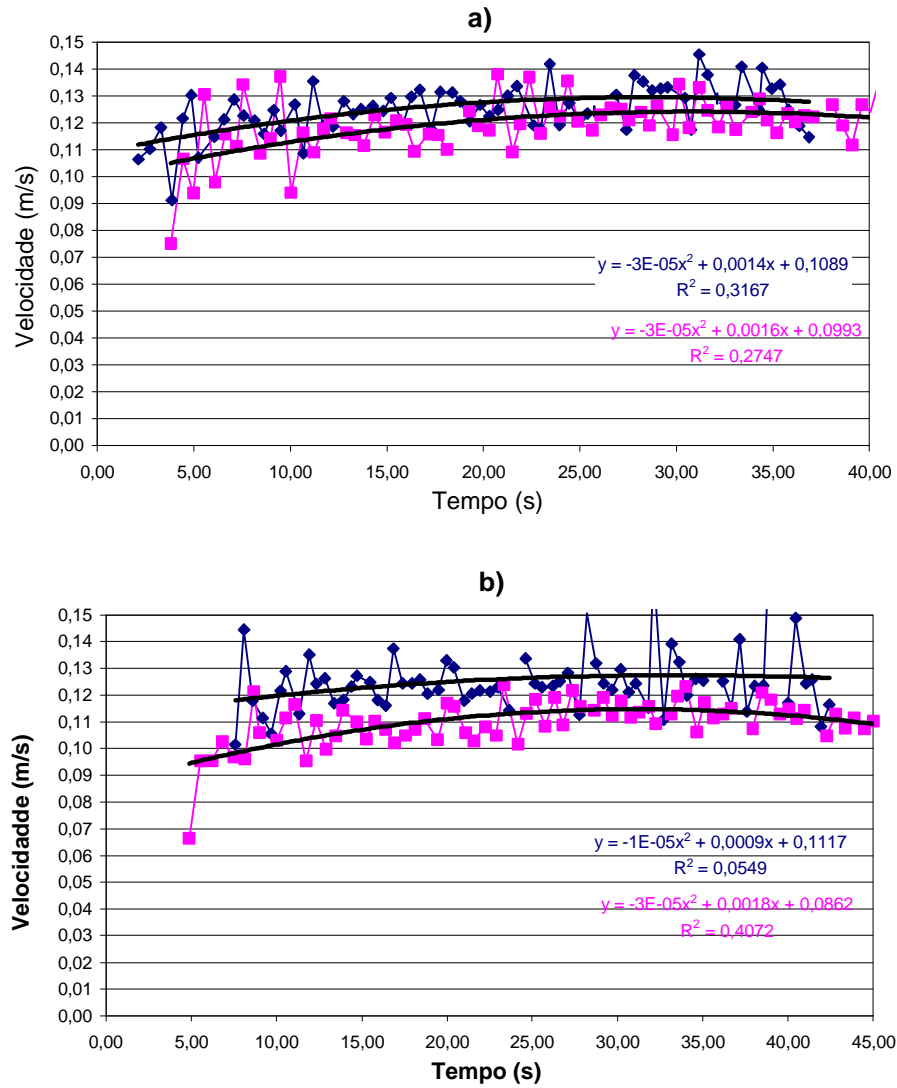


Figura 5.25 - Variação da velocidade em função do tempo de ensaio para os volumes de solução ensaiados. a) volume 72 L b) volume 55 L

Tabela 5.11 - Resultados da análise dos ensaios complementares para estudo do desprendimento de vórtices

		V=72L R1	V=72L R2	V=55L R1	V=55L R2
Temperatura (°C)		17	17	17	17
Massa específica (kg/m ³)		1022	1022	1022	1022
Inclinação (graus)		2	2	2	2
Profundidades (cm)	fluido ambiente	68.5	69.5	69.0	68.5
	solução	14.9	14.9	12.2	12.2
Altura da cabeça corrente (m)	Média	0.0778	0.0782	0.0590	0.0752
	Máxima	0.0893	0.0929	0.0695	0.0865
	Mínima	0.0615	0.0581	0.0500	0.0567
Velocidade (m/s)	Média	0.1269	0.1210	0.1256	0.1131
	Máxima	0.1455	0.1372	0.1489	0.1232
	Mínima	0.1102	0.0937	0.1108	0.0953

Dos dados da tabela 5.5 nota-se que a velocidade média de avanço da cabeça da corrente é de 0,124 m/s e 0,1194 m/s, respectivamente, para os volumes 72 L e 55 L. A altura da cabeça assume, em média nas repetições, os valores 7,8 cm e 6,7 cm, respectivamente, para as duas condições de ensaio.

Para identificar uma frequência característica da oscilação das velocidades foi aplicada a técnica de Transformada Rápida de Fourier (FFT), com auxílio do aplicativo MATLAB. A série temporal original dos dados de velocidade média de avanço da corrente, por ter sido estabelecida através de tratamento de imagens, apresentava intervalos de tempo variáveis. O emprego da técnica de FFT exige que os intervalos de tempo sejam constantes, pois a eles corresponderá uma única frequência de aquisição dos dados. Assim, o vetor de dados temporais de velocidade foi interpolado, com o auxílio de rotina de interpolação do MATLAB, a fim de obter os dados discretizados a cada 0,25 s, o que conduz a uma frequência de amostragem de 4 Hz. As figuras 5.26 e 5.27 apresentam o resultado final da identificação da existência de uma frequência dominante de oscilação das velocidades, resultado da determinação de seu espectro de potências.

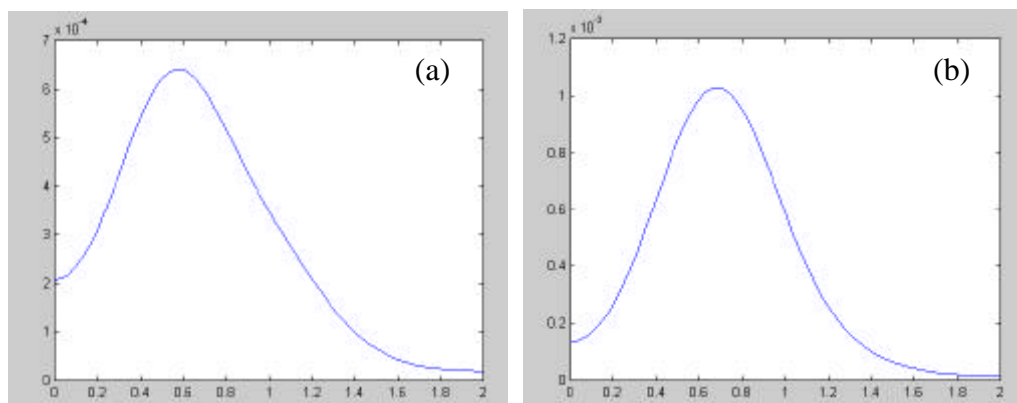


Figura 5.26 - Espectro de potência para o ensaio V=72 L repetição 1 (a) e repetição 2 (b)

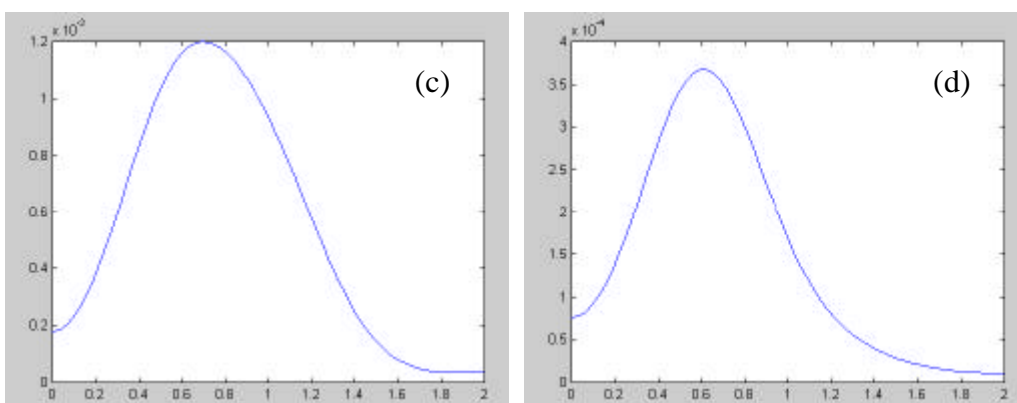


Figura 5.27 - Espectro de potência para o ensaio V=55 L repetição 1 (c) e repetição 2 (d)

Através da análise dos espectros de potência calculados para as oscilações da velocidade medidas nos ensaios (figura 5.25), nota-se que a sua frequência natural de ocorrência é de 0,65 Hz, o que corresponde a um período da ordem de 1,67 s. A tabela 5.6 apresenta as frequências dominantes para os ensaios.

Tabela 5.12 - Frequência dominante das oscilações de velocidade

Ensaio	Número de dados após interpolação	Frequência dominante (s^{-1})	Intervalo médio de oscilação (s)
V=72L	141	0,6	1,667
V=72L	149	0,7	1,428
V=55L	141	0,7	1,428
V=55L	161	0,6	1,667
médias	-	0,65	1,538

5.4.4 Frequência de Desprendimento dos Vórtices

Paralelamente, foi realizada a identificação do desprendimento dos vórtices. A detecção do instante (tempo) no qual ocorria o desprendimento dos turbilhões exigiu o estabelecimento de um critério a aplicar quando do tratamento das imagens filmadas. Cabe mencionar que esta detecção apresenta mais dificuldades que medir as alturas e os comprimentos ao longo da corrente, pois estas grandezas apresentam limites mais bem definidos. Os vórtices variam de tamanho e podem se sobrepor, o que dificulta a identificação exata do desprendimento.

Após algumas tentativas, o critério adotado para definir o desprendimento do vórtice foi identificar o instante no qual se visualiza o descolamento de um volume definido da cabeça da corrente. A figura 5.28 apresenta uma seqüência de desprendimento de um vórtice

A tabela 5.7 é uma síntese do tratamento realizado apresentando o número de desprendimentos identificados, o intervalo de tempo entre sua formação e o desprendimento da cabeça (média dos valores) e sua frequência.

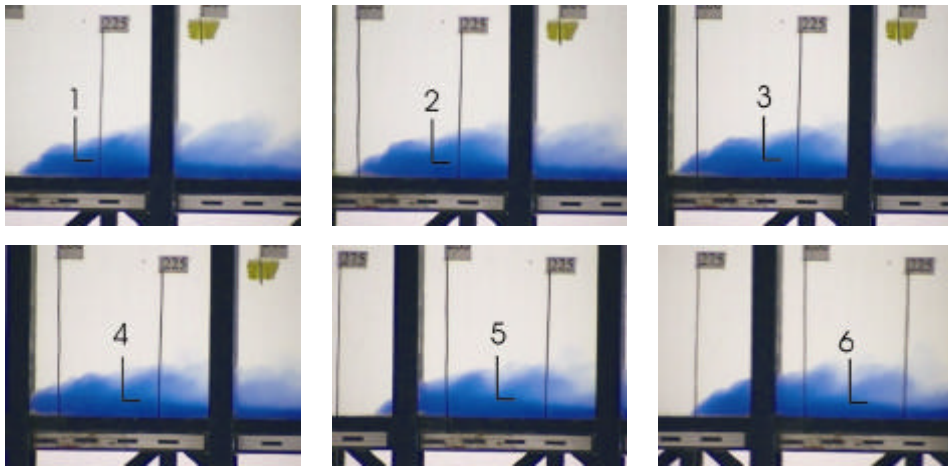


Figura 5.28 - Sequência de desprendimento de um vórtice – ensaio V=72 L R1

Tabela 5.13 - Frequência do desprendimento dos vórtices na interface da cabeça da corrente de densidade.

Ensaio	Número de turbilhões identificados	Intervalo médio de desprendimento (s)	Frequência (s^{-1})
V=72L R1	17	2.002	0.499
V=72L R2	18	1.912	0.540
V=55L R1	19	1.770	0.565
V=55L R2	23	1.765	0.567
médias	19,25	1,862	0,543

A análise do fenômeno de desprendimento dos vórtices e oscilação das velocidades feita através do número de Strouhal é resumida na tabela 5.8. Nota-se que o número de Strouhal, calculado para a frequência de oscilação das velocidades é de 0,387 e que, o mesmo número, calculado para a frequência de desprendimento dos vórtices na interface dos fluidos é de 0,309. Vê-se claramente a semelhança e a correlação entre os fenômenos.

Tabela 5.14 - Número de Strouhal calculado para as frequências dominantes da oscilação de velocidade e do desprendimento dos vórtices

Ensaio	oscilações			Altura cabeça (m)	turbilhões	
	velocidade (m/s)	Frequência (Hz)	Strouhal		Frequência (s^{-1})	Strouhal
V=72 L	0.124	0.65	0.409	0.078	0.499	0.314
V=55 L	0.1194	0.65	0.365	0.067	0.540	0.303
		média	0.387		média	0.309

5.4.5 Conclusões Parciais

O escoamento da corrente não atinge um regime permanente, sendo que para as declividades menores a velocidade atinge um valor máximo e depois diminui. Os ensaios no canal bidimensional confirmaram a influência da diferença de densidade na dinâmica da corrente (o acréscimo de 1% da densidade causa um aumento de 25% na velocidade da corrente).

Obteve-se uma confirmação parcial da hipótese levantada sobre a relação da oscilação da velocidade, no sentido longitudinal do escoamento, e do desprendimento dos turbilhões na medida em que a frequência dos dois fenômenos são próximos.

Também se verificou que o número de Strouhal do desprendimento dos vórtices e da oscilação da velocidade tem a mesma ordem de grandeza daquele do desprendimento de vórtices atrás de corpos sólidos sob ação de escoamento ($S_t = 0,3$). Apesar de se tratarem de fenômenos não completamente semelhantes, pois o fluido mais denso deforma-se ao longo do escoamento, a analogia é válida, mas não completa.

6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A dinâmica de correntes de densidade conservativas pôde ser analisada nesta pesquisa com a identificação dos principais parâmetros que influenciam o escoamento. A diferença de massa específica (Dr) se mostrou um parâmetro determinante no escoamento da corrente, pois o aumento de apenas 1% de Dr ocasionou um acréscimo de 25% na velocidade média. Essa avaliação foi constatada nos ensaios do canal unidimensional e confirmada nos ensaios do canal bidimensional. O processo de mistura entre os fluidos também é influenciado pela massa específica da corrente: quanto menor é Dr , maior é a mistura entre os fluidos.

A avaliação da influência do volume inicial realizada no canal unidimensional mostrou que, a partir de um volume inicial mínimo, a velocidade da corrente permanece aproximadamente constante nas seções avaliadas. Essa verificação indica que correntes com volumes iniciais maiores terão um maior alcance em distância, mesmo apresentando velocidades semelhantes a uma corrente de menor volume inicial.

Quanto à avaliação da ocorrência da corrente de densidade em regime permanente, os ensaios do canal bidimensional, indicaram que a velocidade de avanço da corrente varia ao longo do canal. Observou-se que a corrente acelera até atingir uma velocidade máxima e desacelera em seguida, como nos casos dos ensaios de declividade $-0,5^\circ$, 0° , 1° e 2° . Para as declividades de 3° e 4° não se observou a desaceleração da corrente, pois a velocidade máxima do escoamento foi atingida em seção próximo ao fim do canal.

Quanto à massa específica da solução salina observou-se que valores menores que 1010 kg/m^3 trouxeram complicações práticas na preparação do ensaio, pois, ao serem injetadas na câmara inicial, sofriam um rápido processo de difusão com a água ambiente, comprometendo a manutenção da massa específica inicial da corrente.

Outro parâmetro avaliado no escoamento das correntes foi a altura da cabeça, a qual sofre um crescimento ao longo do escoamento e é mais pronunciada nas declividades maiores.

As sondas de condutividade desenvolvidas durante a pesquisa para medição das concentrações apresentaram algumas limitações quanto a sua aplicação. A faixa de maior sensibilidade das sondas é bastante restrita, ficando entre 998 kg/m^3 e 1001 kg/m^3 . Após esse valor, a sensibilidade tem uma redução acentuada apresentando um limite em torno de 1020 kg/m^3 , mas ainda com possibilidade de correlacionar os resultados com a massa específica. Soluções salinas acima de 1020 kg/m^3 causam saturação na resposta da sonda impossibilitando a correlação de informações. Isso se torna um limitador para a configuração dos ensaios, limitando a utilização das sondas de condutividade. Mesmo com as limitações

apresentas pelas sondas durante os ensaios, os resultados apresentados permitiram avaliar que o processo de mistura que ocorre na cabeça é mais intensa na parte externa, onde há o contato com o fluido ambiente, mantendo em seu núcleo uma densidade praticamente igual a da solução original.

Durante o estudo da velocidade da corrente em diferentes declividades se observou uma oscilação em torno do valor médio da velocidade. A análise mais detalhada indicou que havia uma frequência dominante no comportamento da variação da velocidade, o que levou a formulação da hipótese da relação dessa oscilação com o desprendimento de turbilhões. Esse estudo mostra que os números de Strouhal (S_t) da oscilação da velocidade e do desprendimento dos turbilhões tem mesma ordem de grandeza, indicando que há a dependência dos fenômenos.

As recomendações para futuros estudos que sigam esta mesma linha de pesquisa são feitas a seguir:

Adoção de volumes iniciais menores para o canal bidimensional, o que faz com que nesta configuração de canal, a velocidade máxima ocorra numa seção mais próxima ao início do canal. Em outras palavras, volumes iniciais menores geram correntes de densidade que podem se desenvolver completamente no canal empregado. O uso de volumes maiores exige que o canal seja mais longo para que a corrente de densidade acelere e desacelere ao longo de seu percurso. Recomenda-se, também, avaliar declividades maiores ($4^\circ < \alpha < 10^\circ$), para verificar a variação de velocidades nessas condições.

Estender a análise de correlação entre as frequências de oscilação de velocidade e desprendimento de vórtices para outras declividades e outras massas específicas que induzam diferentes oscilações de velocidade, a fim de confirmar ou não a existência de mais uma escala a ser respeitada na simulação de correntes de densidade

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BEGHIN, P., HOPFINGER, E. J. e BRITTER, R. E. (1981), “Gravitational convection from instantaneous sources on inclined boundaries”, *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 107, pag. 407-422.

BRITTER, R. E. e LINDEN, P. F. (1980), “The motion of the front of a gravity current travelling down a incline”, *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 99, parte 3, pag. 531-543.

BRITTER, R. E. e SIMPSON, E. J. (1978), “Experiments on the dynamics of a gravity current head”, *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 88, parte 2, pag. 223-240.

BRITTER, R. E. e SIMPSON, E. J. (1981), “A note on the structure of the head of an intrusive gravity current”, *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 112, pag. 459-466.

CHIEN, N e WAN, C. H. (1998), “Density currents”, In: “*Mechanics of Sediment Transport*”, American Soc. of Civil Engineers, pag. 621-683.

CLAUDE (1990), “*Phénomènes de Transport: Bases Fundamentales et Applications Biologiques*”, ABIBOL, pag. 318.

GRAF, W. e ALTINAKAR, M. S. (1998), “Turbidity currents”, In: “*Fluvial Hydraulics: Flow and Transport processes in channels of simple geometry*”, Jonh Wiley e son Ltda., pag. 468-516.

HEEZEN, B. C. e EWING, M. (1952), “Turbidity currents and submarine slumps and the 1929 Grand Banks erthquake”, *Am. J. Sci.*, vol. 250, pag. 849-873.

HUPPERT, H. E. e SIMPSON, J. E. (1980), “The slumping of gravity currents”, *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 99, parte 4, pag. 785-799.

KEULEGAN, G. H. (1951), “Fifth progress report on model law for density currents: distorted models in density current phenomena”, *Nat. Bur. Standards Rept.* vol. 1188, 21 pags.

- LAVAL, A., CREMER, P., BEGHIN, P. & RAVENNE, C. (1988), "Density surges: two-dimensional experiments", *Sedimentology*, vol. 35, pag. 73-84.
- MIDDLETON, G. V. (1966), "Small-scale models of turbidity currents and the criterion for auto-suspension", *Journal of Sedimentary Petrology*, vol. 36, vol. 1, pag. 202-208.
- MULDER, T e ALEXANDER, J (2001), "The physical character of subaqueous sedimentary density flows and their deposits", *Sedimentology*, vol. 48, pag. 269-299.
- ROSEMOUNT ANALYTICAL (1998), "Theory and application of conductivity", In: CD-ROM "From the Laboratory to the Planet... Complete Analytical Solutions – Applications Data Sheets – General Applications", ADS 43-018, pag. 1-5.
- SELLEY, R. C., (1998), "Transportation and sedimentation", In: "Applied Sedimentology", Academic Press, pag. 79-114
- SIMPSON, E. J. (1969), *Quart. J. Roy. Met. Soc.*, vol. 95, pag. 58.
- SIMPSON, E. J. (1972), "Effects of the lower boundary on the head of a gravity current", *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 53, parte 4, pag. 759-768.
- SIMPSON, E. J. (1982), "Gravity currents in the laboratory, atmosphere, and ocean", *Ann Rev. Fluid Mechanics*, vol. 14, pag. 213-234.
- SIMPSON, E. J. e BRITTER, R. E. (1978), "Experiments on the dynamics of a gravity current head", *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 88, parte 2, pag. 223-240.
- SIMPSON, E. J. e BRITTER, R. E. (1979), "The dynamics of the head of a gravity current advancing over a horizontal surface", *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 94, parte 3, pag. 477-495.
- TURNER, J. S. (1973), "Buoyancy effects in fluids", *Cambridge Univ. Press*, pag. 367.
- VERGARA, M. A. (1995), "Técnicas de Modellacion en Hidraulica", Ed. Alfaomega, pag. 294.

8. ANEXOS

ANEXO 1: ANÁLISE DIMENSIONAL

ANEXO 1: ANÁLISE DIMENSIONAL

1. REVISÃO DE CONCEITOS

Este anexo tem por objetivo apresentar equações hidrodinâmicas unidimensionais que estabelecem o escoamento de correntes de turbidez que permitem uma melhor compreensão do fenômeno. Os processos hidrodinâmicos que ocorrem na cabeça da corrente e que regem seu movimento, como a formação de lobos (figura 3.2), a incorporação de fluido junto a corrente, a fonte principal do esforço de arraste, são fortemente tridimensionais. Desta forma as equações unidimensionais deverão incorporar esses fenômenos através de coeficientes determinados experimentalmente. Ao final são normalizadas as equações sugerindo números adimensionais que tem relação direta com as equações desenvolvidas.

Esses números são utilizados para a análise dos ensaios realizados bem como para comparação de resultados com diferentes autores.

As equações apresentadas na bibliografia estudada não apresenta detalhes da particularização das equações da mecânica dos fluidos para o caso de corrente de turbidez. Assim, esse anexo se dedica a demonstração dessa particularização tendo como base as equações da continuidade e equações de movimento para a fase líquida do escoamento e fase sólida.

Antes, porém, de iniciar o desenvolvimento das equações serão apresentadas algumas revisões que serão utilizadas adiante.

1.1 Regra de Leibnitz

Seja $f(\mathbf{a}) = \int_{u_1(\mathbf{a})}^{u_2(\mathbf{a})} f(x, \mathbf{a}) dx$ pode ser função de \mathbf{a}

$$\frac{\partial f(\mathbf{a})}{\partial \mathbf{a}} = \int_{u_1}^{u_2} \frac{\partial f(x, \mathbf{a})}{\partial \mathbf{a}} dx + f(u_2, \mathbf{a}) d \frac{du_2}{\partial \mathbf{a}} - f(u_1, \mathbf{a}) d \frac{du_1}{\partial \mathbf{a}}$$

Reorganizando a equação

$$\int_{u_1}^{u_2} \frac{\partial f}{\partial \mathbf{a}} dx = \frac{\partial f(\mathbf{a})}{\partial \mathbf{a}} - f(u_2, \mathbf{a}) \frac{du_2}{\partial \mathbf{a}} + f(u_1, \mathbf{a}) \frac{du_1}{\partial \mathbf{a}}$$

1.2 Definição de Propriedades Médias Integradas na Vertical

1.2.1 Velocidade:

$$\bar{u} = \frac{1}{h_t} \int_0^{h_t} u dz \quad \text{dentro do corpo da corrente}$$

1.2.2 Velocidade Quadrática (empregada na equação da energia)

$$\mathbf{b}_u \cdot \bar{u}^2 = \frac{1}{h_t} \int_0^{h_t} u^2 dz$$

Onde \mathbf{b}_u = Coeficiente de Boussinesq

1.2.3 Concentração

$$C_s \bar{u} = \frac{1}{h_t} \int_0^{h_t} cu dz \quad \text{concentração média}$$

1.3 Difusão Molecular Livre (Primeira Lei de Fick)

Considerando-se não existir movimento do meio deduz-se a Primeira Lei de Fick (Claude, 1990)

$$\vec{q}_m = -\mathbf{e}_m \cdot \left(\frac{\partial C}{\partial x} \vec{i} + \frac{\partial C}{\partial y} \vec{j} + \frac{\partial C}{\partial z} \vec{k} \right)$$

$$\vec{q}_m = -\mathbf{e}_m \cdot \vec{\nabla} C$$

onde: \vec{q}_m = difusão molecular

C = concentração

$\vec{\nabla} C$ = gradiente de concentração

\mathbf{e}_m = coeficiente de difusão molecular (é constante em todas as direções e para água com sal $\mathbf{e}_m = 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$)

1.4 Difusão Molecular com Convecção (Segunda Lei de Fick)

Considerando que exista um escoamento de um fluido, porém este não promova a mistura, pode-se deduzir a segunda Lei de Fick aplicando o Teorema de Transporte de Reynolds:

$$\frac{DN}{Dt} = \frac{\partial}{\partial t} \iiint_{\forall c} \mathbf{h} \cdot \mathbf{r} \, d\forall + \int_{sc} \mathbf{h} \cdot \mathbf{r} \cdot (\vec{V} \cdot \vec{n}) \, dA$$

onde: N= propriedade externa

\mathbf{h} = propriedade extensiva

c = propriedade intensiva

Considerando o fluido incompressível

$$\nabla \vec{V} = 0 \quad \text{ou} \quad \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0$$

Hipótese 1) Generalizando a primeira Lei de Fick para o caso de difusão molecular num fluido em movimento sem a presença de mistura macroscópica gerada pela turbulência temos:

$$\frac{\partial C_f}{\partial t} + \text{div} \cdot (C_f \cdot \vec{V}) = -\text{div} \cdot \vec{q}_f + q_e$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \vec{V} \cdot (\text{grad} C) = \text{div} \cdot (\mathbf{e}_m \cdot \text{grad} C) \quad \text{ou} \quad \frac{DC}{Dt} = \text{div} \cdot (\mathbf{e}_m \cdot \text{grad} C)$$

Esta solução é válida para a difusão molecular em escoamentos laminares.

1.5 Difusão Turbulenta

Quando o escoamento é turbulento, qualquer propriedade pode ser decomposta numa média mais uma variação.

$$C(\vec{x}, t) = \bar{C}(\vec{x}) + C'(\vec{x}, t)$$

$$\frac{\partial (\bar{C} + C')}{\partial t} + (\vec{V} + \vec{V}') \cdot (\text{grad} (\bar{C} + C')) = \text{div} \cdot (\mathbf{e}_m \cdot \text{grad} (\bar{C} + C'))$$

Lei das médias

$$a = \bar{a} + a' \quad \Rightarrow \bar{a} = \overline{a} = \overline{a + a'} = \overline{a} + \overline{a'} = \overline{a} + 0 \quad \Rightarrow \bar{a} = \overline{a}$$

$$b = \bar{b} + b' \quad \Rightarrow \bar{b} = \overline{b} = \overline{b + b'} = \overline{b} + \overline{b'} = \overline{b} + 0 \quad \Rightarrow \bar{b} = \overline{b}$$

$$ab = ambm + ambm + (b'am)m + (a'bm)m$$

$$(ab)m = ambm + (a'b')m$$

aplicando as leis da média na equação

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \text{div}(C\vec{V} + \overline{C'\vec{V}'}) = \text{div} \cdot (\mathbf{e}_m \cdot \text{grad}(C))$$

onde: $\overline{C'\vec{V}'}$ representa a difusão proporcionada pela turbulenta

1.6 Analogia de Bousinesq

Pode-se descrever por analogia a um escoamento laminar, a difusão turbulenta pela analogia de Bousinesq, ou seja:

$$-\overline{C'\vec{V}'} = \mathbf{e}_t \cdot \text{grad} C$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \vec{V} \cdot \text{grad}(C) = \text{div} \cdot ((\mathbf{e}_m + \mathbf{e}_t) \cdot \text{grad}(C))$$

Porém \mathbf{e}_t não é constante como no caso molecular (\mathbf{e}_m). Para o coeficiente \mathbf{e}_t pode-se considerar duas hipóteses:

a) \mathbf{e}_t é escalar (constante em x, y, z)

b) tensor diagonal

$$\mathbf{e}_t = \begin{bmatrix} \mathbf{e}_{xx} & 0 & 0 \\ 0 & \mathbf{e}_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & \mathbf{e}_{zz} \end{bmatrix}$$

O resultado fica:

$$\begin{aligned} \frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} + v \frac{\partial C}{\partial y} + w \frac{\partial C}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left[(\mathbf{e}_m + \mathbf{e}_{tx}) \frac{\partial C}{\partial x} + (\mathbf{e}_m + \mathbf{e}_{ty}) \frac{\partial C}{\partial y} + (\mathbf{e}_m + \mathbf{e}_{tz}) \frac{\partial C}{\partial z} \right] + \\ + \frac{\partial}{\partial y} \left[(\mathbf{e}_m + \mathbf{e}_{tx}) \frac{\partial C}{\partial x} + (\mathbf{e}_m + \mathbf{e}_{ty}) \frac{\partial C}{\partial y} + (\mathbf{e}_m + \mathbf{e}_{tz}) \frac{\partial C}{\partial z} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[(\mathbf{e}_m + \mathbf{e}_{tx}) \frac{\partial C}{\partial x} + (\mathbf{e}_m + \mathbf{e}_{ty}) \frac{\partial C}{\partial y} + (\mathbf{e}_m + \mathbf{e}_{tz}) \frac{\partial C}{\partial z} \right] \end{aligned}$$

Aplicando a regra da cadeia para uma hipótese incompressível:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} + v \frac{\partial C}{\partial y} + w \frac{\partial C}{\partial z} = \mathbf{e}_m \left[\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} \right] + \frac{\partial}{\partial x} \left[\mathbf{e}_{tx} \frac{\partial C}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\mathbf{e}_{ty} \frac{\partial C}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\mathbf{e}_{tz} \frac{\partial C}{\partial z} \right]$$

Supondo a turbulência homogênea e isotrópica a hipótese 1) poderá ser utilizada, resultando em:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} + v \frac{\partial C}{\partial y} + w \frac{\partial C}{\partial z} = (\mathbf{e}_m + \mathbf{e}) \left[\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} \right] \quad \text{ou} \quad \frac{DC}{Dt} = (\mathbf{e}_m + \mathbf{e}_t)(\nabla^2 C)$$

2. EQUAÇÕES HIDRODINÂMICAS

O escoamento da corrente de densidade pode ser melhor compreendido através da análise das equações hidrodinâmicas unidimensionais que a fundamentam. A normalização dessas equações permitem estabelecer grupos de números adimensionais que regem o escoamento. Neste anexo as equações serão desenvolvidas para o caso de uma corrente de turbidez com as seguintes características: escoamento bidimensional (integrado na vertical, resultando assim em soluções unidimensionais), turbulento e incompressível. A figura A.1.1 representa esquematicamente o escoamento da corrente de turbidez.

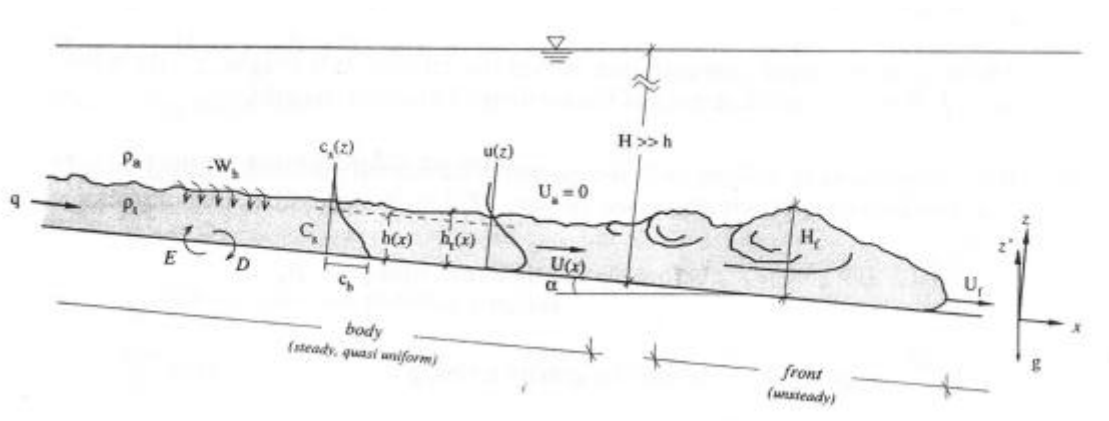


Figura A.1.1 – representação esquemática da corrente de turbidez.

Fonte (Chien e Wan, 1998)

A corrente escoar na direção longitudinal x , sobre um fundo inclinado I , e que faz um ângulo α com a horizontal. Outra suposição é que a coluna de água sobre a corrente é profunda ($H \gg h$), evitando dessa forma a criação de contradeclividade, e que a massa específica da corrente é maior que da água, $\rho_t > \rho_a$.

A partir dessas suposições as equações da continuidade e de movimento para a fase líquida e sólida podem ser estabelecidas. Como a corrente é relativamente fina, $h \ll H$, é assumido como um escoamento de camada limite, onde as condições $u \gg w$ e $\partial/\partial z \gg \partial/\partial x$ são válidas.

2.1 Equação da Continuidade

A equação da continuidade para a fase líquida é:

$$\frac{D\mathbf{r}}{Dt} + \mathbf{r} \cdot (\nabla \cdot \mathbf{V}) = 0$$

A primeira hipótese adotada é que o escoamento é incompressível, ou seja, \mathbf{r} é constante:

$$\frac{D\mathbf{r}}{Dt} = 0$$

Então a equação fica:

$$\nabla \cdot \mathbf{V} = 0 \Rightarrow \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0$$

A segunda hipótese adotada é que o escoamento é bidimensional, portanto temos:

$$\bar{v} = 0 \Rightarrow \frac{\partial}{\partial y} = 0$$

A equação da continuidade se resume a:

$$\nabla \cdot \mathbf{V} = 0 \Rightarrow \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0$$

Integrando os termos ao longo da altura da corrente ($0 < z < h_t$):

$$\int_0^{h_t} \frac{\partial u}{\partial x} dz + \int_0^{h_t} \frac{\partial w}{\partial z} dz = 0$$

Aplicando a Regra de Leibnitz

$$\frac{\partial}{\partial x} \int_0^{h_t} u dz + u(0, z) \frac{\partial(0)}{\partial x} - u(h_t, z) \frac{\partial h_t}{\partial z} + w(h_t) - w(0) = 0$$

As velocidades u_{ht} e w_{ht} são as velocidades das componentes na interface. Por definição u_{ht} e $w(0)$ são iguais a zero.

$$\frac{\partial}{\partial x} \int_0^{h_t} u dz + \underbrace{u(0, z) \frac{\partial(0)}{\partial x}}_0 - \underbrace{u(h_t, z) \frac{\partial h_t}{\partial z}}_0 + \underbrace{w(h_t) - w(0)}_0 = 0$$

A velocidade w_{ht} é definida como velocidade de carreamento do fluido ambiente na corrente.

$$\frac{\partial(\bar{u} \cdot h)}{\partial x} + w(h_t) = 0$$

A velocidade de carregamento é assumida como sendo proporcional a velocidade média da corrente U (Turner 1973 *apud* Chien e Wan 1998)

$$w(h_t) = -E_w \cdot U$$

sendo que a constante de proporcionalidade E_w , é o coeficiente de carregamento, que é dependente do número de Richardson do escoamento.

Chegamos então a primeira equação que rege o escoamento:

$$\frac{\partial(\bar{u}h)}{\partial x} - E_w \cdot U = 0 \quad (1)$$

2.2. Equação da Continuidade para a Fase Sólida

A equação da continuidade para a fase sólida é dada pela equação de difusão de material granular. Da equação da difusão turbulenta desenvolvida em 1.5 e aplicada a hipótese de Bousinesq, tem-se:

Para um escoamento incompressível

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial Cu}{\partial x} + \frac{\partial Cv}{\partial y} + \frac{\partial Cw}{\partial z} = \frac{\partial(\mathbf{e}_m + \mathbf{e}_t)}{\partial x} \frac{\partial C}{\partial x} + \frac{\partial(\mathbf{e}_m + \mathbf{e}_t)}{\partial y} \frac{\partial C}{\partial y} + \frac{\partial(\mathbf{e}_m + \mathbf{e}_t)}{\partial z} \frac{\partial C}{\partial z}$$

Aplicando a regra da cadeia

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial Cu}{\partial x} + \frac{\partial Cv}{\partial y} + \frac{\partial Cw}{\partial z} = \mathbf{e}_m \left(\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mathbf{e}_t \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mathbf{e}_t \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mathbf{e}_t \frac{\partial C}{\partial z} \right)$$

Simplificações

Primeira Hipótese

A influência de $\text{div}(\mathbf{e}_m) \cdot \nabla C$ é muito menor que $\text{div}(\mathbf{e}_t) \cdot \nabla C$, ou seja $\mathbf{e}_m \ll \mathbf{e}_t$

$$\mathbf{e}_m \left(\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} \right) = 0$$

\mathbf{e}_m = difusão molecular

\mathbf{e}_t = difusão turbulenta

Segunda Hipótese

Que o regime da corrente é quase permanente, ou seja é uma sucessão de regimes permanentes

$$\frac{\partial C}{\partial t} \approx 0$$

Terceira Hipótese

O escoamento é bi-dimensional então temos:

$$\bar{v} = 0 \Rightarrow \frac{\partial}{\partial y} = 0$$

$$\frac{\partial C v}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial y} (\mathbf{e}_m + \mathbf{e}_t) \frac{\partial C}{\partial y} = 0$$

A equação fica:

$$\frac{\partial C u}{\partial x} + \frac{\partial C w}{\partial z} = \frac{\partial(\mathbf{e}_t)}{\partial x} \frac{\partial C}{\partial x} + \frac{\partial(\mathbf{e}_t)}{\partial z} \frac{\partial C}{\partial z}$$

$$\frac{\partial C u}{\partial x} + \frac{\partial C w}{\partial z} = C \frac{\partial u}{\partial x} + C \frac{\partial w}{\partial z} + u \frac{\partial C}{\partial x} + w \frac{\partial C}{\partial z}$$

Aplicando a regra da cadeia:

$$\frac{\partial C u}{\partial x} + \frac{\partial C w}{\partial z} = C \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) + u \frac{\partial C}{\partial x} + w \frac{\partial C}{\partial z}$$

Da equação da continuidade temos

$$C \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) = 0$$

Ficamos então com

$$\frac{\partial C u}{\partial x} + \frac{\partial C w}{\partial z} = u \frac{\partial C}{\partial x} + w \frac{\partial C}{\partial z}$$

$$u \frac{\partial C}{\partial x} = -w \frac{\partial C}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mathbf{e}_t \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mathbf{e}_t \frac{\partial C}{\partial z} \right)$$

Quinta Hipótese

A variação da concentração (difusão turbulenta) na vertical é muito maior do que na horizontal logo:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\mathbf{e}_t \frac{\partial C}{\partial x} \right) = 0$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\mathbf{e}_t \frac{\partial C}{\partial x} \right) \ll \frac{\partial}{\partial z} \left(\mathbf{e}_t \frac{\partial C}{\partial z} \right)$$

Sexta Hipótese

O termo abaixo é a velocidade de sedimentação das partículas

$$v_{ss} = -w$$

A equação fica então

$$u \frac{\partial C}{\partial x} = -v_{ss} \frac{\partial C}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mathbf{e}_t \frac{\partial C}{\partial z} \right)$$

Pela Lei de Euler

$$\left(\mathbf{e}_t \frac{\partial C}{\partial z} \right) = -\overline{c' w'}$$

Integrando a equação acima pela Regra de Leibnitz

$$\int_b^{h_t} u \frac{\partial C}{\partial x} dz = - \int_b^{h_t} v_{ss} \frac{\partial C}{\partial z} dz + \int_b^{h_t} \frac{\partial(-\overline{c' w'})}{\partial z} dz$$

$$\frac{\partial(C\bar{U}h_t)}{\partial x} = -v_{ss} \cdot C|_b^{ht} - \overline{(c'w')}|_b^{ht}$$

$$\frac{\partial(C\bar{U}h_t)}{\partial x} = -v_{ss} \cdot C_b - \overline{(c'w')}|_b$$

Onde

$$\overline{(c'w')} = v_{ss} E$$

A equação da fase sólida fica, onde C foi trocado por D

$$\frac{\partial(C\bar{U}h_t)}{\partial x} = v_{ss} \cdot [E(b) - D(b)] \quad (2)$$

2.3. Equação da Conservação da Quantidade de Movimento

A partir da equação de Navier-Stokes escrita da forma tensorial:

$$\frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + (\vec{V} \cdot \nabla) \cdot \vec{V} = -\frac{1}{\mathbf{r}} \nabla p - \frac{1}{\mathbf{r}} \nabla(\Pi) + \vec{x}$$

onde em coordenadas cartesianas pode ser escritas como:

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} &= -\frac{1}{\mathbf{r}} \cdot \frac{\partial p}{\partial x} - X - \frac{1}{\mathbf{r}} \left(\frac{\partial t_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial t_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial t_{xz}}{\partial z} \right) \\ \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} &= -\frac{1}{\mathbf{r}} \cdot \frac{\partial p}{\partial y} - Y - \frac{1}{\mathbf{r}} \left(\frac{\partial t_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial t_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial t_{yz}}{\partial z} \right) \\ \frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} &= -\frac{1}{\mathbf{r}} \cdot \frac{\partial p}{\partial z} - Z - \frac{1}{\mathbf{r}} \left(\frac{\partial t_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial t_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial t_{zz}}{\partial z} \right) \end{aligned}$$

ou em notação de Einstein

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\mathbf{r}} \cdot \frac{\partial p}{\partial x_j} + X_i + \frac{1}{\mathbf{r}} \left(\frac{\partial s_{ij}}{\partial x_j} \right)$$

Os termos dados pela equação representam:

$$-\frac{1}{\mathbf{r}} \cdot \frac{\partial p}{\partial x_i} \quad \text{Energia Potencial de Pressão}$$

X_i Energia Potencial de Posição

$\frac{1}{\mathbf{r}} \left(\frac{\partial \mathbf{s}_{ij}}{\partial x_j} \right)$ Dissipação Viscosa

Da primeira hipótese de escoamento bidimensional resulta em:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{1}{\mathbf{r}} \cdot \frac{\partial p}{\partial x} - X - \frac{1}{\mathbf{r}} \left(\frac{\partial \mathbf{t}_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \mathbf{t}_{xz}}{\partial z} \right) \quad (1)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + w \frac{\partial w}{\partial z} = -\frac{1}{\mathbf{r}} \cdot \frac{\partial p}{\partial z} - Z - \frac{1}{\mathbf{r}} \left(\frac{\partial \mathbf{t}_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \mathbf{t}_{zz}}{\partial z} \right) \quad (2)$$

Para um escoamento incompressível (Segunda Hipótese)

Para a equação (1)

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{1}{\mathbf{r}} \cdot \frac{\partial p}{\partial x} + g \cdot I + \frac{1}{\mathbf{r}} \left(\frac{\partial \mathbf{t}_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \mathbf{t}_{xz}}{\partial z} \right)$$

$$u \frac{\partial w}{\partial x} + w \frac{\partial w}{\partial z} = -\frac{1}{\mathbf{r}} \cdot \frac{\partial p}{\partial z} + g \cdot \cos(\mathbf{a}) + \frac{1}{\mathbf{r}} \left(\frac{\partial \mathbf{t}_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \mathbf{t}_{zz}}{\partial z} \right)$$

Se \mathbf{a} é pequeno e os raios de curvatura do fundo são grandes:

$$g \cdot \cos(\mathbf{a}) \gg u \frac{\partial w}{\partial x} \quad e \quad w \frac{\partial w}{\partial z}$$

$$g \cdot \cos(\mathbf{a}) \gg -\frac{1}{\mathbf{r}} \left(\frac{\partial \mathbf{t}_{xx}}{\partial x} \right) \quad e \quad -\frac{1}{\mathbf{r}} \left(\frac{\partial \mathbf{t}_{zz}}{\partial z} \right)$$

Admitindo uma distribuição hidrostática de pressões, temos:

$$\frac{\partial p}{\partial z} = -\mathbf{r} \cdot g \cdot \cos(\mathbf{a})$$

$$p(x, y) = \int_z^H -\mathbf{r} \cdot g \cdot \cos(\mathbf{a}) \cdot dz$$

$$\frac{\partial p}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \int_z^H -\mathbf{r} \cdot g \cdot \cos(\mathbf{a}) \cdot dz \quad (3)$$

Substituindo a equação 3 na equação 1

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{1}{\mathbf{r}} \cdot \frac{\partial}{\partial x} \int_z^H -\mathbf{r} \cdot g \cdot \cos(\mathbf{a}) \cdot dz + g \cdot I + \frac{1}{\mathbf{r}} \left(\frac{\partial \mathbf{t}_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \mathbf{t}_{xz}}{\partial z} \right) \quad (4)$$

onde: $\mathbf{t}_{xx} = -\mathbf{r} \cdot \overline{u u}$

$$\mathbf{t}_{xz} = -\mathbf{r} \cdot \overline{w u}$$

$$\overline{u u} = \mathbf{a} \cdot 0.30 \cdot \overline{u w} \quad (\text{a proporção entre os termos foi determinada empiricamente})$$

A variação da massa específica na horizontal é muito menor que a variação na vertical logo:

$$\frac{\partial \overline{\mathbf{r} u u}}{\partial x} \ll \frac{\partial \overline{\mathbf{r} u w}}{\partial z}$$

A equação 7 fica

$$\underbrace{u \frac{\partial u}{\partial x} + w \frac{\partial u}{\partial z}}_4 = \underbrace{+\frac{1}{\mathbf{r}} \cdot \frac{\partial}{\partial x} \int_z^H \mathbf{r} \cdot g \cdot \cos(\mathbf{a}) \cdot dz}_1 + \underbrace{g \cdot I}_2 + \underbrace{\frac{1}{\mathbf{r}} \left(\frac{\partial \mathbf{t}_{xz}}{\partial z} \right)}_3$$

Seus termos representam:

1-Aceleração devido há variação de densidade

2-Aceleração da gravidade (influência da declividade do fundo)

3-As tensões de Reynolds (mecanismos de transferência de Quantidade de Movimento)+
(tensões Viscosas= retardamento do movimento)

4-Aceleração convectiva

Trabalhando com 1

$$\frac{1}{\mathbf{r}} \frac{\partial}{\partial x} \int_z^H \mathbf{r} \cdot g \cdot \cos(\mathbf{a}) \cdot dz = \frac{1}{\mathbf{r}} \frac{\partial}{\partial x} (P_{total} - \mathbf{r} \cdot g \cdot z)$$

$$P_{total} = P_{ambiente} + P_{sedimento}$$

$$\mathbf{r}_t = \mathbf{r}_a + \Delta \mathbf{r}$$

$$\frac{1}{\mathbf{r}} \frac{\partial}{\partial x} \int_z^H \mathbf{r} \cdot \mathbf{g} \cdot \cos(\mathbf{a}) \cdot dz = \frac{1}{\mathbf{r}} \frac{\partial}{\partial x} (Pa - \mathbf{r}_a \cdot \mathbf{g} \cdot z') + \frac{1}{\mathbf{r}} \frac{\partial}{\partial x} (Ps - \Delta \mathbf{r} \cdot \mathbf{g} \cdot z')$$

Pa = Pressão devido a água no fundo

$$\frac{\partial Pa}{\partial x} = 0$$

Da equação acima:

$$\frac{1}{\mathbf{r}} \frac{\partial}{\partial x} (Pa - \mathbf{r}_a \cdot \mathbf{g} \cdot z') = \left(0 - \frac{\mathbf{r}_a}{\mathbf{r}} \cdot \mathbf{g} \cdot \frac{\partial z'}{\partial x} \right)$$

$$\frac{\partial z'}{\partial x} = I$$

Então fica

$$\frac{1}{\mathbf{r}} \frac{\partial}{\partial x} (Pa - \mathbf{r}_a \cdot \mathbf{g} \cdot z') = \left(- \frac{\mathbf{r}_a}{\mathbf{r}} \cdot \mathbf{g} \cdot I \right)$$

O outro termo da equação fica

$$\frac{1}{\mathbf{r}} \frac{\partial}{\partial x} (Ps - \Delta \mathbf{r} \cdot \mathbf{g} \cdot z') = \frac{1}{\mathbf{r}} \frac{\partial}{\partial x} \left(Ps - \Delta \mathbf{r} \cdot \mathbf{g} \cdot z' \cdot \frac{\mathbf{r}_a}{\mathbf{r}_a} \right)$$

$$\frac{1}{\mathbf{r}} \frac{\partial}{\partial x} (Ps - \Delta \mathbf{r} \cdot \mathbf{g} \cdot z') = \frac{1}{\mathbf{r}} \frac{\partial}{\partial x} \left(Ps - \frac{\mathbf{r}_t - \mathbf{r}_a}{\mathbf{r}_a} \cdot \mathbf{g} \cdot z' \cdot \mathbf{r}_a \right)$$

como

$$\frac{\mathbf{r}_t - \mathbf{r}_a}{\mathbf{r}_a} \cdot \mathbf{g} = \mathbf{g}'$$

Fica

$$\frac{1}{\mathbf{r}} \frac{\partial}{\partial x} (Ps - \Delta \mathbf{r} \cdot \mathbf{g} \cdot z') = \frac{1}{\mathbf{r}} \frac{\partial}{\partial x} (Ps - \mathbf{g}' \cdot z' \cdot \mathbf{r}_a) \quad (5)$$

A equação 5 pode ser reescrita

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{\mathbf{r}_a}{\mathbf{r}} \cdot \mathbf{g} \cdot I + g \cdot I + \frac{1}{\mathbf{r}} \frac{\partial}{\partial x} \left(P_s \cdot \mathbf{g}' \cdot \mathbf{z}' \cdot \mathbf{r}_a \right) + \frac{1}{\mathbf{r}} \left(\frac{\partial \mathbf{t}_{xz}}{\partial z} \right) \quad (6)$$

se

$$\mathbf{r}_a \cong \mathbf{r} \text{ então } \frac{\mathbf{r}_a}{\mathbf{r}} \cdot \mathbf{g} \cdot I = g \cdot I$$

Chamaremos na equação 7

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + w \frac{\partial u}{\partial z} = \frac{1}{\mathbf{r}} \frac{\partial}{\partial x} (P_s - \mathbf{g}' \cdot \mathbf{z}' \cdot \mathbf{r}_a) + \frac{1}{\mathbf{r}} \left(\frac{\partial \mathbf{t}_{xz}}{\partial z} \right) \quad (7)$$

onde P_s é igual a

$$P_s = \int_z^H \Delta \mathbf{r} \cdot \mathbf{g} \cdot dz = \int_z^H (\mathbf{r}_a \cdot \mathbf{g}') dz \cong \int_z^H (\mathbf{r}_i \cdot \mathbf{g}') dz$$

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + w \frac{\partial u}{\partial z} = + \frac{1}{\mathbf{r}} \frac{\partial}{\partial x} \int_z^H (\mathbf{r}_i \cdot \mathbf{g}') dz - \mathbf{g}' \cdot \frac{dH}{dx} \cdot \frac{\mathbf{r}_a}{\mathbf{r}} + \frac{1}{\mathbf{r}} \left(\frac{\partial \mathbf{t}_{xz}}{\partial z} \right)$$

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + w \frac{\partial u}{\partial z} = + \frac{1}{\mathbf{r}} \int_z^H \frac{\partial}{\partial x} (\mathbf{r}_i \cdot \mathbf{g}') dz - \frac{\partial H}{\partial x} \cdot \frac{\mathbf{r} \mathbf{g}'}{\mathbf{r}} + \frac{\partial z'}{\partial x} \cdot \frac{\mathbf{r} \mathbf{g}'}{\mathbf{r}} - \mathbf{g}' \cdot \frac{\partial z'}{\partial x} \cdot \frac{\mathbf{r}_a}{\mathbf{r}} + \frac{1}{\mathbf{r}} \left(\frac{\partial \mathbf{t}_{xz}}{\partial z} \right)$$

Como

$$\mathbf{g}' = \mathbf{g} \cdot \Delta \rho / \rho = \mathbf{g} \cdot (\rho_t - \rho_a / \rho_a) \text{ e } \rho_t = \rho$$

$$\rho_t = C_s \cdot \rho_s + (1 - C_s) \cdot \rho_a = \rho_a + (\rho_s - \rho_a) C_s$$

logo

$$\mathbf{g}' = \mathbf{g} \cdot (\rho_s - \rho_a / \rho_a) \cdot C_s = \mathbf{g} R C_s$$

R = massa específica submersa

Então:

$$\mathbf{g}' = \mathbf{g} R C_s$$

Sendo I' a contra declividade

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + w \frac{\partial u}{\partial z} = + \frac{1}{\mathbf{r}} \int_z^H \frac{\partial}{\partial x} (\mathbf{r}_i \cdot \mathbf{g} \cdot R \cdot C_s) dz - \mathbf{g}' \cdot I' + g \cdot I - \mathbf{g}' \cdot I + \frac{1}{\mathbf{r}} \left(\frac{\partial \mathbf{t}_{xz}}{\partial z} \right)$$

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + w \frac{\partial u}{\partial z} = + \frac{\mathbf{r}_t \cdot \mathbf{g} \cdot R}{\mathbf{r}} \cdot \int_z^H \frac{\partial(C_s)}{\partial x} dz - g \cdot I + g \cdot I - g \cdot I + \frac{1}{\mathbf{r}} \left(\frac{\partial \mathbf{t}_{xz}}{\partial z} \right)$$

Supondo a variação de C_s seja preponderante em relação a Z . Integrando.

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + w \frac{\partial u}{\partial z} = g \cdot R \cdot (H - Z) \cdot C_s \cdot \cos \mathbf{a} - g \cdot I + g \cdot I - g \cdot I + \frac{1}{\mathbf{r}} \left(\frac{\partial \mathbf{t}_{xz}}{\partial z} \right)$$

Integrando todos os membros entre 0 e h_t

$$\int_0^{h_t} u \frac{\partial u}{\partial x} + \int_0^{h_t} w \frac{\partial u}{\partial z} = \int_0^{h_t} g \cdot R \cdot (H - Z) \cdot C_s \cdot \cos \mathbf{a} - \int_0^{h_t} g \cdot I + \int_0^{h_t} g \cdot I - \int_0^{h_t} g \cdot I + \int_0^{h_t} \frac{1}{\mathbf{r}} \left(\frac{\partial \mathbf{t}_{xz}}{\partial z} \right)$$

1 2 3 4 5 6 7

Desdobrando termo por termo

Aplicando Leibnitz no 1º termo:

$$\int_0^{h_t} u \frac{\partial u}{\partial x} dz = \frac{\partial}{\partial z} \int_0^{h_t} u^2 dz + u^2 \frac{\partial h_t}{\partial x} + Uo = \frac{\partial(\mathbf{b} \cdot U^2 h_t)}{\partial x}$$

2º termo:

$$\int_0^{h_t} w \frac{\partial u}{\partial z} = 0$$

3º termo:

$$\int_0^{h_t} g \cdot R \cdot (H - Z) \cdot C_s \cdot \cos \mathbf{a} \cdot dz = g \cdot R \cdot \cos \mathbf{a} \int_0^{h_t} (H - Z) \cdot C_s \cdot dz$$

5º termo:

$$\int_0^{h_t} g \cdot I = g \cdot I \cdot h_t$$

4º e 6º termos:

$$\int_0^{ht} (g \cdot I + g \cdot I) dz = -(I + I) \cdot \int_0^{ht} g \cdot R \cdot C_s \cdot dz = -(I + I) \cdot g \cdot R \cdot \int_0^{ht} C_s \cdot dz$$

7º termo:

$$\int_0^{ht} \frac{1}{\mathbf{r}} \left(\frac{\partial \mathbf{t}_{xz}}{\partial z} \right) = \frac{1}{\mathbf{r}} \left(\frac{\partial \mathbf{t}_{xz}}{\partial z} \right) \Big|_{ht} - \frac{1}{\mathbf{r}} \left(\frac{\partial \mathbf{t}_{xz}}{\partial z} \right) \Big|_0 = \frac{\mathbf{t}_{interface}}{\mathbf{r}} - u_*^2$$

definição da velocidade de cisalhamento : $u_* = \sqrt{\frac{th}{\mathbf{r}}}$

logo fica

$$\frac{\partial(\mathbf{b} \cdot U^2 h_t)}{\partial x} = g \cdot R \cdot \cos \mathbf{a} \int_0^{ht} (H - Z) \cdot C_s \cdot dz - g \cdot I \cdot h_t + g \cdot I \cdot h_t - I \cdot g \cdot R \cdot \int_0^{ht} C_s \cdot dz - I \cdot g \cdot R \cdot \int_0^{ht} C_s \cdot dz + \frac{\mathbf{t}_{interface}}{\mathbf{r}} - u_*^2$$

o terceiro termo da equação acima pode ser escrito na forma de integral, como o quinto termo.

$$\frac{\partial(\mathbf{b} \cdot U^2 h_t)}{\partial x} = g \cdot R \cdot \cos \mathbf{a} \int_0^{ht} (H - Z) \cdot C_s \cdot dz - I \cdot g \cdot R \cdot \int_0^{ht} C_s \cdot dz - I \cdot g \cdot R \cdot \int_0^{ht} C_s \cdot dz + g \cdot I \cdot h_t + \frac{\mathbf{t}_{interface}}{\mathbf{r}} - u_*^2$$

Desenvolvendo

$$\frac{\partial(\mathbf{b} \cdot U^2 h_t)}{\partial x} = -\frac{1}{2} \cdot \cos \mathbf{a} \int \frac{\partial(S_1 \cdot g \cdot h_t^2)}{\partial x} + S_2 \cdot g \cdot h \cdot \sin \mathbf{a} - I \cdot g \cdot R \cdot \int_0^{ht} C_s \cdot dz + g \cdot I \cdot h_t - \mathbf{r} \cdot u_*$$

onde S_1 e S_2 são

$$S_1 = \frac{2}{g \cdot h^2} \int_0^{ht} g \cdot R \cdot (H - Z) \cdot C_s \cdot dz$$

$$S_2 = \frac{1}{g \cdot h^2} \int_0^{ht} g \cdot R \cdot C_s \cdot dz$$

Onde segundo Parkes *et al.* (1987) *apud* Chien e Wan (1998) S_1 e $S_2 \cong 1$

Concluindo fica

$$\frac{\partial(\mathbf{b} \cdot U^2 h_t)}{\partial x} = -\frac{1}{2} \cdot g \cdot R \cdot \cos \mathbf{a} \frac{\partial(C_s \cdot h_t^2)}{\partial x} + g \cdot R \cdot C_s \cdot h \cdot I - \Gamma \cdot g \cdot R \cdot \int_0^h C_s \cdot dz + g \cdot I \cdot ht - u_*^2$$

o 4º termo pode ser considerado como $(g \cdot R \cdot C_s \cdot h_t) \cdot I$

Em palavras a variação da quantidade de movimento é:

A variação da QDM = Variação da concentração na direção x + a declividade da superfície da corrente de turbidez- a contra declividade+ peso- a tensão de cisalhamento junto a parede

2.4 Equações Integradas na Vertical

Substituindo as integrais por seus valores médios corrigidos por coeficientes empíricos temos as equações:

$$\frac{d(U \cdot h)}{dx} = E_w \cdot U \quad (8)$$

$$\frac{d(C_s \cdot U \cdot h)}{dx} = v_{ss} \cdot (E_s - C_b) \quad (9)$$

$$\frac{d(U^2 \cdot h)}{dx} = -\frac{1}{2} \cdot g \cdot R \cdot \cos \mathbf{a} \cdot \frac{d(C_s \cdot h^2)}{dx} + (g \cdot C_s \cdot R \cdot h) \cdot \text{sen} \mathbf{a} - C_f U^2 \quad (10)$$

ou

$$\frac{d(U^2 \cdot h)}{dx} = -\frac{1}{2} \cdot \cos \mathbf{a} \cdot \frac{d(S_1 \cdot g \cdot h^2)}{dx} + S_2 \cdot g \cdot h \cdot \text{sen} \mathbf{a} - C_f U^2$$

onde :

$$S_1 = \frac{2}{g \cdot h^2} \int_0^{h_t} (g \cdot R \cdot c_s) \cdot (H - z) dz$$

$$S_2 = \frac{1}{g \cdot h} \int_0^{h_t} (g \cdot R \cdot c_s) dz$$

Obs: se a distribuição de c_s é homogênea (i.e. altamente turbulento) S_1 e $S_2 \cong 1$ (Parker *et al.*, 1987)

De (9)

$$C_s \frac{d(U \cdot h)}{dx} + U \cdot h \frac{d(C_s)}{dx} = v_{ss} (E_s - C_b) \quad (8) \text{ em } (9)$$

$$C_s \cdot E_w \cdot U + U \cdot h \frac{dC_s}{dx} = v_{ss} (E_s - C_b)$$

$$\frac{dh}{dx} = \frac{1}{1-R_i} \left[\frac{1}{2} (4-R_i) E_w + \frac{1}{2} R_i \frac{v_{ss}}{U \cdot C_s} (E_s - C_b) - R_i \cdot \tan \alpha - C_f \right]$$

$$\frac{h}{3R_i} \frac{dR_i}{dx} = \frac{1}{1-R_i} \left\{ \left[E_w + \frac{1}{3} \frac{v_{ss}}{U \cdot C_s} (E_s - C_b) \right] \frac{1}{2} (2 + R_i - R_i \tan \alpha + C_f) \right\}$$

onde:
$$R_i = \frac{g \cdot h \cdot \cos \alpha}{U^2} = \frac{g \cdot R \cdot C_s \cdot h \cdot \cos \alpha}{U^2}$$

$$\frac{dh}{dx} = f_1 \left(R_i; E_w; \frac{v_{ss}}{U \cdot C_s} (E_s - C_b); C_f \right)$$

$$\frac{h}{3R_i} \frac{dR_i}{dx} = f_2 = f_1$$

Hipóteses adotadas:

- i) escoamento incompressível
- ii) escoamento bidimensional
- iii) $w_{ht} = -E_w \mathcal{U}$ - velocidade de entrada na camada de mistura
- iv) $(c \cdot w) @ E \mathcal{V}_{ss}$
- v) v_{ss} é definido como valor único
- vi) $u_b^* = C_f U^2$

ANEXO 2 - DESENVOLVIMENTO DE SONDAS DE CONDUTIVIDADE

ANEXO 2 - DESENVOLVIMENTO DE SONDAS DE CONDUTIVIDADE

1. INTRODUÇÃO

O estudo de correntes de densidade motivou o desenvolvimento de ferramentas para a análise do escoamento. Os parâmetros importantes na dinâmica desse movimento foram destacadas como sendo a velocidade de avanço da corrente, a densidade inicial, a declividade do canal e o volume inicial de material. Esses parâmetros puderam ser identificados através de medições diretas na preparação do ensaio e através da filmagem do escoamento para o caso da velocidade. Porém outra informação importante nesse estudo era a variação da massa específica da corrente ao longo do escoamento, principalmente em sua cabeça pois é onde ocorre a maior parte da mistura com o fluido ambiente. Por isso foi desenvolvida uma aparelhagem para medir essa variação durante o escoamento.

As correntes de densidade simuladas nessa pesquisa eram formadas por uma mistura de água e sal em concentrações conhecidas. Considerando a propriedade de aumento de condutividade da água com o aumento de íons livres, consequência do sal dissolvido, resolveu-se desenvolver sondas de condutividade. A idéia era de relacionar a massa específica de uma solução com a condutividade medida pelas sondas. Isso possibilitaria a medição do perfil de concentração da corrente durante o escoamento em diferentes seções.

2. DESCRIÇÃO DO APARELHO

O conjunto que forma o aparelho de medição é formado pelos sensores de condutividade, uma placa de aquisição e transmissão das informações e uma fonte de alimentação. Os sensores de condutividade estão dispostos em quatro conjuntos de sondas (cada uma com oito sensores), sendo que dois conjuntos estão acoplados numa peça única. O distanciamento entre sensores é de 2 cm e o sensor 1 (primeiro de baixo para cima) está posicionado 1 cm acima da base da sonda. Com essa configuração é possível medir a condutividade em três seções distintas em correntes com até 15 cm de altura. A figura A.2.1 mostra a configuração do aparelho, já na figura A.2.2 pode-se visualizar os quatro conjuntos de sondas e o detalhe dos sensores é apresentado na figura A.2.3 e A.2.4.

Os sensores utilizados são dois pinos metálicos fixados num suporte plástico. Os pinos metálicos receberam banho ouro para torná-los inertes às reações químicas. Cada conjunto de

oito sensores é acoplado numa base isolante formando uma sonda. Um dos pólos de cada sensor é ligado a um fio que induz uma corrente elétrica. O outro pólo de todos os sensores de uma sonda são ligados a um fio que recebe a corrente. O isolamento da sonda com o meio se deu com a aplicação de uma camada de silicone, ficando apenas os pinos metálicos em contato direto com o ambiente.

A placa de controle e aquisição de dados utilizada foi desenvolvida pelo Setor de Instrumentação do IPH sob supervisão do Eng. Eletricista Alexandre Mahler podendo ser utilizada em diversas aplicações, por exemplo para armazenar dados de estações climáticas totais, linígrafos, pluviógrafos entre outros equipamentos. A capacidade de armazenamento de dados é de 32 Kbytes e, além de armazenar as informações, controla o funcionamento dos sensores. Sua alimentação é feita através de corrente contínua em 12 volts. A precisão das medidas é de 0,1% F.S.



Figura A.2.1 – Vista geral do aparelho



Figura A.2.2 – Conjunto das sondas

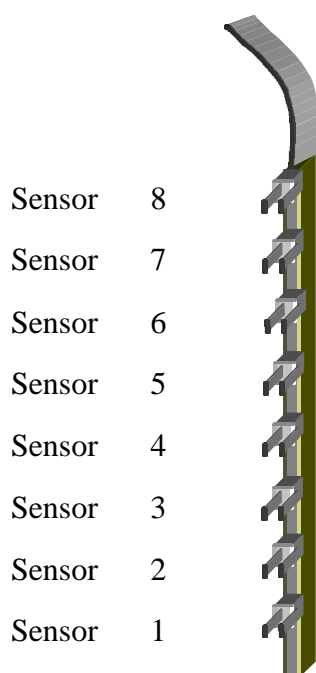


Figura A.2.3 – Esquema da sonda



Figura A.2.4 – Sensor da sonda

3. PRINCÍPIOS DE FUNCIONAMENTO - CONDUTIVIDADE.

A condutividade mede a capacidade de uma solução em conduzir corrente elétrica. Essa característica é função da quantidade de íons livres na solução. Normalmente as medições de condutividade são realizadas em soluções aquosas porque a água tem a capacidade de estabilizar os íons formados na dissolução. Por exemplo na adição de Cloreto de Sódio (NaCl) em água, os íons formados Na^+ e Cl^- permanecem estáveis.

A medição de condutividade pode ser aplicada desde a água pura ($1 \times 10^{-7} \text{S/cm}$) até em soluções com concentrações superiores a da água do mar ($1 \times 10^{-2} \text{S/cm}$). Isto significa abranger uma faixa de variação que pode chegar a até 10^8 Siemens/cm – unidade de medida da condutividade em soluções.

Basicamente, este aparelho utiliza sensores com eletrodos de metal que entram em contato com uma solução ou com um escoamento estratificado. O circuito equivalente deste sistema é apresentado de forma simplificada na figura A.2.5. Associa-se à solução situada entre os eletrodos, um comportamento semelhante ao de uma resistência variável do conjunto, proporcional à quantidade de íons livres na solução. Aplicando uma diferença de potencial no circuito, é induzida uma corrente elétrica, que atravessa a solução. Através da medida da tensão na resistência interna do aparelho e de um conversor A/D, pode-se calcular a resistência equivalente da solução entre os eletrodos e assim determinar sua condutividade.

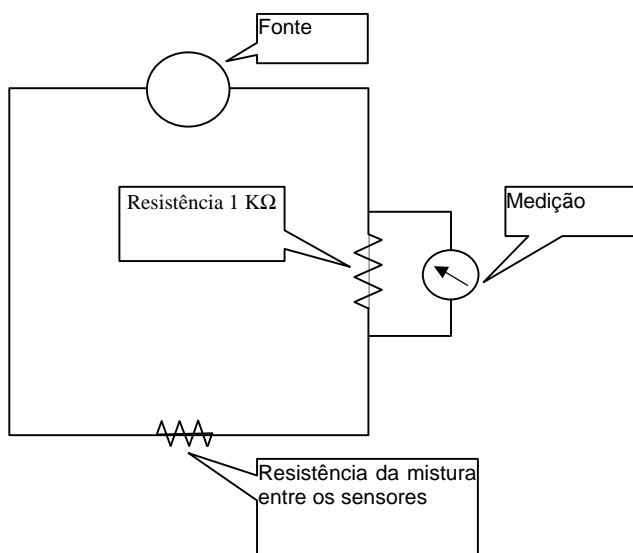


Figura A.2.5 – Circuito simplificado das sondas de condutividade

4. AQUISIÇÃO/TRANSFERÊNCIA DE DADOS.

A placa de aquisição funciona da seguinte maneira: um pulso elétrico de curta duração é enviado a cada sensor independentemente, quando se faz a medição da queda de tensão na resistência interna. A aquisição é feita por um conversor A/D, resultando em um valor digital que varia entre 1 e 1024 (10 bits) e esse dado é armazenado na memória. O tempo em que a corrente passa pelo sensor para fazer a aquisição é de 250 μ s. Sucessivamente, o pulso elétrico é enviado ao sensor seguinte. O tempo entre as medidas para um mesmo sensor é de 200 ms, ou seja, são feitas 5 aquisições por segundo para cada sensor. No total são feitas 160 medidas por segundo, referente ao conjunto das quatro sondas (oito sensores por sonda).

Todos os dados e configurações do aparelho estão acessíveis ao usuário, através de um visor de cristal líquido com duas linhas e 16 caracteres e um teclado onde são acionadas as funções. No teclado numérico são escolhidas as funções: adquirir dados, transmitir dados, inserir número de sondas e zerar memória. Outras duas teclas abaixo do teclado numérico mudam as opções visíveis no visor. A central de controle é visualizada em detalhe na figura A.2.6.



Figura A.2.6 – Central de controle do aparelho

O sistema de transferência de dados para o computador é feita por um cabo com conexão serial de 9 pinos, padrão RS232C. O programa COND3 gerencia a transferência de dados no computador. Esse programa tem interface “texto” e permite gravar os dados adquiridos da sonda em um arquivo com estrutura ASCII de colunas separadas por espaços. A figura A.2.7 mostra uma tela do programa.

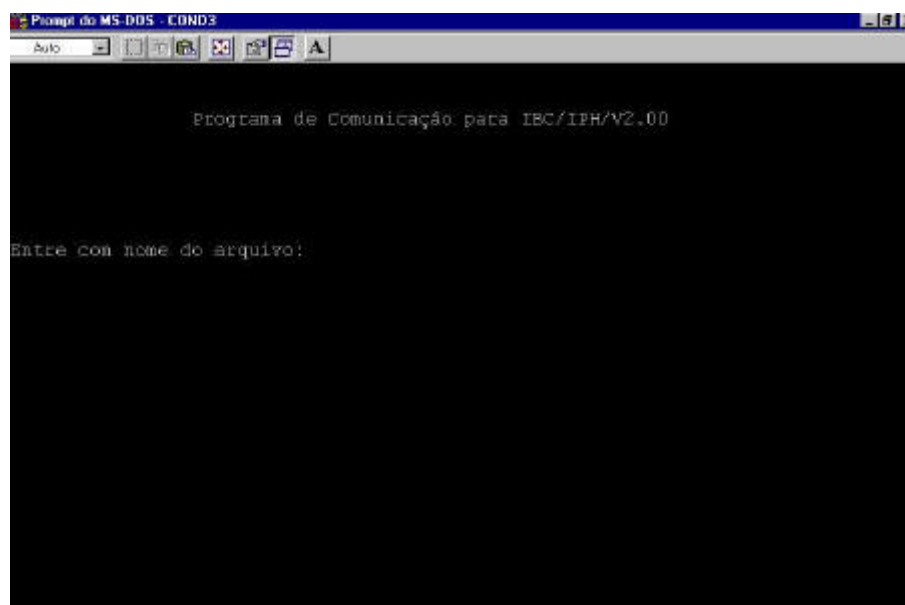


Figura A.2.7 – Programa de transmissão de dados

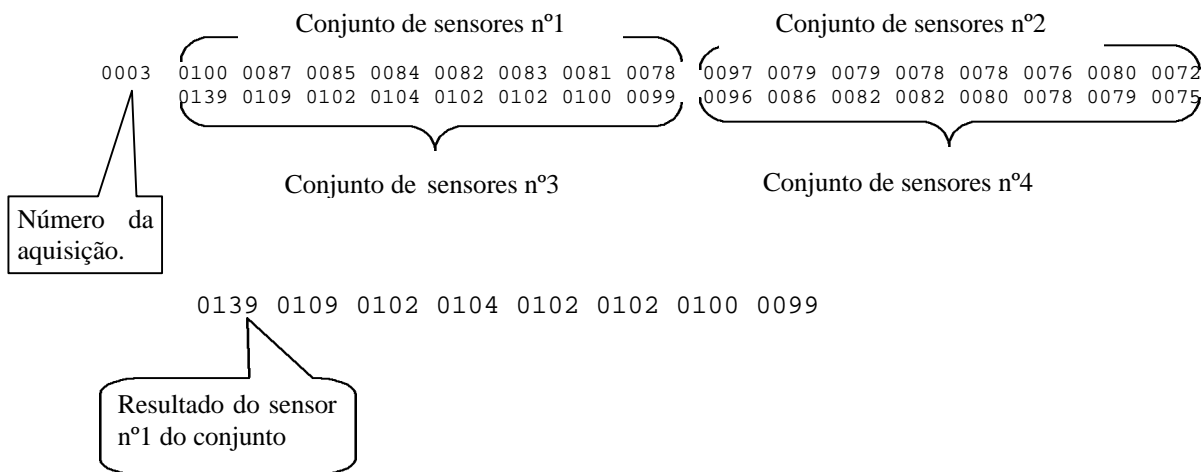
A estrutura do arquivo gerado pelo programa COND3 é apresentado abaixo. Nesse arquivo aparecem dez aquisições, o que representa apenas uma amostra do arquivo completo. Como são feitas cinco aquisições por segundo essa amostra foi adquirida em dois segundos.

```

0001 0099 0086 0084 0083 0081 0081 0081 0078 0096 0079 0078 0078 0077 0076 0080 0072
      0138 0108 0101 0103 0101 0101 0099 0099 0096 0086 0082 0082 0079 0079 0078 0075
0002 0101 0086 0085 0083 0082 0082 0080 0079 0097 0080 0079 0077 0078 0077 0080 0072
      0139 0108 0102 0104 0101 0101 0100 0099 0096 0087 0082 0082 0081 0078 0079 0076
0003 0100 0087 0085 0084 0082 0083 0081 0078 0097 0079 0079 0078 0078 0076 0080 0072
      0139 0109 0102 0104 0102 0102 0100 0099 0096 0086 0082 0082 0080 0078 0079 0075
0004 0101 0087 0085 0082 0082 0082 0081 0079 0096 0081 0079 0078 0078 0077 0079 0073
      0139 0108 0102 0104 0101 0102 0100 0099 0096 0086 0082 0082 0081 0078 0079 0075
0005 0101 0087 0085 0084 0082 0083 0081 0079 0097 0080 0079 0078 0077 0077 0080 0072
      0139 0109 0102 0104 0102 0101 0100 0099 0095 0087 0082 0082 0080 0079 0078 0075
0006 0102 0087 0085 0084 0083 0082 0081 0079 0097 0080 0079 0078 0078 0077 0080 0073
      0139 0108 0102 0104 0101 0101 0100 0098 0096 0087 0082 0083 0081 0078 0079 0075
0007 0101 0087 0085 0084 0082 0082 0081 0078 0097 0079 0079 0078 0078 0077 0080 0072
      0139 0109 0102 0105 0102 0101 0100 0098 0096 0086 0082 0082 0081 0078 0079 0076
0008 0101 0086 0085 0083 0083 0083 0081 0078 0097 0080 0079 0077 0078 0077 0080 0073
      0139 0109 0102 0104 0102 0102 0100 0099 0097 0087 0082 0082 0081 0078 0079 0075
0009 0101 0087 0084 0083 0082 0082 0081 0079 0097 0080 0080 0078 0077 0078 0080 0072
      0139 0109 0102 0105 0101 0101 0100 0099 0096 0087 0082 0081 0081 0078 0079 0076
0010 0101 0088 0086 0084 0082 0082 0081 0078 0097 0080 0079 0078 0078 0077 0080 0073
      0139 0109 0101 0104 0102 0102 0099 0099 0096 0087 0082 0083 0081 0079 0079 0076

```

Para melhor compreensão dos dados registrados, segue a apresentação abaixo com a identificação das leituras realizadas pelo equipamento e do padrão do registro das informações.



5. DESENVOLVIMENTO E AFERIÇÃO DAS SONDAS DE CONDUTIVIDADE

Os resultados dispostos no arquivo de saída das sondas são números adimensionais que expressam, quantitativamente, a queda de tensão na resistência interna. Os valores de saída devem ser relacionados com a massa específica da solução utilizada para poderem ser utilizados nas análises, por isso o aparelho deve ser calibrado com soluções de massa específica conhecida. Assim, é possível associar a resposta encontrada com um único valor de massa específica. Isto é, se faz necessário estabelecer no instrumento uma relação unívoca entre os dados de resposta e os valores de massa específica medidos.

Com o início dos testes das sondas de condutividade padronizou-se um procedimento de ensaio para relacionar os valores de saída do aparelho com a massa específica utilizada.

O procedimento utilizado para os ensaios é definido a seguir:

A solução de água e sal era preparada garantindo que todo o sal adicionado estava dissolvido e então eram medidas a massa específica e a temperatura. A massa específica foi medida através de densímetro flutuante com escala de 950 kg/m^3 até 1050 kg/m^3 . A escala do densímetro tem precisão de 1 kg/m^3 . A temperatura da água foi medida por termômetro de mercúrio com escala de 0°C a 100°C com precisão de 1°C . A solução era transferida para provetas com capacidade de 1 L e as sondas eram colocadas em provetas separadas. O tempo de aquisição adotado foi de aproximadamente 1 minuto. As informações adquiridas eram então transferidas para o computador para posterior análise. Através de planilhas eletrônicas, os dados puderam ser avaliados graficamente.

Os primeiros testes com o equipamento mostraram uma não linearidade na resposta das sondas. Durante a aquisição de dados numa solução homogênea, a resposta da sonda diminuía lentamente até atingir um patamar estável. A figura A.2.8 apresenta os resultados obtidos nos primeiros testes.

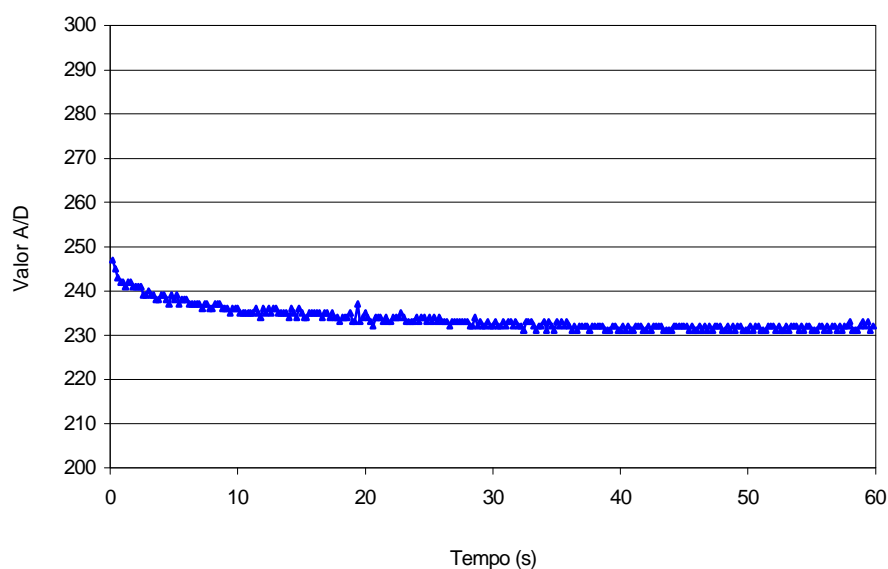


Figura A.2.8 – Resultado dos primeiros testes das sondas de condutividade

Após uma reavaliação do circuito da placa de controle observou-se que a resposta de uma sonda estava influenciando o resultado da outra. Havia uma corrente de retorno que estava afetando os valores registrados pelas outras sondas. A instalação de diodos no circuito eliminou esse problema.

Nos testes dessa fase as sondas apresentaram um efeito de decaimento nas respostas, como na fase anterior, mas atingindo um patamar de estabilização mais rapidamente. Apesar da melhora na resposta das sondas, o efeito de decaimento deveria ser minimizado ainda mais para apresentar bons resultados durante os ensaios. A figura A.2.9 mostra o resultado de um teste nessa fase.

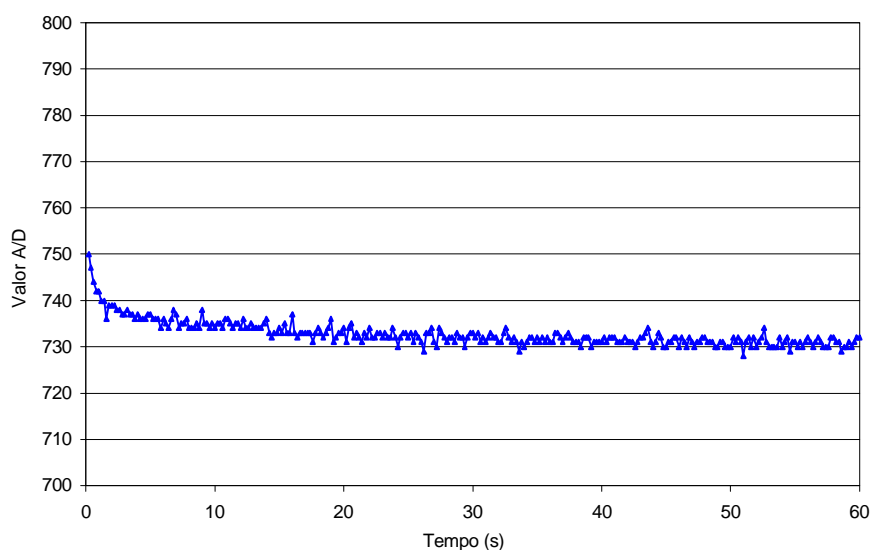


Figura A.2.9 – Não linearidade no resultado das sondas.

A hipótese levantada para explicar esse comportamento foi que a água pode sofrer polarização das moléculas, reduzindo a resistência à passagem da corrente nos sensores. A polarização acontece porque a molécula da água tem uma estrutura polar sendo que a passagem de corrente elétrica modifica sua disposição espacial.

Na tentativa de reduzir o efeito de polarização, a programação da placa controladora foi modificada para gerar um pulso elétrico no sentido contrário daquele utilizado para aquisição da informação. A corrente contrária é de mesma intensidade e duração da corrente da aquisição. Esse processo mostrou melhoras significativas na resposta dos sensores. A resposta permaneceu estável durante toda a aquisição, entretanto a dispersão da resposta aumentou. A figura A.2.10 mostra os resultados após a implementação da corrente de despolarização.

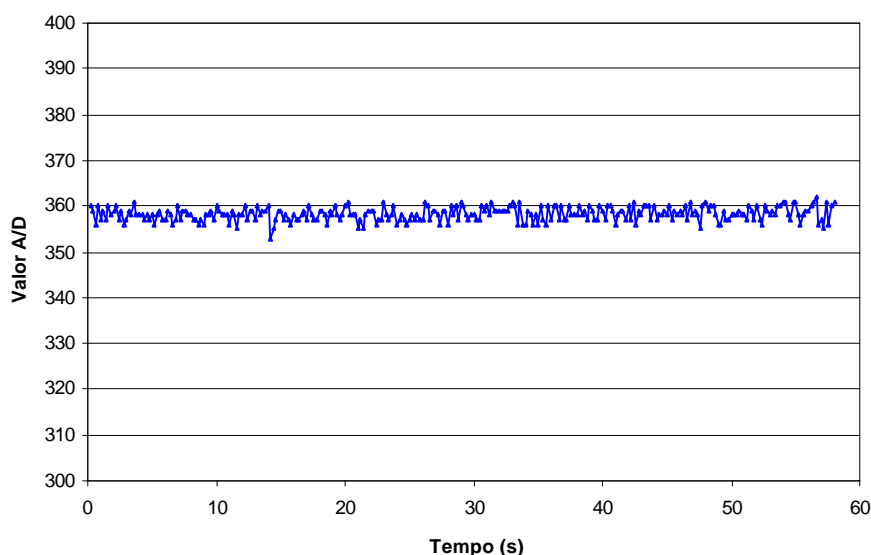


Figura A.2.10 – Aquisição de dados com corrente de despolarização.

Para tentar reduzir a dispersão da resposta, o tempo de despolarização foi variado até se atingir um resultado com a menor dispersão possível. Nas fases anteriores, os pulsos elétricos iniciavam no momento em que o aparelho era ligado e não quando a aquisição dos dados era acionada. Nessa fase foi implementada uma mudança no sistema para que os pulsos elétricos iniciassem somente quando a aquisição de dados fosse acionada. A resposta das sondas se mostraram mais estáveis. A figura A.2.11 apresenta o resultado das sondas na fase final de testes.

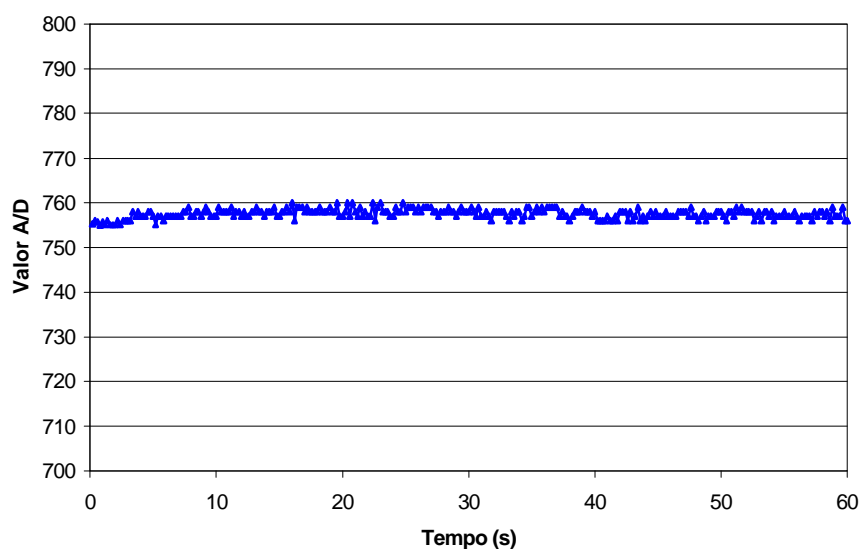


Figura A.2.11 – Resultados depois do ajuste do tempo de despolarização

A dispersão da resposta foi diminuída com o ajuste do tempo de despolarização aumentando sua precisão. Após o teste do tempo de despolarização, o circuito foi modificado para ampliar a capacidade da corrente para fazer a medida. Os circuitos digitais normalmente, principalmente os microprocessadores, não têm grande capacidade de fornecer corrente a dispositivos externos. Para certificar que não há flutuação da medida decorrente deste fenômeno, foi acrescentado um *booster* de corrente para fornecer corrente às sondas.

Passada a etapa de testes das sondas foi necessário calibrá-las relacionando as respostas fornecidas pelo conversor A/D (analógico/digital) do aparelho com a massa específica da solução. Considerando que cada sensor pode ter pequenas variações de comportamento entre si foi ajustada uma curva de calibração para cada um dos sensores. A figura A.2.12 apresenta as curvas de calibração para os oito sensores que formam a sonda 3 para a temperatura de 24°C.

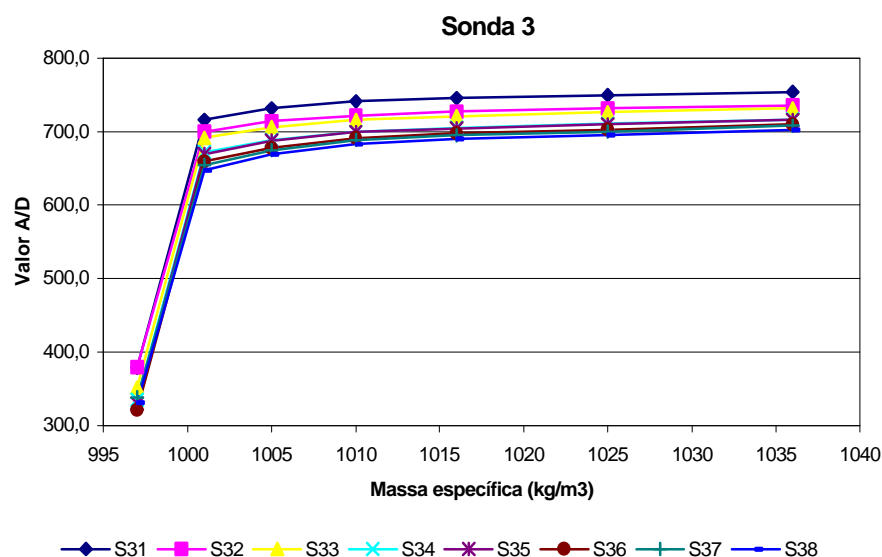


Figura A.2.12– Curva de calibração da sonda 3

5.1 Análise das curvas de calibração

Os sensores do instrumento são de igual constituição e estão ajustados para exibirem valores de resposta iguais, ou seja, as curvas de calibração, independentemente de qual sensor que esteja sendo analisado, deveriam ser iguais. Assim se espera que ocorra a sobreposição de todas as curvas de calibração de um conjunto de sensores em um gráfico.

Na figura A.2.12 é possível notar a ocorrência de duas faixas pronunciadas, nas quais as curvas de calibração apresentam comportamentos distintos. A primeira faixa, compreendida entre as massas específicas 998 kg/m^3 e 1001 kg/m^3 , se aproxima do comportamento esperado para os sensores, na qual há uma aparente sobreposição entre as curvas. A segunda faixa, disposta a partir da massa específica 1001 kg/m^3 em diante, apresenta um afastamento das curvas de calibração.

Diante desse comportamento, os fatores que podem interferir no resultado das sondas foram identificados (Rosemount Analytical, 1998). Em alguns casos os fatores podem influenciar a resposta do aparelho de forma significativa e, em outros, podem limitar seu funcionamento em determinadas faixas de operação.

Efeitos decorrentes da construção dos sensores: os sensores foram construídos utilizando barras de pinos paralelas, normalmente utilizadas em placas de circuito impresso, com dimensões e espaçamento bem definidos. Durante a montagem pode

haver uma diferença no posicionamento e na área externa do sensor, o que influencia diretamente a medida.

Efeitos decorrentes da condutividade: os sensores quando submetidos a soluções fortemente concentradas são suscetíveis à corrosão e a deposição em suas superfícies, reduzindo suas capacidades de medição. Além disso, também pode se manifestar o fenômeno de polarização nos sensores, ocasionando uma não linearidade nos resultados das medições.

Este último efeito foi minimizado após a fase de teste com a implementação da corrente de despolarização, evitando também a deposição de sal na superfície dos eletrodos.

Limitações relativas à medição da condutividade: a figura A.2.13 representa a variação da condutividade com a concentração da solução. É possível observar a existência de faixas nas quais é possível realizar a medição da condutividade e de faixas nas quais a condutividade não pode ser medida.

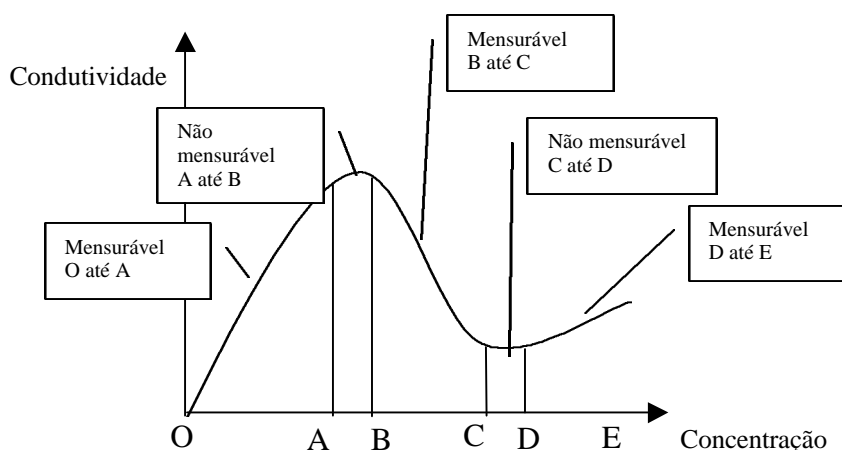


Figura A.2.13 – Condutividade x concentração de sal na água

Existe a possibilidade de que se esteja trabalhando com o instrumento em uma faixa na qual esse efeito seja significativo. Caso isso esteja ocorrendo, a aplicabilidade inicial do aparelho se tornará um pouco reduzida.

Interferência entre sensores: os sensores podem interferir entre si e, conseqüentemente, em suas medições. O par de contatos que forma o sensor está distanciado de 2 mm, enquanto os pares estão distanciado de 20mm, sendo que um dos pólos de cada par está no mesmo potencial dos outros, minimizando a

interferência. Esta interferência sempre vai modificar o sinal da mesma forma e pode ser conhecida e compensada através da calibração.

Os sensores foram dispostos nos conjuntos com um distanciamento de 20 milímetros entre si, adequado às medições nos experimentos. Ainda são necessários estudos sobre qual seria o distanciamento adequado entre sensores que, não somente contemple o que se pretende medir nos experimentos, mas que minimize o efeito de interferência entre sensores.

Influência da temperatura: a condutividade de soluções salinas aumenta com o aumento da temperatura. Por isso é necessário estabelecer uma relação entre as curvas de calibração para diferentes temperaturas. A variação da condutividade, nesse caso, pode ser adotada como linear e é da ordem de 2,2% a 3,0% por °C. Portanto, a compensação da calibração pode ser feita através de uma equação linear com um coeficiente (K) que representa o aumento percentual da condutividade por grau centígrado.

6. CONCLUSÕES

A condutividade de soluções de água e sal tem uma variação bastante sensível na faixa mostrada pela figura A.2.13 na região compreendida entre A e B com a variação da concentração. Essa faixa de variação de massa específica da solução, onde se obteve bons resultados, ficou entre 996 kg/m^3 e 1001 kg/m^3 . Após essa faixa, a condutividade varia muito pouco com o aumento da massa específica pela adição de sal na solução. Nos ensaios com solução de 1022 kg/m^3 a resposta da sonda se mostrou saturado, não captando variações de massa específica próximas a da solução. Já para os ensaios com soluções de 1010 kg/m^3 as sonda apresentam alguma sensibilidade, mas com algum prejuízo a precisão da medida. Apesar dessa limitação foi possível utilizar as medições dos ensaios com soluções de 1010 kg/m^3 de uma forma qualitativa para estudar a variação da massa específica na camada de mistura formada sobre o corpo da corrente e também do perfil de concentração. Uma aplicação quantitativa ficou prejudicada pelas incertezas e da limitação do equipamento para medir condutividades altas.

A sugestão indicada aqui é a utilização de materiais que solubilizem na água, mas que aumentem lentamente a condutividade da solução com o aumento da concentração permitindo que se trabalhe numa faixa de resposta com maior sensibilidade e precisão.