

1 Introdução

Correntes de densidade ou correntes de gravidade ocorrem tanto na natureza como em situações criadas pelo homem. As avalanches, correntes oceânicas, movimentos de massas de ar com diferentes temperaturas, lançamentos acidentais de gases densos na atmosfera, são alguns exemplos desse tipo de corrente.

As correntes de densidade são fluxos gravitacionais que fluem pela ação da gravidade, devido à diferença de densidade entre o fluxo e o fluido circundante (Simpson, 1997). A diferença de densidade das correntes de densidade pode ser causada por efeitos térmicos, ou como resultado do material dissolvido ou material suspenso, ou ainda pela combinação desses dois fatores. A corrente é dita conservativa, se o material estiver dissolvido dentro da corrente. Porém, se o material estiver suspenso, a corrente é dita não-conservativa.

Embora existam diversos tipos de correntes de densidade, os registros geológicos revelam que somente dois desses processos, correntes de detritos e correntes de turbidez, são responsáveis pelo depósito de cerca de 90% de sedimentos de grãos maiores no fundo do mar (Middleton & Hampton, 1976). Assim, a corrente de turbidez, que é tradicionalmente definida como sendo uma corrente de densidade induzida pela presença de material em suspensão, é um caso particular das correntes de densidade.

Em correntes de densidade atmosféricas como, por exemplo, as brisas marinhas ou tempestades, a diferença de densidade é causada tipicamente pela diferença de temperatura entre a propagação da frente fria e o relativo ar aquecido do ambiente, Figura 1. Em outras situações, a diferença de densidade pode ocorrer devido a outras fontes, tais como a falta de homogeneidade na distribuição das substâncias dissolvidas na corrente como, por exemplo, o sal nas correntes oceânicas, ou pela presença de partículas pesadas, ou ainda o pó da neve em avalanches.



Figura 1 - Corrente de gravidade de ar frio na atmosfera, visível devido à suspensão da areia e da poeira (Simpson, 1997)

De acordo com Mulder & Alexander (2001), no ambiente marinho, as correntes de densidade podem ser classificadas de acordo com a diferença de densidade entre a corrente, ρ_f , e o fluido circundante, ρ_w . Isso permite a definição de quatro tipos de fluxos, Figura 2. Essa classificação é baseada na coesividade das partículas, duração do fluxo, concentração de sedimentos e no mecanismo de suporte das partículas.

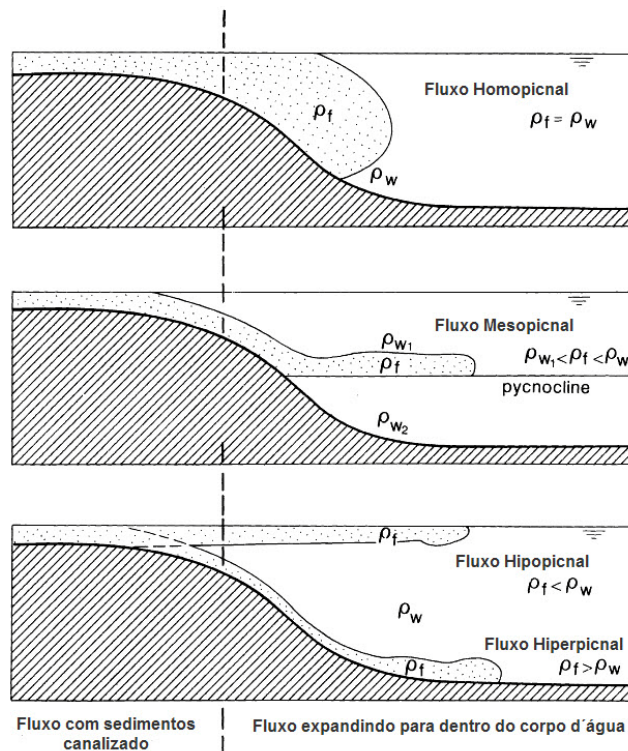


Figura 2 – Tipos de correntes de densidade em ambiente marinho (Mulder & Alexander, 2001)

Se $\rho_f = \rho_w$, isto quer dizer que as densidades do ambiente e da corrente são iguais, logo, tem-se um *fluxo homopícnal*. Para $\rho_f < \rho_w$, tem-se um *fluxo hipopícnal*, para $\rho_f > \rho_w$, tem-se um *fluxo hiperpícnal*. Caso a densidade do fluxo esteja compreendida entre a densidade de dois fluidos ambientes distintos, o fluxo irá percorrer sua trajetória acima da *pycnocline*, e esse fluxo é dito *mesopícnal*.

Correntes de densidade são freqüentemente encontradas no contexto geofísico, porém o comportamento dessas correntes também é de interesse em engenharia, devido ao importante papel que elas desempenham em vários problemas relacionados com segurança industrial e proteção ambiental. De acordo com Mulder *et al* (2003), nos últimos anos, correntes de densidade têm sido amplamente estudadas, estimulado pela necessidade de caracterização de reservatórios de águas profundas e outras necessidades da indústria *offshore*. Segundo Kneller & Buckee (2000), profissionais de diversas áreas foram envolvidos no estudo e pesquisa desses tipos de correntes, concentrando o foco de seus estudos em basicamente três grupos: modelagem matemática, simulação física em laboratório e observação dos registros geológicos dos sistemas turbidíticos.

1.1. Motivação

Esse trabalho insere-se na linha de pesquisa de Computação Gráfica Aplicada do Departamento de Engenharia Civil da PUC-Rio, que visa investigar técnicas de computação gráfica aplicadas ao desenvolvimento de programas gráficos interativos para o auxílio a análise e projetos em engenharia. Em um convênio firmado entre o Grupo de Tecnologia em Computação Gráfica da PUC-Rio, Tecgraf, e a Petrobras, essa linha de pesquisa vêm desenvolvendo aplicativos e tecnologia em diversas áreas, dentre elas: engenharia civil, engenharia mecânica e geologia. Atualmente o Tecgraf desenvolve importantes aplicativos de alta-performance utilizados pela Petrobras que auxiliam em diversas etapas do processo de exploração de petróleo dessa empresa. Dentre esses aplicativos pode-se citar um sistema numérico de modelagem estratigráfica, chamado *Steno*, Figura 3.

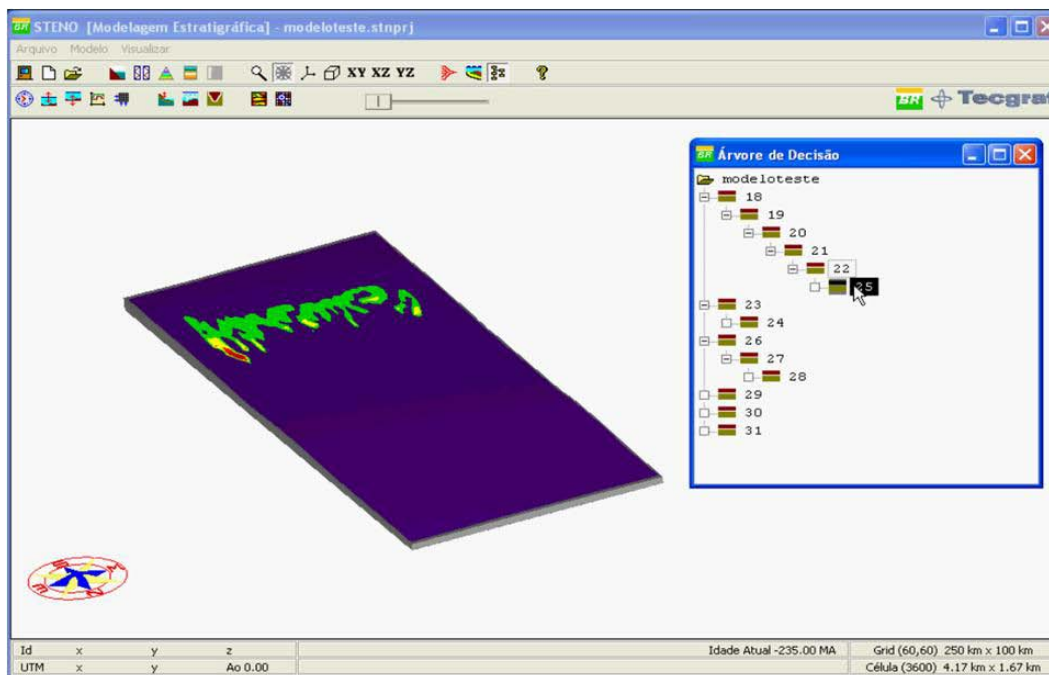


Figura 3 - Interface do sistema numérico de modelagem estratigráfica *Steno*

O *Steno* é um simulador numérico de sedimentação tridimensional, com ênfase nos processos deposicionais em ambientes de plataforma, talude e bacia. O algoritmo do simulador é baseado nos conceitos quantitativos formulados pela estratigrafia de seqüências, como mecanismos de controle primário da arquitetura dos estratos sedimentares, e em uma análise numérica para simulação do fluxo bidimensional de um fluido incompressível, em regime permanente, não viscoso, em função da batimetria da região a ser modelada através de uma malha regular definida pelo usuário (Carvalho, 2002).

O *Steno* tem como objetivos: produzir um simulador numérico que opere em escala estratigráfica, isto é, com tempo de simulação da ordem de milhões de anos; apoiar a modelagem de bacias e testar cenários exploratórios.

Com base nos dados de entrada fornecidos pelo usuário, o programa determina os campos de velocidades, calculado a partir das velocidades de aporte de sedimentos e das velocidades de corrente. Esse campo de velocidades é usado, então, para determinar a direção do escoamento dos sedimentos, as chamadas linhas de fluxo. Os sedimentos são transportados hidrodinamicamente, isto é, na direção x e y eles são transportados segundo as linhas de fluxo e na direção z a movimentação/deposição dos sedimentos é controlada pelo volume do espaço disponível para acomodação em cada uma das colunas formadas a partir das células do modelo discretizado.

Além disso, havia a necessidade de incorporar ao *Steno* um módulo capaz de simular outro importante processo deposicional, os fluxos gravitacionais, mais especificamente as correntes de turbidez. No contexto do *Steno*, essas correntes são eventos catastróficos que ocorrem durante um curto intervalo de tempo, se comparado à escala de tempo da simulação, em um dado instante.

Esse módulo deve ser capaz de fornecer resultados que sejam relativamente consistentes e aceitáveis do ponto de vista geológico, e precisa ser simples e rápido o suficiente para ser executado em computadores portáteis e não em poderosos computadores, como é o caso de muitos modelos numéricos utilizados atualmente para solução desse tipo de problema, que chegam a consumir dias de processamento contínuo.

Assim, o principal objetivo desse trabalho é propor um modelo numérico simplificado de correntes de turbidez capaz de produzir previsões relativamente precisas da evolução das correntes e características dos depósitos, fornecendo uma ferramenta que possa ser utilizada para previsão de sedimentação de bacias nos processos de modelagem estratigráfica do *Steno*.

Adota-se como simplificação um modelo de média vertical, em que as equações de Navier-Stokes são resolvidas tirando-se a média ao longo da profundidade, tomando-se por base o perfil característico de velocidades¹. De acordo com Kneller e Buckee (2000), modelos de média vertical, mesmo não modelando os processos dinâmicos dentro das correntes de turbidez, podem produzir previsões relativamente precisas da evolução das correntes e características dos depósitos, fornecendo uma compreensão valiosa para geólogos com relação a depósitos formados pelas correntes de turbidez. Daqui em diante, esses modelos serão citados no texto como modelos de média vertical. Esses modelos também são conhecidos como modelos utilizando equações de águas rasas, do inglês *shallow-water*.

Dessa forma, pretende-se, ao simplificar o modelo numérico de correntes de turbidez, atingir as duas condições primordiais impostas pelo *Steno*: resultados da simulação de correntes de turbidez relativamente precisos e baixo custo computacional.

1. Em inglês usa-se o termo *depth-average* para denominar os modelos de média vertical.

É importante ressaltar que o objetivo desse estudo é, portanto, fornecer uma ferramenta que possa ser utilizada para previsão de sedimentação de bacias nos processos de modelagem estratigráfica, visando basicamente o processo deposicional gerado pelo método, e não a simulação completa de escoamentos turbulentos.

1.2.Revisão Bibliográfica

O interesse no estudo de corrente de densidade por diversas áreas de pesquisa deu origem a uma quantidade substancial de pesquisas teóricas e experimentais. Muitos trabalhos foram desenvolvidos em correntes de densidade confinadas em canais e tubos, ou na propagação das correntes sobre superfícies horizontais e inclinadas.

Existem diversos modelos matemáticos para correntes de densidade, que variam desde simples equações hidráulicas até complexos modelos de turbulência. Esses modelos matemáticos podem ser usados com diversos propósitos, desde fornecimento de estimativa de velocidade e espessura da corrente, para previsão da geometria de turbiditos e sua distribuição de grãos, até modelagem da estrutura vertical da turbulência em correntes de densidade (Kneller e Buckee, 2000).

As equações matemáticas que necessitam ser resolvidas nesse tipo de modelos são basicamente: a conservação da massa de fluido, a conservação da massa de sedimentos e a conservação da quantidade de movimento, conhecida também como equações de Navier-Stokes. As equações de Navier-Stokes são equações diferenciais parciais não-lineares, que podem ser resolvidas para escoamentos turbulentos, tais como as correntes de densidade, desde que sejam assumidas algumas hipóteses simplificadoras (Tennekes & Lumley, 1972).

Os primeiros modelos de correntes de turbidez eram baseados em uma equação modificada da conhecida equação de Chézy para fluxos permanentes e uniformes, que pode ser obtida da equação de Navier-Stokes (Komar, 1977):

$$\bar{U} = \sqrt{\frac{8g'Sh}{f_b + f_i}} \quad (1)$$

onde \bar{U} é a velocidade média da corrente, S é a declividade do canal, h é a espessura média da corrente, g' é a aceleração da gravidade reduzida e f_b e f_i são os coeficientes de atrito de Darcy-Weisbach na camada inferior e superior da corrente respectivamente.

Middleton e Southard (1984) sugerem que para correntes de turbidez volumosas a soma dos coeficientes $f_b + f_i$ é aproximadamente 0,01, onde $f_b < f_i$, e esses dois coeficientes são provavelmente função do número de Froude. Modelos baseados nas equações modificadas de Chézy têm sido freqüentemente utilizados para modelar as propriedades do fluxo de correntes de turbidez naturais. Alguns desses modelos têm sido estendidos com o propósito de estudar a evolução, erosão e deposição dessas correntes, (Kneller e Buckee, 2000).

Uma simples análise para propagação da velocidade e deposição das partículas em correntes de densidade por ser feita empregando-se o modelo de caixas, do inglês *box models* (Huppert, 1998). Este modelo não é baseado nas equações de Navier-Stokes, em vez disso, a corrente é modelada como uma série de retângulos de mesma área, e sem que haja uma variação temporal das propriedades horizontais e verticais do fluxo. A taxa de propagação é controlada pelo número de Froude, que é assumido constante na faixa de 0,7 a 0,8. Dessa maneira, uma forma dimensional da solução pode ser determinada e resolvida analiticamente. Esses modelos são adequados para modelagem de casos simples, porém raramente foram testados para modelagem de casos de deposição natural, devido à dificuldade na restrição das condições iniciais (Kneller e Buckee, 2000).

Em modelos mais complexos, as equações de Navier-Stokes são resolvidas pela média vertical. A hipótese é feita considerando o fato de que as variações verticais nas propriedades das correntes não são significativas, assim as equações governantes podem ser integradas na altura do fluxo. Essa hipótese resulta em uma média para cada variável, por exemplo, velocidade ou concentração de sedimentos, em cada ponto. Porém, as propriedades das correntes de turbidez variam drasticamente com a altura, logo se utiliza um perfil vertical ou fator de forma para a velocidade ou concentração de sedimentos (Garcia, 1994). Apesar de esses modelos levarem em consideração algumas propriedades importantes da corrente, o fator de forma utilizado geralmente é adotado como sendo uma constante nos modelos numéricos, o que não ocorre no caso das correntes de turbidez naturais, onde tanto o perfil de velocidade como o de concentração de sedimentos pode variar com o decorrer do tempo. Assim, tais modelos são ditos quase bi-dimensionais, uma vez que as variações verticais das propriedades não são verdadeiramente modeladas.

Modelos baseados na média vertical levam a turbulência em consideração através do emprego de uma função empírica para a entrada de fluido ambiente

no topo da corrente (Ellison & Turner, 1959), e são geralmente resolvidas numericamente através da discretização das equações governantes. Entretanto, adotam-se algumas simplificações, como, por exemplo, considera-se o escoamento permanente. Assim, as equações de Navier-Stokes reduzem-se a equações que podem ser resolvidas analiticamente, ao contrário de complexas soluções numéricas que podem exigir grande esforço computacional.

Apesar dos modelos baseados na média vertical produzirem previsões da evolução da corrente e das características dos depósitos relativamente precisos, eles não são capazes de modelar verdadeiramente a dinâmica dos escoamentos turbulentos dentro da corrente de turbidez (Kneller e Buckee, 2000).

Diversos modelos de escoamentos turbulentos têm sido aplicados às correntes de turbidez (Rodi, 1980). Tais modelos são ideais para situações onde há uma significativa variação das propriedades verticais da corrente e, portanto são adequados para correntes de turbidez. Além disso, fornecem um melhor entendimento da dinâmica de tais correntes (Stacey & Bowen, 1988).

Porém, modelos turbulentos possuem um grande custo computacional e de tempo inerente ao processo. Por exemplo, uma simples rodada de um modelo numérico de corrente de densidade de alta definição realizada por Cantero *et al* (2007) no *National Center for Supercomputing Applications* da Universidade de Illinois em Urbana-Campaign nos Estados Unidos, requer um mês de processamento contínuo em um SGI Altix 3000 equipado com 64 processadores, cerca de 70 Gb de memória RAM, 600 Gb de espaço livre para armazenamento de dados e 18 Tb para armazenamento da visualização do modelo.

Em muitos casos, a resposta fornecida por tais modelos, como distribuição espacial dos grãos ou espessura dos depósitos, não justificam o tremendo esforço computacional requerido. Isto porque, as incertezas quanto às condições iniciais das correntes naturais, fornecidas como dados de entrada, podem produzir respostas que seriam alcançadas utilizando modelos muito mais simples, como os modelos baseados na média vertical, por exemplo.

A simulação de correntes de densidade com um modelo numérico simplificado, baseado nas equações de Navier-Stokes utilizando a média vertical, vem sendo objeto de pesquisa de alguns pesquisadores, especialmente do grupo de pesquisa do *Department of Earth Science* da *Royal Holloway University of London*, há alguns anos. Waltham & Davison (2001), Waltham (2004), Waltham (2007), Bitton (2008) e Waltham *et al* (2008) são alguns exemplos do resultado obtido com essas pesquisas nesses últimos anos.

Em 2006, foi firmada então uma parceria entre a *Royal Holloway University of London* e Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro com o objetivo de fomentar o estudo, aperfeiçoamento e validação de simulações numéricas de correntes de densidade iniciadas pelo grupo de pesquisa do *Department of Earth Science* da *Royal Holloway University of London*.

O primeiro resultado dessa parceria foi a verificação de um modelo matemático simplificado para correntes de turbidez (Bitton, 2008). Nesse trabalho Bitton (2008) realiza inúmeros experimentos utilizando um tanque T, para coletar informações sobre a evolução espaço-temporal de velocidades das correntes de turbidez não-confinadas, e os compara com os resultados do modelo numérico. Esse tanque é composto de um canal conectado a uma plataforma quadrada. O canal mede 1,50 m x 0,32 m e a plataforma mede 1,55 m x 1,55 m, Figura 4.



Figura 4 - Tanque T usado numa primeira validação das equações de correntes de densidade (Bitton, 2008)

As velocidades das correntes de turbidez nos experimentos com o tanque foram coletadas com o uso de um medidor de velocidade por ultra-som UVP. O UVP (*ultrasonic velocity profiling*) é utilizado para medir instantaneamente as velocidades de uma corrente em meio aquoso. Para isso o UVP é dividido em três partes, os transdutores, que emitem e recebem os pulsos de ultra-som; o hardware, que interpreta os dados adquiridos pelos transdutores; e um computador, para instalação do software do UVP e armazenamento dos dados coletados. Nos experimentos realizados foram utilizados 10 transdutores posicionados em alturas diferentes.

Porém é importante salientar que as equações que modelam o fluxo, utilizadas por Bitton (2008), além de não simularem a deposição das partículas apresentam diferenças significativas com o modelo proposto neste trabalho, especialmente no que tange a lei de fricção adotada.

Esse estudo compara os resultados de uma versão simplificada do modelo numérico com os dados coletados exatamente no final do canal do tanque T, e como neste ponto do tanque a corrente ainda se encontrava confinada, avaliou-se a precisão da equação de velocidade média para problemas 1D. A comparação revelou resultados otimistas, uma vez que os gráficos das curvas de espessura e velocidade, dos experimentos e do modelo, apresentavam uma semelhança muito grande. Seguindo com as análises, Bitton (2008) compara os gráficos das curvas de espessura e velocidade de correntes não confinadas com os dados de saída do simulador 2D e mostra que no início da plataforma de ensaio as correntes coincidem satisfatoriamente, porém, conforme a corrente vai se afastando do canal começa a surgir uma discordância significativa entre elas. Sendo assim, o cálculo de velocidade média é extremamente afetado.

Na Figura 5 mostra-se uma comparação do estudo feito por Bitton (2008) do deslocamento das correntes, experimental e modelada, sobre a plataforma. Ele conclui que o deslocamento na direção do fluxo se assemelha bastante para as duas correntes, porém, na outra direção perpendicular ao fluxo, o simulador tem um deslocamento um pouco mais rápido do que o experimento.

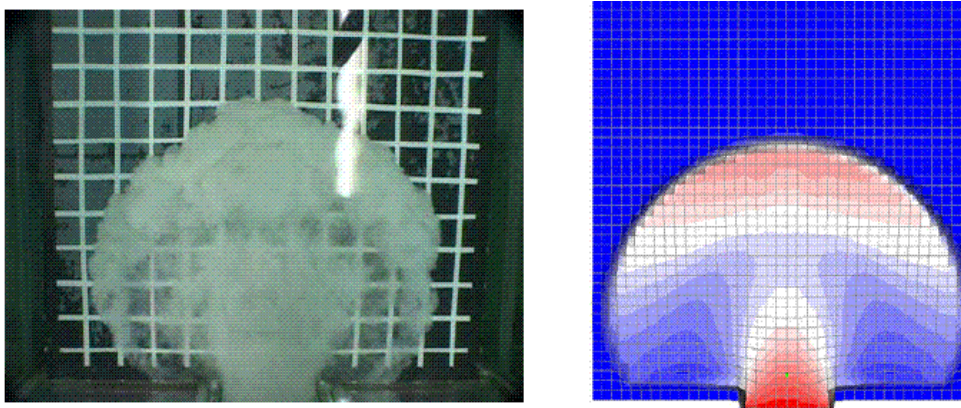


Figura 5 - Comparação dos deslocamentos das correntes modeladas fisicamente e numericamente (Bitton, 2008)

Dessa forma, Bitton (2008) conclui que apesar da equação de velocidade média não ter funcionado exatamente da forma que se esperava, ainda foi possível obter alguns bons resultados com o modelo 1D e com a comparação entre os deslocamentos das correntes dos experimentos e o simulador 2D.

1.3. Objetivos

Neste trabalho é apresentado o desenvolvimento de um módulo de simulação numérica de correntes de turbidez para sedimentação de bacias, que será incorporado ao simulador numérico de sedimentação tridimensional com ênfase nos processos deposicionais em ambientes de talude plataforma e bacia, chamado *Steno*. O modelo numérico proposto é baseado nas equações de Navier-Stokes resolvidas tirando-se a média ao longo da profundidade, tomando-se por base o perfil característico de velocidades. A hipótese é feita considerando o fato de que as variações verticais nas propriedades das correntes não são significativas, assim as equações governantes podem ser integradas na altura do fluxo.

Dessa forma, pretende-se com esta pesquisa: propor um modelo numérico consistente e com baixo custo computacional, se comparado aos complexos modelos de correntes de turbidez, que seja capaz de auxiliar na previsão de sedimentação de bacias nos processos de modelagem estratigráfica no contexto do *Steno*, e validar o modelo numérico proposto através de simulações físicas conduzidas no Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

É importante observar que apesar de toda a teoria envolvida nessa pesquisa já ser de conhecimento da comunidade científica, a abordagem dada nesse trabalho é inovadora no que tange a concepção e aplicação dessas teorias para solução de problemas de simulação numérica de correntes de densidade.

Foi desenvolvida ainda uma aplicação gráfica tridimensional para simulação numérica de correntes de turbidez. O programa possui uma interface gráfica amigável para o usuário no que diz respeito à entrada de dados e visualização dos resultados.

1.4. Organização da Tese

No capítulo 1 apresentou-se uma breve introdução ao assunto, o objetivo e fatores que o motivaram essa pesquisa, uma revisão bibliográfica dos trabalhos realizados na área de modelagem matemática das correntes de densidade, e apresentou-se os objetivos do trabalho.

O capítulo 2 apresenta uma introdução as correntes de turbidez, descrevendo os principais processos de iniciação dessas correntes, bem como sua anatomia e dinâmica.

O capítulo 3 apresenta as equações matemáticas e simplificações propostas para o modelo numérico das correntes de turbidez.

O capítulo 4 apresenta as técnicas numéricas utilizadas no desenvolvimento do algoritmo computacional de solução. Apresenta-se também um aplicativo de pré e pós-processamento de correntes de turbidez desenvolvido a partir do modelo numérico proposto.

No capítulo 5 é feita uma exposição dos resultados obtidos com as simulações físicas realizadas em laboratório, apresentando a metodologia adotada e os resultados alcançados.

No capítulo 6 apresenta-se os resultados das simulações numéricas implementadas e uma discussão acerca dos resultados obtidos nessas simulações.

O capítulo 7 resume as principais conclusões deste trabalho e apresenta sugestões para futuros trabalhos.