

1 Introdução

1.1. Correntes de Turbidez

Dentre os agentes de transporte de sedimentos presentes na natureza, a água é sem dúvida o mais importante deles. Porém, esta pesquisa se concentra no estudo do comportamento de um mecanismo específico, chamado correntes de densidade. A grande diferença entre essas duas formas de transporte está na maneira com que as partículas de sedimentos são conduzidas. A água, por exemplo, conduz individualmente essas partículas através do arrasto, saltação ou suspensão, enquanto a corrente de densidade consiste numa mistura de sedimentos e fluido que se move devido à ação da gravidade e à diferença de densidade entre essa mistura e o fluido ambiente. Assim, as correntes de densidade consistem num sub-conjunto das correntes gravitacionais.

Correntes gravitacionais têm sido discutidas em vários estudos científicos, especialmente em geologia. Esta importância em particular se deve ao fato dessas correntes influenciarem substancialmente no sistema deposicional de águas profundas. Todavia, as correntes de densidade não ocorrem apenas em meios submarinos, mas também em ambientes sub-aéreos. Dois bons exemplos são avalanches de neve misturada com ar e núvens de poeira vulcânica se deslocando na encosta de um vulcão após sua erupção. Não é uma simples coincidência que os dois exemplos apresentados sejam eventos catastróficos, intrinsecamente, grande parte dessas correntes está relacionada a catástrofes.

O mecanismo de transporte conduzido pela ação da gravidade pode ser classificado em três grupos diferentes (Allen, 1997): (i) avalanches de rochas e deslizamento de terra causado por instabilidade; (ii) correntes de densidade com escoamento plástico e comportamento laminar; e (iii) correntes de densidade com comportamento turbulento, ou correntes de turbidez. Apesar das diferenças entre esses grupos serem nítidas, é possível um grupo se transformar no outro.

Para a formação de correntes de turbidez em ambiente submarino é indispensável a existência de uma mistura de água com sedimentos, resultando

geralmente numa solução mais densa que a água do ambiente. A diferença de densidade entre os dois fluidos é responsável pela ignição das correntes de turbidez em geral e, por mais sutil que seja essa diferença, é o suficiente para induzir a propagação da corrente. Além disso, se o leito do mar possuir uma inclinação, a componente do peso pode contribuir ainda mais para aceleração do fluxo.

Com base no número de Reynolds, pode-se afirmar que a taxa de propagação ao longo do tempo, ou seja, a velocidade, pode afetar diretamente a turbulência da corrente em questão (Waltham, 2004). A turbulência é o mecanismo pelo qual os sedimentos suspensos ao longo do fluxo permanecem em suspensão, exercendo assim um papel fundamental para as correntes de turbidez. Porém, ao mesmo tempo que ocorre turbulência, também é possível se ter mecanismo de suporte por grão dependendo da concentração local de sedimentos no fluxo (Choux et al., 2005). A concentração do fluxo varia conforme a propagação da corrente, por exemplo, se ela está se movendo rápido suficiente, sedimentos do leito do mar podem ser incorporados ao fluxo através da erosão, o que aumentaria a densidade da corrente, resultando num acréscimo de ambos, velocidade e taxa de erosão da mesma, como um ciclo auto-sustentável (Pratson et al., 2000).

Por outro lado, existem três processos que podem interromper este ciclo, e conseqüentemente, dissipar a corrente gravitacional. O primeiro deles é a incorporação de água. A água também pode ser incorporada à corrente enquanto a mesma propaga, aumentando seu volume total e diminuindo sua densidade através da diluição do fluxo. O segundo processo é a deposição dos sedimentos em suspensão no fluxo, que também diminui a densidade da corrente. Por último vem a tensão de cisalhamento, gerado não somente na interface entre o leito do mar e o fluxo, mas também na interface do fluxo com o fluido ambiente. Esse processo desacelera a corrente, retardando sua propagação em todas as direções. De fato, todos os três processos provocam perda de velocidade que leva a desaceleração da corrente (Pratson et al., 2000).

Concluindo, um modelo numérico de correntes de turbidez para ser completo deve levar em consideração erosão, incorporação de água, deposição, atrito, peso da corrente, pressão do fluido e conservação da energia cinética de turbulência.

1.2. Modelo Físico

Técnicas de visualização e coleta de dados de fluxos têm sido aplicadas não somente pela mecânica dos fluidos, mas também por outras disciplinas como a sedimentologia, disciplina da Geologia. Essas técnicas de visualização consistem basicamente em criar modelos em escala reduzida para simular fisicamente o fluxo desejado. Então, usando esses modelos, são realizados experimentos para coleta de dados e imagem. Considerando que o fluxo em foco nesta pesquisa é a corrente gravitacional, mais precisamente corrente de turbidez, alguns experimentos relatados e estudos previamente elaborados tiveram grande importância para o desenvolvimento deste trabalho.

Em 1995, um modelo físico foi utilizado no estudo dos efeitos de uma topografia induzida por sal na deposição de sedimentos provenientes de correntes de turbidez (Kneller & McCaffrey, 1995). Esse modelo foi feito em escala para simular um fluxo de gravidade transportando areia grossa, e, sua estrutura era composta por um tanque quadrado de 1m x 1m com um canal conectado em uma de suas arestas.

Em 1997, foram realizadas as primeiras medidas detalhadas de velocidades e distribuição de turbulência de correntes de gravidade. Até esta data, todo o conhecimento da dinâmica dessas correntes foram adquiridos principalmente através da visualização de fluxos (Kneller et al., 1997). Para se fazer essas medidas detalhadas, foram realizados experimentos com correntes de densidade salinas, utilizando anemômetro Doppler a laser e um sistema para definir o volume inicial do fluxo, chamado de “*lock-exchange*”, que será melhor explicado no capítulo seguinte.

Poucos anos depois, um novo método de medição foi introduzido para ajudar a registrar velocidades das correntes gravitacionais, o UDVP (“*Ultrasonic Doppler Velocity Profiling*”). Com esse novo equipamento foi possível medir velocidades tanto em fluxos compostos por soluções salinas, quanto em fluxos compostos por soluções com sedimentos (opacos). Dessa forma, permitiu-se provar que a utilização de solução salina, para simular correntes de turbidez de baixa densidade, era uma boa substituta da solução composta por sedimentos (Best et al., 2001).

Com o uso do equipamento de ultra-som UDVP foi possível desenvolver estudos mais avançados na área de correntes de densidade, tal como sua evolução espaço-temporal, que não havia sido feita até 2003. Anteriormente a 2003, todos os estudos referentes à coleta e análise de parâmetros dos fluxos turbulentos, na área de sedimentologia, consistiam numa série de medições ao longo do tempo num ponto específico da corrente. Assim, foram feitas diversas medições de parâmetros em vários pontos distintos de uma série de correntes de turbidez confinadas nominalmente idênticas, permitindo então, uma análise da evolução espaço-temporal de alguns parâmetros, como velocidade destas mesmas correntes (McCafrey et al., 2003, 2005).

Apesar da grande relevância dos trabalhos mencionados acima para esta pesquisa em questão, em nenhum deles pesquisou-se sobre a evolução espaço-temporal da velocidade, ou de qualquer outro parâmetro, das correntes de gravidade propagando sobre uma área plana. Em outras palavras, não é possível analisar como qualquer parâmetro evoluiria ao longo do tempo e do espaço para um fluxo turbulento não-confinado.

Sendo assim, tomando como base a última afirmação e o conhecimento adquirido pelos trabalhos anteriores, foi decidido que seria usado nesta pesquisa o mecanismo de “*lock-exchange*”, um tanque quadrado (1.5m x 1.5m), com um canal conectado a uma de suas arestas, e um equipamento de ultra-som para coletar e armazenar num banco de dados a evolução espaço-temporal de velocidades de correntes de turbidez não-confinadas.

1.3. Modelo Numérico

De acordo com o que foi mencionado anteriormente, um modelo computacional para correntes de turbidez deveria levar em consideração todas as características do fluxo: erosão do leito, absorção de água pelo fluxo, deposição do fluxo, tensões na base, tensões com o fluido ambiente, peso do fluxo, pressão hidrostática do fluido da corrente e conservação da energia cinética de turbulência. Por outro lado, como um dos principais objetivos neste trabalho, conforme será explicado na próxima seção, é validar as mais simples equações capazes de modelar correntes de gravidade com fluxo turbulento, algumas simplificações foram feitas. A seguir, demonstra-se de forma geral as

simplificações adotadas por Waltham no desenvolvimento das principais equações utilizadas neste trabalho (Waltham & Davison, 2001):

$$\frac{\partial T}{\partial t} = -\frac{\partial(Tu)}{\partial x} \quad (1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} = -g' \frac{\partial h}{\partial x} - \frac{Cu|u|}{\rho h} - u \frac{\partial u}{\partial x} \quad (2)$$

$$g' = g \frac{\Delta \rho}{\rho} \quad (3)$$

As equações (1) e (2) foram escritas propositalmente para o fluxo em apenas uma direção, pois facilita suas deduções. Na equação (1) da conservação de fluxo, a taxa de variação da espessura T no tempo depende da velocidade u do fluxo. Esta equação vem da simplificação da forma mais geral da equação de continuidade (4) (Asheson, 1990), que conserva massa em três dimensões espaciais:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -\nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) = -\frac{\partial}{\partial x}(\rho u) - \frac{\partial}{\partial y}(\rho v) - \frac{\partial}{\partial z}(\rho w) \quad (4)$$

onde, ρ é a densidade do fluido, u , v e w são as velocidade do fluxo nas direções x , y e z . Integrando esta equação em z e considerando que a densidade é constante, chegou-se à equação (5), que, para chegar na equação (1) bastou considerar o fluxo em apenas uma direção, x . Na equação (5), \bar{u} e \bar{v} são as velocidade médias em z nas direções x e y , respectivamente.

$$\frac{\partial T}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial x}(T\bar{u}) - \frac{\partial}{\partial y}(T\bar{v}) \quad (5)$$

A equação (2) foi baseada na segunda lei de Newton. Tal lei afirma que a resultante das forças que agem num corpo é igual à taxa de variação do momento linear (quantidade de movimento) do mesmo em relação ao tempo, equação (6).

$$\vec{F} = m\vec{a} \quad (6)$$

Para somatório das forças atuantes num volume de fluido com dimensões l , h e w , respectivamente comprimento, altura e largura, tem-se as forças

resultantes de tensões normais, representadas na figura 1.1 como P_1 e P_2 , e de tensões cisalhantes, representada na figura 1.1 como τ . O somatório destas forças resultam na equação (7). Para calcular a massa desse volume, basta multiplicar seu volume por sua densidade, como mostra a equação (8).

$$F = (P_1 - P_2)hw + \tau wl \quad (7) \quad m = \rho hwl \quad (8)$$

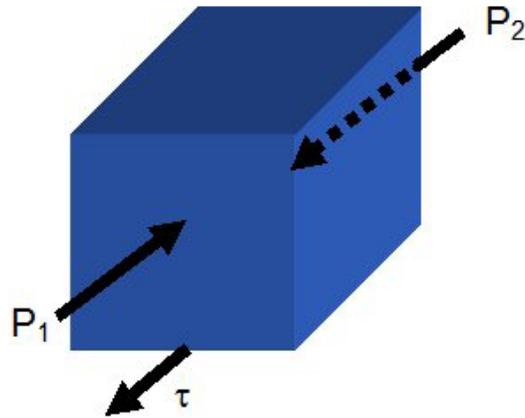


Figura 1.1 – Volume de fluido com dimensões l , h e w

Combinando as equações (6), (7) e (8), obtém-se a equação (9), onde o primeiro termo, $(P_1 - P_2)/l$, conhecido como gradiente de pressão, foi substituído por $-\partial P / \partial x$, como mostra a equação (10):

$$(P_1 - P_2)/l + \tau / h = \rho a \quad (9)$$

$$-\frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\tau}{h} = \rho a \quad (10)$$

Voltando para um fluxo com deslocamento em apenas uma direção, x , foi afirmado que o gradiente de pressão poderia ser escrito de acordo com a equação (11) (Waltham & Davison, 2001). Essa equação teve origem através do cálculo da diferença de pressão no ponto P, ilustrado na figura 1.2, onde h , h_f , h_w , ρ_f , ρ_w e $\Delta\rho$ são respectivamente profundidade do ponto P, altura da coluna de fluido, altura da coluna de fluido ambiente, densidade do fluido, densidade do fluido ambiente e diferença entre as densidades do fluido e do fluido ambiente.

$$\frac{\partial P}{\partial x} = \Delta \rho g \frac{\partial h_f}{\partial x} \quad (11)$$

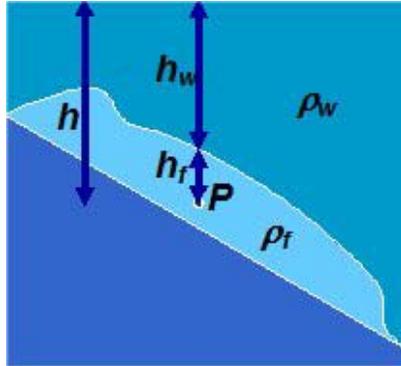


Figura 1.2 – Representação do início do deslocamento de uma corrente de densidade

Outras considerações feitas foram em relação às tensões cisalhantes. Considerou-se que o fluido da corrente era Newtoniano, que as tensões cisalhantes eram proporcionais ao quadrado da velocidade para um fluxo turbulento, e, que para esse mesmo fluxo a dependência das tensões cisalhantes com a sua espessura era desprezível. Então, tendo em vista essas simplificações, chegou-se a equação (12), onde C é um coeficiente de atrito de Chezy, que é proporcional à rugosidade e geometria da superfície de propagação da corrente.

$$\tau = C u |u| \quad (12)$$

A equação (3) da gravidade reduzida, é definida por uma proporção das densidades, onde $\Delta \rho$ é a diferença entre a densidade da água e do fluido e ρ é a densidade do fluido. Dessa forma, substituindo as equações (3), (11) e (12) nos respectivos termos da equação (10), e, adotando um diferencial material ou substancial para a aceleração, exemplificada na equação (13) (Smith, 1985), obtém-se finalmente a equação da velocidade média descrita na equação (2).

$$a = \frac{Dv}{Dt} = \frac{\partial v}{\partial t} + v \frac{\partial v}{\partial x} \quad (13)$$

A equação mais complexa de se resolver numericamente é, sem dúvida, a numero (2). Essa equação é na verdade dividida em três termos: pressão, fricção e advecção, que são respectivamente o primeiro, segundo e terceiro

termos. Com o objetivo de simplificar a equação (2), ou ao menos não torná-la ainda mais complicada de se resolver, foi considerado que a densidade do fluxo turbulento não sofre variação ao longo de sua propagação. Essa simplificação foi baseada na suposição da taxa de sedimentação ser compensada pela taxa de erosão, e, no fato da taxa de incorporação de água pela corrente não ser muito relevante.

O trabalho desenvolvido nesta pesquisa tem como objetivo primordial provar que as aproximações matemáticas feitas com relação à densidade das correntes de turbidez, não comprometerão a qualidade e precisão do modelo numérico. Sendo assim, será gerado um algoritmo rápido e eficiente para modelagem e análise de correntes de turbidez.

1.4. Objetivos da Pesquisa

O principal objetivo neste trabalho é validar o uso da equação de velocidade média, escrita por Dr. Waltham, na modelagem de correntes de turbidez, equação (2). Para alcançar tal objetivo, uma metodologia empírica foi usada, a qual consiste em comparar os resultados da simulação numérica com os da simulação física. Para simulação numérica foi desenvolvido um sistema computacional, utilizando diferenças finitas para resolver as equações citadas acima, enquanto que para simulação física, foram realizados experimentos usando um tanque específico chamado "*T-tank*", ou tanque T. Após executadas as simulações, os dados provenientes de ambas foram comparados um com o outro, para averiguar o quão precisas eram as equações. Nos próximos capítulos, a importância de cada simulação será explicada em mais detalhes.