UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO ESCOLA POLITÉCNICA

LUCAS MARTINS PION

LAMA FLUIDA E FUNDO NÁUTICO – CONCEITO E APLICAÇÃO NO COMPLEXO PORTUÁRIO DE ITAJAÍ, SC

> São Paulo 2017

LUCAS MARTINS PION

## LAMA FLUIDA E FUNDO NÁUTICO – CONCEITO E APLICAÇÃO NO COMPLEXO PORTUÁRIO DE ITAJAÍ, SC

Dissertação apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para a obtenção do título de mestre em ciências

Área de Concentração: Obras Hidráulicas

Orientador: Prof. Dr. Paolo Alfredini

Este exemplar foi revisado e corrigido en responsabilidade única do autor e com a	n relação à versão original, sob anuência de seu orientador.
São Paulo, de	de
Assinatura do autor:	
Assinatura do orientador:	

Catalogação-na-publicação

Pion, Lucas Martins Lama Fluida e Fundo Náutico - Conceito e Aplicação no Complexo Portuário de Itajaí, SC / L. M. Pion -- versão corr. -- São Paulo, 2017. 86 p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Hidráulica e Ambiental.

1.Lama Fluida 2.Hidráulica Marítima 3.Simulação [Modelagem] 4.Navegação Costeira I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Hidráulica e Ambiental II.t.

Dedico este trabalho Aos meus pais, Oscar e Heloísa À memória de meu avô, José Augusto Martins

#### AGRADECIMENTOS

Primeiramente, efusivamente agradeço ao meu orientador Prof. Dr. Paolo Alfredini pela dedicação, ajuda e ensinamentos transmitidos, não só durante o desenvolvimento do meu trabalho, mas também no dia a dia. Seu empenho me fez, sem dúvida alguma, redefinir o meu conceito de orientador. Que sua paixão pela sua área de atuação e pesquisa venha a inspirar muitos outros alunos, neste ramo da engenharia atualmente tão carente de bons profissionais.

Ao Prof. Dr. João Carvalho, da UNIVALI, e ao Ronildo Carvalho, da ALCOA, agradeço pela cessão dos dados utilizados durante este trabalho, sem os quais seria impossível o desenvolvimento desta pesquisa.

Agradeço, também, aos meus pais Oscar e Heloísa, pela dedicação, suporte, apoio, carinho e paciência, que nunca serei capaz de retribuir e sem os quais este trabalho jamais existiria. Gostaria de agradecer, também, à minha irmã Sara, com quem dividi a maior parte da minha vida, inclusive na Escola Politécnica, as alegrias e frustrações. Às minhas avós, Mercedes e Ruth, meu eterno agradecimento pela ternura, pela paciência e pelo grande suporte sempre que necessário.

Ao Prof. Dr. José Augusto Martins, o vovô Martins, gostaria de expressar o meu desejo de que a incerteza sobre o nosso futuro após a vida terrena tenha propiciado a apreciação deste trabalho, cujo conteúdo, infelizmente, não pode passar por sua implacável revisão. Deixo aqui meus sinceros agradecimentos pelos ensinamentos e pela oportunidade de ter desfrutado de sua inesquecível companhia.

Gostaria de agradecer, também, ao Prof. Dr. Clóvis de Arruda Martins, meu padrinho, pelo exemplo, pelo incentivo ao desenvolvimento de atividades intelectuais e pelos conselhos, que confesso hoje me arrepender de não ter seguido alguns mais cedo.

Aos meus companheiros de FCTH, tanto aos contemporâneos como aos que já não participam, gostaria de agradecer pelo aprendizado e excelente convivência diários, que ajudam a tornar as atividades acadêmicas e profissionais enriquecedoras e, igualmente, agradáveis e prazerosas.

Por fim, mas não menos importante, gostaria de agradecer aos meus fiéis amigos, os irmãos que escolhi, Guilherme Carvalho, Marcelo Martinelli, Victor Maimoni, Bianca Dermendjian, Tatiana Ordine, Fernanda Lotto, Eduardo Franchi, Giorgia Fernandes, Paulo Campos e Leonardo Silveira pela compreensão, pelos conselhos e pelo companheirismo, sempre fundamentais na minha caminhada.

#### RESUMO

PION, L. M. Lama Fluida e Fundo Náutico – Conceito e Aplicação no Complexo Portuário de Itajaí, SC. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2017.

No contexto da necessidade de atracação de embarcações de maior porte em terminais portuários brasileiros, tanto privativos como públicos, considerando um aumento das exportações, intervenções de engenharia que possam significar ganhos nas dimensões das máximas embarcações permitidas podem representar substanciosos benefícios econômicos. Assim, este trabalho apresenta uma abordagem do conceito de Fundo Náutico, definido como profundidade até a qual as embarcações podem navegar sem que haja efeitos adversos na manobrabilidade das embarcações e danos no casco do navio, cujo objetivo é aumentar o calado máximo de embarcações em espaços náuticos cujo fundo apresente camadas de lama fluida. Devido às suas características reológicas, a lama fluida, de modo geral, permite que as embarcações naveguem com reduzida ou até negativa folga sob a quilha, respeitando-se o conceito estabelecido pelo Fundo Náutico. Exposta a importância sobre este conceito e suas peculiaridades relacionadas às características da lama fluida, como características reológicas e métodos para sua determinação, discutem-se as variações na espessura da camada de lama fluida e as variáveis ambientais que as condicionam, a partir de análise de levantamentos batimétricos de dupla frequência, dados densimétricos e aplicação de modelagem numérica, para a região da bacia de evolução do Complexo Portuário de Itajaí. Para esta região, observaram-se camadas de lama fluida entre 0,5 e 2,5 m, sendo que os resultados obtidos na modelagem indicam que esta variabilidade está associada ao regime de descarga sólida do rio Itajaí-açu. Além disto, a partir de uma análise comparativa entre os dados batimétricos e densimétricos, foi possível estabelecer que o fundo náutico na região pode estar associado a um valor de massa específica entre 1150 e 1200 kg/m3.

Palavras-chave: Hidráulica Estuarina; Navegação; Modelagem Numérica

#### ABSTRACT

PION, L. M. Fluid Mud and Nautical Bottom – Definition and Application at Itajaí Port Complex, SC. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2017.

Considering the demand for mooring larger ships at Brazilian port terminals, both private and public, in a scenario of growing exports, engineering interventions that can provide improvements in the vessel's maximum allowed dimensions can represent significant profits. Hence, this work presents an approach of Nautical Bottom, defined as the maximum depth in which ships can navigate without significant adverse effects in ship control and maneuverability without physical damage, with the goal of raising the maximum ship draft allowed in nautical spaces with fluid mud beds. Due to its rheological properties, fluid mud, in general, allows for vessels navigate with low or negative under keel clearance, respecting the established Nautical Bottom concepts. Once highlighted the importance of these concepts, this study presents an analysis about fluid mud and Nautical Bottom concept analysis at Itajaí Port Complex (Santa Catarina, Brazil), one of the most important port areas in Brazil. This analysis was based on bathymetric surveys, density measurements and numerical modeling. In addition, fluid mud layer thickness at port areas can possibly vary according to hydrodynamics and sedimentologic variations. Fluid mud layer thickness varies from 0.5 to 2.5 meters at Itajai Port Complex turning basin. From numerical modeling results, it is possible to establish that the thickness variations of fluid mud layers are associated with fluvial sediment transport rates. Also, from the comparison between low frequencies bathymetric surveys and specific density measurements, it was possible to conclude that the reference specific density at the interest area is about 1150-1200 kg/m<sup>3</sup>, being very similar to reference densities adopted worldwide.

Keywords: Estuarine Hydraulics; Navigation; Numerical Modeling

## LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 - Variação de massa específica ao longo da coluna d'água. Fonte: Schettini et al., 2010 -	6
Figura 3.2 – Transição Reológica. Fonte: PIANC, 2014	8
Figura 3.3 - Tixotropia. Fonte: PIANC, 2014	9
Figura 3.4 - Localização - Terminal Alumar - Visão Geral - Baía de São Marcos	. 15
Figura 3.5 - Localização - Terminal Alumar - Visão detalhada	. 15
Figura 3.6 – Espessura da camada de lama fluida na Bacia de Evolução do Terminal da Alumar.	
Fonte: INPH, 1986	. 16
Figura 3.7 – Levantamento Densimétrico – Bacia de Evolução do Terminal da Alumar – Maio/2014.	. 17
Figura 3.8 - Superfície Comparativa - Berço Alumar - Agosto/13	. 17
Figura 3.9 - Localização - Porto de Santos e Canal de Piaçaguera	. 18
Figura 3.10 – Levantamentos batimétricos de dupla frequência – Canal Acesso ao Porto de Santos	; —
Espessura da Camada de Lama Fluida	. 19
Figura 3.11 – Superfície Comparativa – Canal de Piaçaguera (dezembro/2012)	. 19
Figura 3.12 - Localização - Baía de Paranaguá	. 20
Figura 3.13 – Camada de lama fluida – Baía de Paranaguá	. 21
Figura 3.14 - Barra Norte do Rio Amazonas	. 21
Figura 3.15 – Variação Sazonal da Camada de Lama Fluida – Barra Norte do Rio Amazonas. Fonte	e:
Kineke & Sternberg, 1995	. 22
Figura 4.1 – Complexo Portuário de Itajaí – Localização (1)	. 23
Figura 4.2 – Complexo Portuário de Itajaí – Localização (2)	. 24
Figura 4.3 – Canal de Acesso e Bacia de Evolução – Complexo Portuário de Itajaí	. 25
Figura 4.4 - Estuário do Itajaí-açu – Trechos. Fonte: Alfredini & Arasaki., 2014	. 26
Figura 4.5 - Constantes Harmônicas - Porto de Itajaí. Fonte: FEMAR, 2016	. 28
Figura 5.1 - Exemplo de levantamento batimétrico utilizado	. 32
Figura 5.2 - Localização - Ponto de medição de vazões e MPS – Indaial (Fonte: Google Earth, em.	. 34
Figura 5.3 - Exemplo de Perfil Densimétrico	. 35
Figura 5.4 - Mapeamento do espaço - Grade computacional. Fonte: Deltares, 2014	. 38
Figura 5.5 - Exemplo de um grid tipo σ. Fonte: Deltares, 2014	. 39
Figura 5.6 - Definição de nível d'água, profundidade abaixo do nível de referência e profundidade	
total. Fonte: Deltares, 2014	. 39
Figura 5.7 – Perfil longitudinal de salinidade ao longo do estuário do rio Itajaí-açu com descarga flu	vial
de 233 m³/s. Fonte: Schettini, 2002.	. 46
Figura 5.8 – Grade computacional – Visão Geral	. 47
Figura 5.9 – Grade Computacional – Área de interesse	. 47
Figura 5.10 - Batimetria utilizada no modelo computacional	. 48
Figura 5.11 – Calibração – Nível d'água – Porto de Itajaí. Linha Azul: Modelo; Linha Vermelha: TP>	<b>(</b> 0.
	. 51

Figura 5.12 – Localização ADCP – Píer CEPSUL	. 52
Figura 5.13 – Comparação - Velocidade de Corrente Modelada X Medições - Píer CEPSUL	. 53
Figura 5.14 - Localização - Ponto de extração dos dados de vento NCEP/NCAR	. 54
Figura 5.15- Comparação – Efeitos do Vento no Escoamento. Vermelho: Com vento. Azul: Sem ve	nto
	. 54
Figura 5.16 - Perfil longitudinal para avaliação da intrusão salina	. 55
Figura 5.17 - Intrusão Salina - 200 m³/s - Resultado modelado	. 56
Figura 5.18 - Perfil longitudinal de concentração de material em suspensão (mg/L) ao longo do	
estuário do rio Itajaí-açu com descarga fluvial de 233 m³/s. Fonte: Schettini, 2002	. 57
Figura 5.19 – Localização – Pontos na Bacia de Evolução	. 57
Figura 5.20 – Concentração de material em suspensão modelada na camada de fundo (kg/m³)	. 58
Figura 5.21 – Concentração de material em suspensão modelada na camada superficial (kg/m³)	. 58
Figura 6.1 - Superfície Comparativa - 30/03/2007	. 60
Figura 6.2 - Superfície Comparativa - 15/05/2007	. 61
Figura 6.3 - Superfície Comparativa - 12/07/2007	. 61
Figura 6.4 - Superfície Comparativa - 05/11/2007	. 62
Figura 6.5 - Correlação entre cotas - Maio/2007	. 64
Figura 6.6 - Correlação entre cotas - Julho/2007	. 64
Figura 6.7 - Correlação entre cotas – Novembro/2007	. 65
Figura 6.8 – Seção Transversal para Avaliação do Transporte de Sedimentos	. 66
Figura 6.9 – Transporte de Sedimentos Acumulado (2007)	. 68
Figura 6.10 – Variação do Nível d'água e Concentração Média de Material em Suspensão na Bacia	ł
de Evolução do Complexo Portuário de Itajaí	. 69
Figura 6.11 - Variação da Vazão Líquida Afluente e Concentração Média de Material em Suspensã	0
na Bacia de Evolução do Complexo Portuário de Itajaí	. 70
Figura 6.12 - Variação da Vazão Sólida Afluente e Concentração Média de Material em Suspensão	) na
Bacia de Evolução do Complexo Portuário de Itajaí	. 70
Figura 6.13 - Vazão Sólida e Concentração de Material em Suspensão - Março/2007	. 72
Figura 6.14 - Vazão Sólida e Concentração de Material em Suspensão - Maio/2007	. 72
Figura 6.15 - Vazão Sólida e Concentração de Material em Suspensão - Julho/2007	. 73
Figura 6.16 - Vazão Sólida e Concentração de Material em Suspensão - Novembro/2007	. 73

## LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 – Vazões do Rio Itajaí-açu no ano de 2007	27
Tabela 4.2 – Componentes Harmônicas – Porto de Itajaí - IHO	29
Tabela 5.1 - Localização - Ponto de medição de vazões e MPS - Indaial	34
Tabela 5.2 – Parâmetros – Modelo de Transporte de Sedimentos	50
Tabela 5.3 – Média das velocidades de correntes no estuário do rio Itajaí-açu, próximo ao píer do	
CEPSUL, entre os anos de 2006 e 2012. Fonte: Centro de Ciências Tecnológicas da Terra e do	0
Mar, 2012	52
Tabela 6.1 - Valores de R <sup>2</sup> obtidos a partir da correlação entre as profundidades encontradas no	
levantamento batimétrico de 33kHz e as profundidades correspondentes às massas específicas	s
de 1150, 1200 e 1250 kg/m³	63
Tabela 6.2 – Histórico de Dragagens no Porto de Itajaí. Fonte: ANTAQ, 2016	67
Tabela 6.3 – Volumes Aportados Entre Batimetrias – Resultados de Modelo	68

# SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	. 1
2.	OBJETIVOS	. 4
2.1.	OBJETIVOS GERAIS	4
2.2.	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	4
3.	CONSIDERAÇÕES SOBRE LAMA FLUIDA	. 5
3.1.	DEFINIÇÃO	5
3.2.	LAMA FLUIDA E FUNDO NÁUTICO	7
3.3. FLUI	FATORES QUE PROPICIAM A FORMAÇÃO DA CAMADA DE LAMA DA	13
3.4. BRA	LAMA FLUIDA EM REGIÕES PORTUÁRIAS ESTUARINAS SILEIRAS	14
4.	CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	23
4.1.	COMPLEXO PORTUÁRIO DE ITAJAÍ	23
4.2.	CARACTERIZAÇÃO AMBIENTAL	25
5.	O MÉTODO	32

5.1.	DADOS UTILIZADOS	32
5.1.1	. Levantamentos Batimétricos	32
5.1.2	. Dados de vazão líquida e material particulado em suspensão	33
5.1.3	Perfis densimétricos	34
5.2.	MODELAGEM NUMÉRICA	36
5.2.1	O Modelo Delft3D®	36
5.2.2	. Descrição do modelo e parâmetros utilizados	45
5.2.3	. Calibração do modelo	50
6.	RESULTADOS	60
6.1.	SUPERFÍCIES COMPARATIVAS	60
6.2.	PERFIS DE MASSA ESPECÍFICA	63
6.3.	MODELAGEM NUMÉRICA	65
6.3.1	. Estimativa de volumes de dragagem realizada	65
6.3.2	. Padrões hidrossedimentológicos	69
7.	ANÁLISES E DISCUSSÕES	75
8.	CONSIDERAÇÕES FINAIS E CONCLUSÕES	77
9.	PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS	80
10.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	82

## 1. INTRODUÇÃO

Regiões estuarinas são áreas geralmente propícias para o desenvolvimento de atividades portuárias em função de sua localização privilegiada, abrigada em relação à incidência de ondas. Além disto, a presença comum de profundidades naturais elevadas favorece a implantação de terminais portuários, em função de necessidades relativamente baixas de procedimentos de dragagem.

Nestas áreas ocorre a interação entre a água doce proveniente dos rios e a água salgada de origem oceânica, condicionando o favorecimento ao depósito de sedimentos finos no fundo. As propriedades físico-químicas da água salobra provocam a atração entre os grãos, sendo que estes formam flocos maiores, que tendem a se depositar com maior facilidade. Este acúmulo sedimentar junto ao fundo pode, por sua vez, interferir nas operações portuárias, podendo ser determinante para os procedimentos de dragagem nos espaços náuticos.

O processo de depósito de sedimentos finos no fundo apresenta diversas etapas até que o material se consolide no fundo. Uma destas etapas consiste na formação de uma solução aquosa de elevada concentração de sedimentos finos em suspensão, próxima ao fundo consolidado, que ainda não se depositou, pois as ligações químicas entre as partículas ainda não são fortes o suficiente para formar grandes flocos de mobilidade reduzida.

Esta solução aquosa é chamada de lama fluida e apresenta propriedades reológicas que possibilitam a navegação com baixa folga sob a quilha, ou até folga sob a quilha negativa, nestas regiões. As propriedades da lama fluida estão associadas ao conceito de Fundo Náutico (PIANC, 2014), definido como a profundidade máxima em que se pode navegar sem que haja efeitos significativamente adversos no controle e manobrabilidade dos navios e, também, não ocorram danos aos cascos das embarcações.

A navegação em lama fluida pode possibilitar uma redução significativa de volumes de dragagem. Regiões em que o fundo é composto predominantemente por materiais finos, como argila ou silte, as dragas de sucção tendem a não apresentar o mesmo rendimento que quando atuam em fundos arenosos. Já a dragagem realizada por injeção de água, geralmente utilizada em áreas com fundos lamosos, pode facilitar a dispersão do sedimento de fundo, mas apresenta reduzida capacidade de aprofundamento do fundo. Deste modo, a possibilidade de navegação segura com menor folga sob a quilha, ou até mesmo folga negativa sob a quilha, pode reduzir as profundidades de gabarito e, consequentemente os volumes de dragagem.

Na região do porto de Zeebrugge (Bélgica), onde há camadas de lama fluida de até aproximadamente 5 metros em profundidades críticas para a navegação, a recomposição do fundo lamoso se dá de maneira tão intensa que a operação das dragas é incapaz de manter as cotas de gabarito. Nesta região, desenvolveu-se um complexo estudo multidisciplinar, em que a definição de fundo náutico considerando a navegação em lama fluida reduziu significativamente os volumes de dragagem.

Elegeu-se como estudo de caso para a avaliação de camada de lama fluida o estuário do rio Itajaí-açu, localizado no Estado de Santa Catarina, Brasil, que abriga o segundo maior complexo portuário do país em exportação de contêineres, o Complexo Portuário de Itajaí. As características do sedimento disponível e as condicionantes hidrodinâmicas da região favorecem a formação de camadas de lama fluida junto ao fundo, principalmente na bacia de evolução deste complexo portuário, ocorre alargamento da seção transversal em que um e. consequentemente, uma diminuição nas velocidades do escoamento.

Nesta região, devido às características do fundo, predominantemente composto por sedimentos finos, a dragagem é feita com operação tipo jato d'água, para ressuspensão e transporte deste material para a região oceânica por correntes de densidade. Deste modo, destaca-se a navegação em lama fluida como possibilidade de redução da atuação das dragas e, consequentemente, de custo.

Além da região do Complexo Portuário de Itajaí, diversas regiões portuárias brasileiras apresentam a possibilidade da aplicação do conceito de fundo náutico, devido à presença de camada de lama fluida junto ao fundo, como o Terminal da Alumar (Baía de São Marcos, Maranhão), o Porto de Santos (São Paulo) e os Portos de Paranaguá e Antonina (Paraná).

Neste contexto, apresenta-se uma revisão bibliográfica sobre o conceito de Fundo Náutico e sua aplicabilidade em regiões cujo fundo apresenta camadas de lama fluida, bem como a apresentação de regiões portuárias brasileiras em que há a possibilidade de aplicação deste conceito. Além disto, à luz destes conceitos, apresenta-se a análise das variações sazonais da camada de lama fluida da bacia de evolução do Complexo Portuário de Itajaí, com base em levantamentos de campo e modelagem numérica do transporte de sedimentos.

#### 2. OBJETIVOS

#### 2.1. OBJETIVOS GERAIS

Definição e caracterização do conceito de fundo náutico em regiões que apresentem camadas de lama fluida junto ao fundo.

Avaliação e caracterização dos principais condicionantes hidrossedimentológicos para formação e alterações de espessura da camada de lama fluida na bacia de evolução do Complexo Portuário de Itajaí, a partir da análise de dados de campo e do auxílio de modelagem numérica de transporte de sedimentos coesivos.

#### 2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Como objetivos específicos deste trabalho, podem ser citados:

- Análise de batimetrias de dupla frequência e densimetrias na bacia de evolução do Complexo Portuário de Itajaí (SC)
- Análise de dados de vazão e material particulado em suspensão medidos nas proximidades de Indaial (SC), a fim de avaliar suas implicações na evolução da camada de lama fluida na bacia de evolução dos portos de Itajaí e Navegantes.
- Análise de dados de densimetria, coletados na bacia de evolução do Complexo Portuário de Itajaí.
- Calibração e aplicação de um modelo numérico hidrodinâmico e de transporte de sedimentos para a região da bacia de evolução do Complexo Portuário de Itajaí, a partir de dados medidos em campo e dados disponíveis em bibliografia.

#### 3. CONSIDERAÇÕES SOBRE LAMA FLUIDA

#### 3.1. DEFINIÇÃO

Segundo Wurpts et al. (2005), a camada de lama fluida pode ser definida como uma suspensão de alta concentração com baixa densidade de sedimentos finos que apresentam pouca tendência a se consolidar no fundo. Esta suspensão geralmente se forma próxima ao fundo de lagos e estuários, ou em quaisquer corpos d'água que apresentem disponibilidade suficiente de sedimentos finos e períodos em que o fluxo tenha intensidade suficientemente baixa (MCANALLY, F.ASCE, *et al.*, 2007).

A camada de lama fluida não é considerada parte do fundo consolidado dos corpos d'água por não apresentar resistência mecânica, podendo ser móvel ou estacionária logo acima do fundo consolidado (KINEKE e STERNBERG, 1995). Esta camada pode ser formada pela liquefação de fundos lamosos pela ação hidrodinâmica ou quando a taxa de aporte de sedimentos finos é superior à taxa de consolidação dos mesmos no fundo (KRANENBURG e WINTERWERP, 1997). Em estuários, é comum a formação de camadas de lama fluida nas proximidades da zona de turbidez máxima (MCANALLY, F.ASCE, *et al.*, 2007).

A composição das camadas de lama fluida apresenta predominância de argilas (50 a 70%), sendo o restante geralmente composto por siltes e matéria orgânica. Em ambientes naturalmente energéticos, como estuários, a porcentagem de matéria orgânica tende a ser de no máximo 2% (MCANALLY, F.ASCE, *et al.*, 2007). A concentração de sedimentos em suspensão pode variar entre 10.000 e 100.000 mg/L, dependendo de sua composição (SEIFERT, 2010), sendo que esta pode influenciar significativamente em seu comportamento (DELEFORTRIE, 2007). A massa específica da camada de lama fluida geralmente apresenta valores entre aproximadamente 1080 kg/m<sup>3</sup> e 1200 kg/m<sup>3</sup> (MCANALLY, F.ASCE, *et al.*, 2007), sendo variável conforme as características locais dos sedimentos finos disponíveis.

A presença de lama fluida junto ao fundo é caracterizada por uma variação brusca no gradiente de massa específica ao longo da coluna d'água, chamada de lutoclina (MEHTA, M.ASCE, *et al.*, 2014), conforme exemplificado na Figura 3.1, que

6

apresenta a variação de massa específica ao longo da coluna d'água na Baía de Tijucas (SC) (SCHETTINI, ALMEIDA, *et al.*, 2010).



Figura 3.1 - Variação de massa específica ao longo da coluna d'água. Fonte: Schettini et al., 2010

A ocorrência de camadas de lama fluida é comum, sendo encontradas em diversas localizações e podendo representar problemas críticos para a navegação. Em algumas regiões portuárias, o acúmulo de lama fluida pode ocorrer de maneira tão rápida que supera a capacidade das dragas disponíveis de manterem os espaços náuticos nas cotas desejáveis (MCANALLY, F.ASCE, *et al.*, 2007). Na região do Porto de Zeebrugge (Bélgica), são encontradas camadas de lama fluida que podem atingir até 5 metros de espessura, em cotas críticas para a navegação, mesmo com dragagem praticamente constante (MARTENS, DELGADO, *et al.*, 2012).

#### 3.2. LAMA FLUIDA E FUNDO NÁUTICO

Fundo náutico é definido como o nível em que as características físicas do fundo apresentam um limite crítico a partir do qual o contato com a quilha das embarcações pode causar danos físicos ou efeitos inaceitáveis no controle e manobrabilidade das embarcações (PIANC, 2014). Devido às propriedades físicas da lama fluida, em áreas que apresentam fundos lamosos, este conceito pode ser empregado como o nível em que a camada navegável de lama fluida termina e o fundo consolidado não navegável começa (PIANC, 2014).

A massa específica da camada de lama fluida é uma função da relação entre água e material sólido presente em sua mistura, dada por (DELEFORTRIE, 2007):

$$\rho_m = \rho_w (1 - \varphi) + \rho_s \varphi = \rho_w (1 - \varphi) + T_s$$

Onde:

- *ρ<sub>m</sub>*: Massa específica da lama;
- *ρ<sub>w</sub>*: Massa específica da água;
- φ: Fração sólida em volume;
- *ρ<sub>s</sub>*: Massa específica seca do material sólido;
- *T<sub>s</sub>*: Concentração de material sólido.

Conforme a Figura 3.2, a partir de um aumento da concentração de material sólido em suspensão, e consequentemente um aumento da massa específica da mistura, ocorre um aumento na rigidez inicial necessária para mobilizar a lama. A partir de um determinado valor de concentração, é observada uma alteração no comportamento da mistura, sendo que a rigidez inicial ao movimento passa a aumentar mais significativamente a partir de um pequeno aumento na concentração de material. Esta alteração no padrão de comportamento da lama fluida é chamada de transição reológica, em que a lama deixa de apresentar comportamento semelhante à água e passa a apresentar comportamento de solo consolidado (MALHERBE, 1990). A massa específica em que ocorre esta transição é chamada de massa específica crítica, a partir da qual o fundo não é mais navegável com segurança (PIANC, 2014). Este valor de massa específica é geralmente associado ao fundo náutico (DELEFORTRIE, 2007).



Figura 3.2 – Transição Reológica. Fonte: PIANC, 2014

Outra propriedade da lama fluida que pode ser associada à navegação é sua tixotropia. Materiais tixotrópicos são materiais que, além de sofrer fluidização a partir de esforços externos de cisalhamento, retomam sua rigidez após um período de recuperação, que é típico de cada substância (WURPTS e TORN, 2005). Caso a lama fluida seja submetida a um esforço anterior ao término do período de recuperação, por exemplo, a passagem de uma embarcação, o esforço de cisalhamento necessário para o escoamento do material será inferior ao esforço inicial necessário para rompê-lo (DELEFORTRIE, 2007).

A Figura 3.3 apresenta um exemplo ilustrativo do comportamento tixotrópico da lama fluida, descrito pela curva vermelha. No caso deste material, a taxa de deformação por variação da tensão de cisalhamento aplicada não é constante e diminui conforme se aumenta esta tensão, sendo que a lama apresenta comportamento de um líquido após solicitações superiores à tensão de escoamento. Considerando-se um ciclo de aplicação, aumento e redução de uma tensão cisalhante no material,

pode-se verificar que, após o rompimento da estrutura original, quando a tensão é reduzida, uma mesma tensão de cisalhamento aplicada causa maiores deformações. Deste modo, destaca-se que a resistência da camada de lama fluida é, também, função do histórico de tensões às quais ela foi submetida. (PIANC, 2014).



Figura 3.3 - Tixotropia. Fonte: PIANC, 2014

Este conjunto de propriedades reológicas é responsável pela possibilidade de navegação segura em lama fluida. A definição exata do fundo náutico é possível apenas por meio do estudo de suas propriedades reológicas. No entanto, estas propriedades estão associadas a um complexo conjunto de parâmetros, incluindo hidrodinâmica e forças eletrostáticas, interações entre partículas, viscosidade, viscoelasticidade, tamanho e forma das partículas, sendo que este conjunto de parâmetros é de difícil determinação, geralmente sendo analisado em ensaios de laboratório, que não representam as condições reais (CLAEYS, 2006).

Assim, são utilizados alguns métodos de levantamento realizados em campo para estimar de maneira confiável o fundo náutico (PIANC, 2014). Este pode ser estimado

por meio da utilização de ecobatímetros de dupla frequência, que operam simultaneamente em altas (200 kHz) e baixas (10 – 33 kHz) frequências. Os sinais de alta frequência refletem na interface entre a água e a lama fluida enquanto os sinais de baixa frequência refletem no fundo consolidado (MEHTA, M.ASCE, *et al.*, 2014). Este efeito ocorre, pois os ecobatímetros detectam elevados gradientes de densidade, como ocorre nas interfaces entre a água e a lama fluida e entre a lama fluida e o fundo consolidado (MCANALLY, F.ASCE, *et al.*, 2007).

No entanto, existe a possibilidade de reflexão de bolhas de gás, horizontes de areia ou quaisquer diferentes gradientes de densidade que não caracterizem necessariamente a camada de lama fluida (PIANC, 2014). Além disto, descobriu-se que, em alguns casos, as estimativas do fundo náutico por meio de ecobatímetros é excessivamente conservadora, podendo representar, por exemplo, custos adicionais relativos à dragagem (MCANALLY, F.ASCE, *et al.*, 2007).

Além dos ecobatímetros, a estimativa do fundo náutico pode ser baseada na medição da massa específica do fundo lamoso *in situ*. A maior parte das regiões portuárias que utilizam o conceito de fundo náutico utilizam critérios relativos à massa específica da lama fluida (PIANC, 2014). A massa específica da camada de lama fluida pode ser medida por métodos acústicos, eletromagnéticos, resistividade elétrica, ópticos e radioativos (MCANALLY, F.ASCE, *et al.*, 2007). Podem ser utilizados equipamentos fixos em embarcações, no caso de medições por impedância acústica, ou perfiladores (CLAEYS, 2006).

A definição do fundo náutico baseada somente na densidade da lama também apresenta suas limitações. Devido às características variáveis dos sedimentos disponíveis em diferentes localizações, não é possível estabelecer um valor universal de densidade para o fundo náutico. Além disto, o padrão de transporte sedimentar pode ser alterado conforme fatores sazonais, interferindo nas características do fundo e podendo alterar a densidade crítica (PIANC, 2014). Outra limitação está associada ao fato de as medições de densidade serem efetuadas pontualmente, não apresentando um mapeamento integrado contínuo com resolução suficiente (PIANC, 2014).

Como o conceito de fundo náutico está associado diretamente à transição reológica do fundo lamoso, a maneira conceitualmente mais adequada para a sua determinação é o monitoramento *in situ* das respostas do fundo à aplicação de tensões de cisalhamento (DELEFORTRIE, 2007). No entanto, estes levantamentos apresentam elevada complexidade de realização *in situ*, de modo que não dispõem da praticidade necessária para monitoramento constante do fundo náutico e, assim, raramente são utilizados (PIANC, 2014).

Frente às dificuldades envolvidas, nas regiões portuárias em que o conceito do fundo náutico é aplicado geralmente utiliza-se uma composição de ensaios, envolvendo levantamentos batimétricos, medições reológicas e medições de massa específica para que haja um mapeamento suficientemente detalhado das condições do fundo lamoso (DELEFORTRIE, 2007). A maior parte dos critérios de fundo náutico utilizados no mundo são baseados em valores de massa específica de referência, definidos com base em ensaios reológicos, e levantamentos batimétricos de dupla frequência (PIANC, 2014). No caso do Porto de Zeebrugge (Bélgica) são utilizadas cartas náuticas contendo os levantamentos batimétricos de baixa e alta frequência e levantamentos diferenciais, ilustrando a diferença entre a batimetria de alta frequência e a massa específica de referência – 1200 kg/m<sup>3</sup> (DELEFORTRIE, 2007).

Além dos aspectos físicos da camada de lama fluida, é importante que sejam verificados os efeitos no controle e na manobrabilidade da embarcação quando esta navega com a quilha próxima ao fundo, ou até mesmo penetrando na camada de lama fluida. A segurança da navegação depende não só das características do fundo, como também de outros parâmetros, como grau de treinamento e experiência da praticagem local, disponibilidade de rebocadores, condições ambientais locais e questões econômicas (PIANC, 2014).

As principais interações que podem alterar o comportamento das embarcações quando navegando em lama fluida são, primeiramente, o contato da quilha da embarcação diretamente com a camada lamosa e, em caso da inexistência deste contato, a formação de ondulações na interface entre a água e a lama fluida causadas pela passagem da embarcação (VANTORRE, LAFORCE e DELEFORTRIE, 2006).

Considerando uma situação de fundo rígido, quanto menor a folga sob a quilha, maior o efeito adverso em função da queda de eficiência do propulsor das embarcações (PIANC, 2014). No caso de fundos lamosos, este efeito é ainda mais significativo, pois as ondulações geradas no fundo devido à passagem da embarcação perturbam a ação do propulsor e do leme e, consequentemente, aumentam seu raio mínimo de giro (DELEFORTRIE, 2007). No entanto, observou-se que nas embarcações navegando com folga negativa sob a quilha, ou seja, com a quilha penetrando na camada de lama fluida, este efeito é reduzido e as embarcações, consequentemente, apresentam comportamento mais aceitável (PIANC, 2014).

Dado o complexo conjunto de disciplinas envolvidas, para a definição adequada do fundo náutico, deve ser realizado um amplo estudo interdisciplinar, desde aspectos relativos às características do fundo lamoso e suas variações sazonais, até aspectos relativos às manobras nas regiões de interesse. O Flanders Hydraulics Institute desenvolveu, com suporte da Universidade de Ghent, um extenso trabalho para determinação do fundo náutico no Porto de Zeebrugge.

Este trabalho foi iniciado com a avaliação das propriedades do fundo local, bem como suas variações. Procedeu-se então ao estudo em modelos físicos reduzidos dos efeitos que a camada de lama fluida poderia causar nas embarcações. Foram realizados centenas de ensaios, considerando diferentes cenários de folga sob a quilha e fundo com diferentes características. A partir destes ensaios, foram realizadas simulações em modelos numéricos de manobra, tanto *fast-time* como *real-time*, desenvolvidos com base no comportamento das embarcações observados em modelo físico. Todo este conjunto de análises resultou no aumento do valor da densidade de referência do Porto de 1150 kg/m<sup>3</sup> para 1200 kg/m<sup>3</sup>, reduzindo significativamente os volumes de dragagem nesta região (DELEFORTRIE *et al.*, 2007; DELEFORTRIE, G.; VANTORRE, M.; ELOOT, K.; VERWILIGEN, J.; LATAIRE, E., 2010; VANTORRE; LAFORCE; DELEFORTRIE, 2006). Este estudo de modelagem híbrida representou o estado da arte no que tange à determinação do fundo náutico, abrangendo por completo a interdisciplinaridade envolvida.

## 3.3. FATORES QUE PROPICIAM A FORMAÇÃO DA CAMADA DE LAMA FLUIDA

A previsão do transporte sedimentar e seus efeitos nas variações morfológicas do fundo é de fundamental importância para regiões portuárias, em função de sua influência na manutenção das cotas de gabarito de canais de acesso, bacias de evolução e berços de atracação por meio de dragagens. Conforme o padrão hidrossedimentológico da região de interesse, a dragagem pode ser uma atividade bastante onerosa, de modo que sempre se deve buscar uma otimização, a fim de reduzir custos. Deste modo, destaca-se a importância da análise das variações sazonais da camada de lama fluida em regiões portuárias.

Como já mencionado anteriormente, a formação da camada de lama fluida está associada à disponibilidade de sedimentos finos e a baixas velocidades do escoamento nos corpos d'água em questão. Geralmente estas condições ocorrem em lagos ou estuários (MCANALLY, F.ASCE, *et al.*, 2007).

Os estuários são caracterizados por altas concentrações de sedimentos finos em suspensão, que apresentam características coesivas e são propensos à floculação (DYER, 1995). Em regiões estuarinas que não são caracterizadas por fortes correntes de maré, observa-se predominância praticamente absoluta de sedimentos finos (95 a 99%), de modo que os espaços náuticos são áreas propícias ao acúmulo deste tipo de material (ALFREDINI e ARASAKI, 2014).

As principais fontes sedimentares estuarinas são a erosão das bacias hidrográficas fluviais afluentes e a penetração pela embocadura de material erodido da plataforma continental ou proveniente do transporte litorâneo (ALFREDINI e ARASAKI, 2014). A primeira é a principal fonte de sedimentos finos e apresenta forte relação com variações sazonais de pluviosidade e vazões dos rios afluentes. Quando os sedimentos em suspensão alcançam a região estuarina, onde já há efeitos oscilatórios em função da maré, a reversibilidade das correntes provoca períodos de baixas velocidades, em que os sedimentos se depositam no fundo e podem ser novamente suspensos em um novo ciclo de maré (DYER, 1995).

Além das variações na quantidade de sedimentos aportados ao estuário devidas às influências sazonais das bacias de contribuição, a formação de depósitos lamosos no fundo também está associada a variações de salinidade. Quando há concentração suficiente de sal em uma suspensão de partículas argilosas, estas passam a apresentar características coesivas, ou seja, ocorre atração entre as partículas, formando flocos e, consequentemente aumentando sua velocidade de deposição (DYER, 1995). A presença de sal (a partir 2 a 3 partes por mil), que acrescenta íons à solução, suprimindo as forças de repulsão entre as partículas em suspensão e promovendo o domínio das forças de atração de van der Waals, provoca assim o efeito de floculação e deposição dos sedimentos finos (MEHTA, HAYTER, *et al.*, 1989).

# 3.4. LAMA FLUIDA EM REGIÕES PORTUÁRIAS ESTUARINAS BRASILEIRAS

Além do Complexo Portuário de Itajaí, objeto de estudo deste trabalho, ainda há registro de uma série de áreas portuárias brasileiras em que a questão das camadas de lama fluida junto ao fundo é importante.

Como primeiro exemplo, pode ser citado o Terminal da Alumar, localizado no Estreito dos Coqueiros, no interior da Baía de São Marcos, próximo a São Luís, Maranhão. A Figura 3.4 e a Figura 3.5 apresentam a localização deste terminal.



Figura 3.4 - Localização - Terminal Alumar - Visão Geral - Baía de São Marcos



Figura 3.5 - Localização - Terminal Alumar - Visão detalhada

Nos espaços náuticos relativos a este terminal, a questão da lama fluida é estudada desde a década de 1980 (INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS HIDROVIÁRIAS - INPH, 1986). Na época, este estudo já visava a possibilidade de inclusão de camadas de silte/argila de baixa densidade como profundidade náutica no canal de acesso, bacia de evolução e berços do terminal em questão, devido à baixa

eficiência da dragagem em depósitos lamosos. A Figura 3.6 ilustra o resultado dos levantamentos de campo realizados em 1986 na região da bacia de evolução do Terminal da Alumar, apresentando camadas de lama fluida com espessura expressiva, de mais de 3 metros nas proximidades dos berços. O acúmulo de sedimentos finos nesta região pode ser atribuído à descarga de material proveniente do Rio dos Cachorros, localizado a Leste do terminal.



Figura 3.6 – Espessura da camada de lama fluida na Bacia de Evolução do Terminal da Alumar. Fonte: INPH, 1986

O estudo, na época, preconizou que a inclusão de camadas lamosas com massa específica menor ou igual a 1.200 kg/m<sup>3</sup> na folga sob a quilha seria justificável, considerando as espessas camadas de lama fluida e, também, a ineficiência de dragagem. Foi recomendado também um monitoramento mensal de densidades nos espaços náuticos em questão, com o objetivo de auxiliar na confecção de cartas náuticas atualizadas considerando o conceito de Fundo Náutico, contemplando a possibilidade de aumento dos calados máximos dos navios (INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS HIDROVIÁRIAS - INPH, 1986).

O monitoramento das densidades de fundo na região teve continuidade, sendo que o último levantamento disponível ao qual se teve acesso foi realizado em maio de 2014 e contempla as profundidades em que a densidade do fundo é igual a 1.200

kg/m<sup>3</sup> (Figura 3.7). Além disto, são realizados levantamentos batimétricos de dupla frequência periódicos nos berços de atracação, como ilustrado na superfície comparativa exposta na Figura 3.8. No entanto, o conceito de Fundo Náutico, considerando as camadas de lama fluida, ainda não é utilizado no Brasil para homologação de calados máximos por parte da Autoridade Marítima, que somente admite a profundidade obtida a partir de ecossondagens de alta frequência.





Figura 3.8 - Superfície Comparativa - Berço Alumar - Agosto/13

Além da região do Terminal da Alumar, pode ser citado o Porto de Santos (Figura 3.9), em que foi realizado estudo semelhante pelo INPH na década de 1980, quando foram identificados alguns bolsões de lama fluida ao longo do canal de acesso ao Porto a partir de levantamentos batimétricos de dupla frequência, tanto em sua porção externa como em sua porção interna (Figura 3.10). A formação da camada de lama fluida nesta região geralmente ocorre nas áreas mais largas do canal, onde o fluxo apresenta velocidades mais baixas.

Nos levantamentos foram observadas camadas de lama fluida cuja espessura chegou a 3 metros nas proximidades do Largo de Santa Rita e a 2 metros no restante do canal de acesso. Também foi identificada a presença de camadas de lama fluida nas proximidades do Trecho 4 do Canal do Porto de Santos, a partir de levantamentos realizados em 2011 (FERREIRA, 2013).



Figura 3.9 - Localização - Porto de Santos e Canal de Piaçaguera


Figura 3.10 – Levantamentos batimétricos de dupla frequência – Canal Acesso ao Porto de Santos – Espessura da Camada de Lama Fluida

Além do canal de acesso ao Porto de Santos, destaca-se também o Canal de Piaçaguera, também no Estuário de Santos (Figura 3.9), que é utilizado como canal de acesso aos terminais pertencentes à Vale Fertilizantes e USIMINAS. A Figura 3.11 apresenta uma superfície comparativa concebida a partir de um levantamento batimétrico de dupla frequência realizada nesta região em dezembro de 2012, apresentando camada de lama fluida de até aproximadamente 2 metros, principalmente nas proximidades dos terminais.



Figura 3.11 – Superfície Comparativa – Canal de Piaçaguera (dezembro/2012)

Por fim, destaca-se a região da Baía de Paranaguá (Figura 3.12), onde estão localizados os Portos de Paranaguá e Antonina. No interior da baía, na região entre os portos de Paranaguá e Antonina, foram detectadas camadas de lama fluida de até 0,5 metros de espessura (Figura 3.13). Também é importante destacar a região da Barra Norte do rio Amazonas (Figura 3.14), em que há variações sazonais de bolsões de lama fluida (KINEKE e STERNBERG, 1995), conforme ilustrado na Figura 3.15. Nesta figura, a camada de lama fluida é representada pelos números no interior dos retângulos, enquanto os demais valores representam a concentração de material em suspensão.



Figura 3.12 - Localização - Baía de Paranaguá



Figura 3.13 – Camada de lama fluida – Baía de Paranaguá



Figura 3.14 - Barra Norte do Rio Amazonas



Figura 3.15 – Variação Sazonal da Camada de Lama Fluida – Barra Norte do Rio Amazonas. Fonte: Kineke & Sternberg, 1995.

# 4. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

### 4.1. COMPLEXO PORTUÁRIO DE ITAJAÍ

O Complexo Portuário de Itajaí é composto pelo Porto Público de Itajaí e demais terminais privativos instalados nas margens esquerda e direita do rio Itajaí-açu, nas proximidades de sua foz, com base logística nas cidades de Itajaí, localizada na margem direita do rio Itajaí-açu, e de Navegantes, localizada na margem esquerda do mesmo rio (Figura 4.1 e Figura 4.2). "O Complexo Portuário do Itajaí é hoje a principal opção para os exportadores e importadores que operam em Santa Catarina e um dos principais complexos do Brasil" (PORTO ITAJAÍ, 2016). Segundo Porto Itajaí (2016), o Complexo Portuário de Itajaí foi responsável pela movimentação de 907.788 TEUs, sendo o segundo porto em movimentação de contêineres no Brasil em 2015, apenas atrás do Porto de Santos. Segundo Porto Itajai (2016), o comprimento máximo de navios que podem atracar no complexo portuário é de 286 m.



Figura 4.1 – Complexo Portuário de Itajaí – Localização (1)



Figura 4.2 – Complexo Portuário de Itajaí – Localização (2)

Ainda de acordo com Porto Itajaí (2016), o canal de acesso externo está compreendido entre as boias 1 e 2 até o farolete 10, o canal de acesso interno está compreendido entre o farolete 10 e o ferry boat, e a bacia de evolução está compreendida após a estação do *ferry boat* até o final dos berços de atracação. Estes trechos estão representados na Figura 4.3 e apresentam profundidade de gabarito de 12,4 metros. A diferença reside na folga admissível sob a quilha: nos canais de acesso, a folga admissível sob a quilha é de 15% do calado da embarcação, ao passo que na bacia de evolução é permitida uma folga sob a quilha mínima de 0,6 metros, independente do calado do navio.



Figura 4.3 – Canal de Acesso e Bacia de Evolução – Complexo Portuário de Itajaí

## 4.2. CARACTERIZAÇÃO AMBIENTAL

O estuário do rio Itajaí-açu apresenta aproximadamente 70 km de extensão, sendo que o limite de montante está localizado próximo à cidade de Blumenau, onde ainda são observados os efeitos da onda de maré. Este estuário recebe o aporte de uma bacia de drenagem de cerca de 15.500 km<sup>2</sup> (MEDEIROS, 2003).

Este estuário pode ser dividido em Alto, Médio e Baixo Estuário conforme a Figura 4.4 (ALFREDINI e ARASAKI, 2014). O alto estuário corresponde ao trecho entre Blumenau e Ilhota, o médio estuário encontra-se entre Ilhota e a desembocadura do rio Itajaí-mirim e o baixo estuário está localizado a partir deste ponto até a desembocadura no Oceano Atlântico (DIONNE, 1963 apud TRUCCOLO, 2009).



Figura 4.4 - Estuário do Itajaí-açu – Trechos. Fonte: Alfredini e Arasaki., 2014

### Vazão Fluvial

Em trabalho desenvolvido por Schettini (2002), foi analisada uma série temporal de descarga diária entre os anos de 1934 e 1998 na estação fluviométrica de Indaial. Esta estação está localizada a aproximadamente 90 km da desembocadura, em região não mais influenciada pela intrusão salina e pela propagação da onda de maré e, também, segundo o autor, representando aproximadamente 70% de toda a bacia hidrográfica do rio Itajaí-açu. A partir desta série temporal, foi encontrada uma descarga diária média de 228 m<sup>3</sup>/s, com desvio padrão de 282 m<sup>3</sup>/s, sendo que a descarga diária mínima medida foi de 17 m<sup>3</sup>/s e máxima de 5.390 m<sup>3</sup>/s. O mesmo autor também verificou dois picos de vazão máxima mensal, em fevereiro (285 m<sup>3</sup>/s) com desvio padrão de 185 m<sup>3</sup>/s) e em outubro (309 m<sup>3</sup>/s com desvio padrão de 192 m<sup>3</sup>/s), e dois picos de vazão mínima mensal, em abril (164 m<sup>3</sup>/s com desvio padrão de 110 m<sup>3</sup>/s) e em dezembro (185 m<sup>3</sup>/s, com desvio padrão de 124 m<sup>3</sup>/s). Assim, Schettini (2002) destacou significativa variabilidade no regime hidrológico do rio

Itajaí-açu, consideravelmente variável no tempo. É importante observar que tanto as vazões máximas como mínimas do rio Itajaí-açu não estão relacionadas diretamente com estações específicas do ano. Além disto, os valores de vazão máxima e mínima são relativamente próximos, com elevados desvios-padrão.

Para o ano de 2007, analisado por este trabalho, foram calculados os valores de vazão média mensal, vazão mensal mínima e máxima e desvio padrão, os quais estão expostos na Tabela 4.1. Os valores obtidos indicam boa relação com os valores encontrados no estudo realizado por Schettini (2002).

Vazões - Indaial - Rio Itajaí-Açu (m³/s)								
Média Mensal	273							
Desvio Padrão	108							
Vazão Média Mínima Mensal	122							
(Abril/2007)	122							
Vazão Média Máxima Mensal	475							
(Maio/2007)								
Vazão Mínima Medida	77							
Vazão Máxima Medida	2017							

Tabela 4.1 – Vazões do Rio Itajaí-açu no ano de 2007

#### Maré

De acordo com Schettini (2002), a maré astronômica da região apresenta regime caracterizado como de micromarés misto, com predominância semidiurna. Schettini et al. (1998, apud SCHETTINI, 2002) afirmaram em seu estudo que a amplitude média de maré na desembocadura do estuário é de 0,8 m, com máxima de 1,2 m em sizígias e mínima de 0,3 m em períodos de quadratura. O mesmo autor afirma que a maré se propaga no interior do estuário até Blumenau, há aproximadamente 70 km da desembocadura. A FEMAR (2016) fornece, para o Porto de Itajaí, 32 constantes harmônicas selecionadas para previsão da variação do nível, conforme Figura 4.5, classificando a maré da região como de desigualdades diurnas. O nível médio observado para o marégrafo foi de 0,57 m, sendo que a média das preamares superiores é de 1,07 m e a média das baixa-mares inferiores é de 0,15 m. A soma das amplitudes de todas as constituintes resulta em 1,2 m.

#### FEMAR-FUNDAÇÃO DE ESTUDOS DO MAR Catálogo de Estações Maregráficas Brasileiras

Nome	da Estação :	ITAJAÍ (PORTO)	- SC						
Localização : No trapiche de atracação do antigo Escritório do DNPRC									
Organ. F	Responsável :	INPH / DHN							
	Latitude :	25° 54.2'	25° 54,2' S Longitude : 48° 34,6'						
Período	Analisado :	31/03/60 a 23/03/6	1/03/60 a 23/03/61 N° de Componentes : 32						
Análise	Harmônica :	Método, Tidal Liver	nool Instit	ute	•				
Ananse	lassificação :	Metodo Tidal Liver	odee Dive						
	lassificação :	Maré de Desigualdades Diurnas							
Estabelecimen	to do Porto:	II H 02 min N			Médio	57 cm			
(HWF	&C)			(2)	»):	acima do NR.			
Média das P	reamares	107	7 cm	Média das	Preamares	85 cm			
Superiores (	MHHW):	acima do NR.		Interiores (	MLHW):	acima do NR			
Média das Ba	aixa-mares	2		dédia das E	aixa-mares	15 cm			
Superiores (	MHLW):	acima do NR.		Interiores	(MLLW):	acima do NR.			
	CONSTA	NTES HARM	ÔNICA	S SELEC	IONADAS				
Componentes	Semi-	Fase (g)	Com	onentes	Semi-	Fase (g)			
componences	amplitude		Componentes		amplitude				
	(H) cm	graus (°)			(H) cm	graus (°)			
Sa	4,2	056	N	AU <sub>2</sub>	1,5	117			
Ssa	5,2	092		N <sub>2</sub> 4,3		146			
Mm	1,9	045	I	NU <sub>2</sub> 0,6		187			
Mf	6,1	170		M <sub>2</sub> 23,2		069			
MTM	-	-		L <sub>2</sub>	1,7	075			
Msf	4,3	276	T <sub>2</sub>		0,4	234			
Q1	3,2	053	S <sub>2</sub>		15,7	066			
<b>O</b> 1	10,4	077		K <sub>2</sub> 5,2		060			
M <sub>1</sub>	0,5	242	I	MO <sub>3</sub> 2,8		336			
P1	2,1	127		M <sub>3</sub> 4,2		176			
K1	6,1	137	I	<b>AK</b> 3	1,6	076			
$J_1$	0,2	137	I	MN <sub>4</sub> 2,4		067			
001	0,3	073	M4		M <sub>4</sub> 5,7				
MNS <sub>2</sub>	0,4	091		SN4 0,5		141			
2N <sub>2</sub>	1,4	132	I	MS4	3,9	205			
Obs: Outros períodos : 01/01/29 a 05/01/30; 01/09/56 a 02/10/56; 01/04/91 a 01/05/91. Existem no INPH registros de 1922 até 1988 Consta das Tábuas das Marés									
					Cá	digo BNDO: 60230			



A IHO (International Hydrographic Organization) possui um banco de dados de maré em mais de 4.000 marégrafos em todo o mundo nas proximidades de regiões costeiras, sendo que um deles encontra-se localizado nas proximidades do Porto de Itajaí. As componentes harmônicas definidas para cada um destes marégrafos estão disponíveis no banco de dados do *Delft Dashboard*, ferramenta concebida em Deltares para facilitar a concepção de modelos numéricos no software Delft3D®. Para este marégrafo, as constituintes harmônicas obtidas estão expostas na Tabela 4.2. A soma das amplitudes de todas as constituintes analisadas é de 1,375 m.

Componente Astronômicas - Porto de Itajaí - IHO									
Componente	Amplitude (m)	Fase (°)	Componente	Amplitude (m)	Fase (°)				
M2	0,232	156	MSN2	0,007	329				
S2	0,157	156	SK4	0,007	47				
01	0,104	119	NU2	0,006	273				
K1	0,061	182	SIGMA1	0,006	67				
MF	0,061	173	SO1	0,006	31				
M4	0,057	290	MP1	0,006	296				
К2	0,052	150	MKS2	0,006	77				
SSA	0,052	92	M1	0,005	285				
N2	0,043	231	2SM2	0,005	319				
MSF	0,043	279	S4	0,005	42				
M3	0,042	306	OP2	0,005	259				
SA	0,042	56	SN4	0,005	316				
MS4	0,039	22	T2	0,004	324				
Q1	0,032	93	FI1	0,004	161				
MO3	0,028	105	MNS2	0,004	173				
MN4	0,024	239	2MS6	0,004	134				
P1	0,021	172	LABDA2	0,003	35				
SK3	0,021	359	001	0,003	121				
MM	0,019	47	PSI1	0,003	240				
L2	0,017	164	J1	0,002	184				
MK3	0,016	208	R2	0,002	259				
MU2	0,015	201	M6	0,002	177				
2N2	0,014	216	CHI1	0,002	227				
SO3	0,014	48	THETA1	0,002	260				
<b>S1</b>	0,013	163	MSN6	0,002	151				
KJ2	0,01	316	2MK6	0,002	255				
MK4	0,01	22	PI1	0,001	208				
OQ2	0,009	181	2MN6	0,001	141				
RO1	0,008	123	2SM6	0,001	228				
2Q1	0,007	30	MSK6	0,001	162				

Tabela 4.2 – Componentes Harmônicas – Porto de Itajaí - IHO

Somado aos efeitos de maré astronômica, foi observado por Truccolo et al. (2006) que as marés meteorológicas podem representar cerca de 25% da variabilidade do nível do mar na costa de Santa Catarina. "A alteração do nível do mar na costa de amplitudes significativas pode ter influência direta no nível d'água e correntes do estuário, ocasionando aumentos do nível d'água que podem chegar a 1 m acima da maré astronômica prevista" (TRUCCOLO, 2009). Destaca-se, também, conforme observado por Schettini & Truccolo (2009), que eventos extremos de vazão fluvial podem alterar significativamente o registro de nível d'água nas proximidades do Complexo Portuário de Itajaí.

#### > Salinidade

Segundo estudo realizado por Medeiros (2003), o estuário do rio Itajaí-açu encontrase estratificado durante a maré de quadratura, enquanto nas marés de sizígia, o mesmo apresenta características de um estuário parcialmente misturado em 80% dos registros realizados. Já de acordo com Schettini (2002), a propagação de água salgada para o interior do estuário varia de acordo com os valores de descarga fluvial, sendo que em condições nas quais a vazão do rio alcança 300 m<sup>3</sup>/s, a intrusão salina ocorre até aproximadamente 18 km a montante da barra, sendo que em vazões superiores a 1.000 m<sup>3</sup>/s a água é totalmente expulsa da bacia estuarina. No entanto, segundo Schettini & Truccolo (2009), a vazão do rio Itajaí-açu é inferior ao seu valor médio na maior parte do tempo e, deste modo, a intrusão salina pode ser considerada praticamente permanente. "Em períodos de baixa vazão, a intrusão salina pode chegar a mais de 30 km da desembocadura" (SCHETTINI e TRUCCOLO, 2009).

"Durante condições de descarga fluvial intermediária, em torno de 500 m<sup>3</sup>/s, ou abaixo disso, o estuário apresenta uma evidente cunha salina" (SCHETTINI, 2002). Medeiros (2003) observou em perfis de salinidade medidos em campo no ano de 1999 que a intrusão salina, considerando vazão fluvial da ordem de 150 m<sup>3</sup>/s, penetra no estuário até cerca de 20 km em marés de sizígia e até aproximadamente 26 km em marés de quadratura. A bacia de evolução do Complexo Portuário do Itajaí encontra-se a aproximadamente 3,5 km da embocadura. Nesta região, para os mesmos dados observados por Medeiros (2003), a salinidade próxima ao fundo é de 30 partes por mil para ambas as condições. Já a salinidade mais próxima à superfície varia conforme a maré, de zero a aproximadamente 10 partes por mil.

Material de fundo

De acordo com Schettini (2002), o fundo do estuário é predominantemente composto por depósitos argilosos, sendo que a fração argila é superior a 70%, com traços de areia e silte. Segundo Döbereiner (1986), até uma distância de 7 km da barra o material de fundo é predominantemente composto por argila, obedecendo a processos sedimentares coesivos de transporte e sedimentação. O mesmo autor afirma que, em períodos de altas vazões, da ordem de 700 m<sup>3</sup>/s, é observado um incremento na fração de areia presente no fundo, em função do aumento do transporte fluvial. Já em períodos de baixa vazão, ocorre um aumento da fração de areia fina de origem marinha.

Material particulado em suspensão

Schettini (2002) afirma que a concentração de sedimentos em suspensão varia conforme a vazão do rio, sendo que os valores de concentração podem variar entre aproximadamente 7 mg/L e 500 mg/L, durante períodos de vazões elevadas, da ordem de 1000 m<sup>3</sup>/s. O autor afirma ainda que entre novembro de 1998 e novembro de 1999, foram observadas vazões superiores a 1000 m<sup>3</sup>/s em apenas três dias, sendo que estes dias foram responsáveis pela descarga sólida de 41% do total transportado em todo este período. Neste período, foi observada uma descarga sólida de aproximadamente 760.000 toneladas de material em suspensão, com base nos dados de Indaial.

Nos dados medidos em 2007 na mesma localização, a concentração de sedimentos em suspensão variou entre 6,8 mg/L e 569,5 mg/L, com média de 33 mg/L.

# 5. O MÉTODO

### 5.1. DADOS UTILIZADOS

#### 5.1.1. Levantamentos Batimétricos

Para a análise desta região foram utilizados quatro pares de levantamentos batimétricos realizados na bacia de evolução do Complexo Portuário de Itajaí em formato DWG. Cada um destes pares apresenta uma batimetria de alta frequência (200 kHz) e uma batimetria de baixa frequência (33 kHz). Estas batimetrias de dupla frequência foram realizadas nos dias 30/03/2007, 15/05/2007, 12/07/2007 e 05/11/2007. A Figura 5.1 apresenta um exemplo de levantamento utilizado para este estudo.



Figura 5.1 - Exemplo de levantamento batimétrico utilizado

Estes levantamentos batimétricos foram utilizados como base para a construção de superfícies de nível interpoladas, por meio da utilização do software AutoCad Civil 3D. A fim de determinar a diferença entre as superfícies relativas aos levantamentos de alta e baixa frequência, para estimativa da espessura da camada de lama fluida, definiram-se superfícies comparativas. As superfícies de nível relativas aos levantamentos de baixa frequência foram utilizadas como base e as superfícies relativas aos levantamentos de alta frequência foram utilizadas como superfícies de comparação, de modo que os valores obtidos para a espessura da camada de lama fluida fossem estritamente positivos. Além disto, estes levantamentos foram utilizados como condição de contorno para a realização da modelagem computacional.

#### 5.1.2. Dados de vazão líquida e material particulado em suspensão

Além das batimetrias de dupla frequência, ainda foram utilizados dados de vazão e material particulado em suspensão em uma localidade próxima a Indaial, mais a montante no rio Itajaí-açu, onde os efeitos da propagação da onda de maré já não são significativos. Estes dados foram utilizados para condições de contorno fluviais do modelo computacional, com o objetivo de se obter uma relação entre vazão líquida e sólida do rio Itajaí-açu e a variação observada nas superfícies comparativas

A Figura 5.2 e a Tabela 5.1 apresentam a localização do ponto de medições de vazão e material particulado em suspensão.



Figura 5.2 - Localização - Ponto de medição de vazões e MPS – Indaial (Fonte: Google Earth, em

abela 5.1 - Localização - Ponto de medição de vazoes e MPS - Indala							
Localização do Ponto de Medição - Indaial - Datum WGS84							
Latitude (°)	Longitude (°)						
-26.892	-49.2351						

# 5.1.3. Perfis densimétricos

Utilizaram-se, também, dados de perfis densimétricos realizados na mesma região em datas próximas às que foram realizadas as batimetrias. Os levantamentos densimétricos utilizados são compostos de quatro conjuntos de perfis de densimetria medidos por reômetro DENSITUNE, cobrindo a área da bacia de evolução e do canal de acesso aos portos de Itajaí e Navegantes. A Figura 5.3 ilustra um exemplo dos perfis densimétricos utilizados.



Figura 5.3 - Exemplo de Perfil Densimétrico

As densimetrias foram realizadas em abril, maio, julho e novembro de 2007, nas seguintes datas:

- Abril: 53 perfis densimétricos (realizados em 05/04/2007)
- Maio: 57 perfis densimétricos (31 realizados em 05/05/2007, 23 realizados em 08/05/2007 e 3 realizados em 14/05/2007)
- Julho: 28 perfis densimétricos (realizados em 05/07/2007)
- Novembro: 13 e 14 de novembro de 2007 79 perfis densimétricos (76 realizados em 13/11/2007 e 3 realizados em 14/11/2007)

Para cada um destes perfis, foi definida a profundidade em que foram encontradas as massas específicas de 1.150 kg/m<sup>3</sup>, 1.200 kg/m<sup>3</sup> e 1.250 kg/m<sup>3</sup>, a fim de

identificar quais destas estaria mais bem relacionada ao refletor obtido com o ecobatímetro de baixa frequência, por meio de correlação linear entre os valores obtidos.

### 5.2. MODELAGEM NUMÉRICA

Para análise das principais características do escoamento na região da bacia de evolução do Complexo Portuário de Itajaí, a fim de verificar os mecanismos responsáveis por variações no transporte de sedimentos coesivos nesta área, foi realizada modelagem numérica hidrodinâmica e de transporte de sedimentos coesivos. Esta modelagem foi feita por meio da utilização do software Delft3D®, concebido pela Deltares (DELTARES, 2014). O equacionamento utilizado pelo software será posteriormente detalhado.

#### 5.2.1. O Modelo Delft3D®

O módulo hidrodinâmico do Delft3D® simula escoamentos não uniformes e fenômenos de transporte a partir das variações de maré ou forçantes meteorológicas, incluindo o efeito de gradientes de densidade, calculados a partir de uma determinada distribuição de temperatura e salinidade. Este modelo pode ser utilizado para prever o comportamento do escoamento em regiões rasas, costeiras, estuarinas, fluviais ou lacustres (DELTARES, 2014)

A modelação numérica desenvolvida resolve as equações para escoamentos não estacionários em águas rasas, tanto para duas como para três dimensões. O sistema de equações resolvido é composto pela equação da continuidade (ou conservação da massa), conservação da quantidade de movimento (Navier-Stokes) e equações de transporte de temperatura, salinidade e demais substâncias dissolvidas. O fluxo é forçado a partir das variações de nível nos contornos abertos do modelo, efeito do vento na superfície livre, gradientes de nível d'água (efeito barotrópico) e gradientes de densidade (efeito baroclínico) (DELTARES, 2014).

O Delft3D® resolve as equações de Navier-Stokes para um fluido incompressível, a partir das aproximações de Boussinesq, ou seja, o modelo considera a densidade do fluido constante, excetuando-se apenas o termo baroclínico, que representa as variações no fluxo resultantes do gradiente vertical de densidade (DELTARES, 2014). Este tipo de aproximação é utilizado em dinâmica dos fluidos quando há pouca variação de densidade, provocando erros da ordem de 1% caso as variações de temperatura não excedam 2°C (FERZIGER e PERIC, 2002).

Além das aproximações de Boussinesq, o modelo desconsidera as acelerações verticais do escoamento, ou seja, assume que a pressão ao longo da coluna d'água é hidrostática. Esta hipótese é válida em escoamentos cuja extensão horizontal considerada é muito maior em relação à profundidade (DELTARES, 2014).

As equações de Navier-Stokes utilizadas são simplificadas a partir da média de Reynolds, ou seja, estas equações são derivadas a partir da decomposição das variáveis em médias temporais e componentes turbulentas. Estas componentes turbulentas, quando integradas no tempo são iguais a zero por definição (VERSTEEG e MALALASEKERA, 2007), simplificando a equação. A partir desta simplificação, são introduzidas no equacionamento as chamadas tensões de Reynolds, que representam as perturbações turbulentas (TANNEHILL, ANDERSON e PLETCHER, 1997). As tensões de Reynolds são calculadas a partir de um coeficiente de viscosidade turbulenta, que representa as perdas de energia devidas aos efeitos de turbulência (DELTARES, 2014).

As simulações numéricas são desenvolvidas por meio do método das diferenças finitas, sendo que o espaço é discretizado em células a partir da utilização de uma grade computacional. No plano horizontal, o Delft3D® utiliza coordenadas curvilíneas ortogonais, sendo a velocidade calculada conforme a orientação das faces das células da grade numérica. Os níveis de água são calculados no centro das células, enquanto os componentes de velocidade são calculados em relação ao centro das faces das mesmas (DELTARES, 2014).



Figura 5.4 - Mapeamento do espaço - Grade computacional. Fonte: Deltares, 2014

As coordenadas verticais geralmente utilizadas são as coordenadas do tipo σ (DELTARES, 2014), em que o número de camadas verticais ao longo de todo o domínio computacional do modelo é constante, independentemente da profundidade local, conforme a definição abaixo:

$$\sigma = \frac{z - \zeta}{d + \zeta} = \frac{z - \zeta}{H}$$

Sendo:

- z coordenada vertical no espaço;
- >  $\zeta$  elevação da superfície livre em relação ao plano de referência (z = 0);
- d profundidade em relação ao plano de referência;
- H profundidade total, considerando a variação do nível d'água.



Figura 5.5 - Exemplo de um grid tipo σ. Fonte: Deltares, 2014.



Figura 5.6 - Definição de nível d'água, profundidade abaixo do nível de referência e profundidade total. Fonte: Deltares, 2014

No sistema de coordenadas utilizado pelo modelo, a equação da continuidade pode ser escrita da seguinte forma:

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{1}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial ((d+\zeta)U\sqrt{G_{\eta\eta}})}{\partial \xi} + \frac{1}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial ((d+\zeta)V\sqrt{G_{\xi\xi}})}{\partial \eta} = (d+\zeta)Q$$

Sendo:

- >  $\zeta$  elevação da superfície livre em relação ao plano de referência (z = 0);
- ➤ t tempo;
- d profundidade em relação ao plano de referência;
- >  $\sqrt{G_{\xi\xi}}; \sqrt{G_{\eta\eta}}$  coeficientes utilizados para transformar coordenadas curvilíneas em retangulares;
- > U velocidade média na coluna d'água na direção  $\xi$ ;

> V – velocidade média na coluna d'água na direção  $\eta$ ;

> Q – fonte ou sumidouro de água, em vazão por unidade de área.

As equações de conservação de quantidade de movimento (Navier-Stokes) são dadas por:

#### > Direção $\xi$ :

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{u}{\sqrt{G_{\xi\xi}}} \frac{\partial u}{\partial \xi} + \frac{v}{\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial u}{\partial \eta} + \frac{\omega}{d+\zeta} \frac{\partial u}{\partial \sigma} - \frac{v^2}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \sqrt{G_{\eta\eta}}}{\partial \xi} \\ &+ \frac{uv}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \sqrt{G_{\xi\xi}}}{\partial \eta} - fv \\ &= -\frac{1}{\rho_0 \sqrt{G_{\xi\xi}}} P_{\xi} + F_{\xi} + \frac{1}{(d+\zeta)^2} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left( v_V \frac{\partial u}{\partial \sigma} \right) + M_{\xi} \end{aligned}$$

> Direção  $\eta$ :

$$\begin{aligned} \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{u}{\sqrt{G_{\xi\xi}}} \frac{\partial v}{\partial \xi} + \frac{v}{\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial v}{\partial \eta} + \frac{\omega}{d+\zeta} \frac{\partial v}{\partial \sigma} + \frac{uv}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \sqrt{G_{\eta\eta}}}{\partial \xi} \\ &- \frac{u^2}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \sqrt{G_{\xi\xi}}}{\partial \eta} + fu \\ &= -\frac{1}{\rho_0 \sqrt{G_{\eta\eta}}} P_\eta + F_\eta + \frac{1}{(d+\zeta)^2} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left( v_V \frac{\partial u}{\partial \sigma} \right) + M_\eta \end{aligned}$$

Sendo:

- > u velocidade instantânea na direção  $\xi$ ;
- > v velocidade instantânea na direção  $\eta$ ;
- f parâmetro de Coriolis;
- >  $\omega$  velocidade instantânea na direção  $\sigma$ ;
- >  $\rho_0$  densidade de referência de água;
- >  $P_{\eta}$ ;  $P_{\xi}$  gradiente de pressão hidrostática na direção  $\eta$  ( $\xi$ );

- >  $M_{\eta}$ ;  $M_{\xi}$  quantidade de movimento fornecida/retirada por fontes ou sumidouros;
- *F<sub>η</sub>*; *F<sub>η</sub>* quantidade de movimento devida a efeitos de turbulência nas direções η e ξ;
- >  $v_V$  viscosidade turbulenta vertical.

As variações de salinidade são calculadas conforme uma equação tridimensional de transporte (advecção e difusão), considerando eventuais fontes ou sumidouros no interior do domínio modelado (DELTARES, 2014):

$$\frac{\partial(d+\zeta)c}{\partial t} + \frac{1}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \left\{ \frac{\partial \left[\sqrt{G_{\eta\eta}} (d+\zeta)uc\right]}{\partial \xi} + \frac{\partial \left[\sqrt{G_{\xi\xi}} (d+\zeta)vc\right]}{\partial \eta} \right\} + \frac{\partial \omega c}{\partial \sigma} \\ = \frac{(d+\zeta)}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \left\{ \frac{\partial}{\partial \xi} \left( D_H \frac{\sqrt{G_{\eta\eta}}}{\sqrt{G_{\xi\xi}}} \frac{\partial c}{\partial \xi} \right) + \frac{\partial}{\partial \eta} \left( D_H \frac{\sqrt{G_{\xi\xi}}}{\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial c}{\partial \eta} \right) \right\} \\ + \frac{1}{d+\zeta} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left( D_V \frac{\partial c}{\partial \sigma} \right) + S$$

Sendo:

- c: concentração em massa;
- $\succ$   $D_H$ : coeficiente de difusão horizontal;
- $\succ$  *D<sub>V</sub>*: coeficiente de difusão vertical;
- S: fonte ou sumidouro por unidade de área.

Os coeficientes de difusão são calculados pelo modelo, a partir do modelo adotado de turbulência. O limite inferior destes coeficientes pode ser estipulado pelo usuário, como parâmetros de calibração (DELTARES, 2014). Para este estudo, foi utilizado o modelo de turbulência do tipo k-ε, que descreve a turbulência em função da solução de duas equações diferenciais parciais de transporte, uma para descrição da energia cinética turbulenta e uma para a taxa de dissipação desta (VERSTEEG e MALALASEKERA, 2007).

As condições de contorno são compostas pelos contornos chamados contornos fechados, que representam a interface entre água e terra, pelos contornos abertos, definidos para delimitação da área modelada, contorno de fundo, representado pelo atrito existente entre o fundo e a água, e contorno de superfície, representado pelo atrito entre o vento e o escoamento.

Os contornos abertos podem ser representados por variações astronômicas de nível, séries temporais de vazão, nível, velocidades de corrente ou condições de contorno do tipo Neumann, representada por gradientes de nível.

Já as condições de contorno de fundo, fundamentais no cálculo de transporte de sedimentos, são representadas pela tensão de cisalhamento. A tensão de cisalhamento de fundo em modelos tridimensionais induzida por um escoamento turbulento é dada por uma relação quadrática (DELTARES, 2014):

$$\overrightarrow{\tau_f} = \frac{\rho_0 g \overrightarrow{u} |\overrightarrow{u}|}{C^2}$$

- $\succ$   $\vec{\tau_f}$ : tensão de cisalhamento junto ao fundo;
- $\succ \rho_0$ : densidade da água;
- $\succ$   $\vec{u}$  : velocidade horizontal do escoamento na primeira camada acima do fundo;
- C: rugosidade representada pelo coeficiente de Chézy (dado de entrada).

O módulo de transporte de sedimentos do Delft3D® divide o transporte sedimentar em transporte de fundo e transporte de material em suspensão, possibilitando a inclusão de diferentes frações de sedimento com diferentes características físicas. O equacionamento do transporte de sedimentos coesivos é baseado no princípio da continuidade: A taxa de entrada de partículas em deposição em um determinado volume de controle somada à taxa de geração destas partículas dentro do mesmo volume de controle deverá ser igual à taxa de aumento da concentração destas partículas no interior deste mesmo volume (MCLAUGHLIN, 1961). O cálculo de transporte de sedimentos em suspensão é realizado pela solução da equação de advecção-difusão para o material em suspensão (DELTARES, 2014):

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \frac{\partial uc}{\partial x} + \frac{\partial vc}{\partial y} + \frac{\partial (w - w_s)c}{\partial z} - \frac{\partial}{\partial x} \left( \varepsilon_x \frac{\partial c}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left( \varepsilon_y \frac{\partial c}{\partial y} \right) - \frac{\partial}{\partial z} \left( \varepsilon_z \frac{\partial c}{\partial z} \right) = 0$$

Onde:

- c concentração em massa de sedimento em suspensão (kg/m<sup>3</sup>)
- u, v e w componentes da velocidade do escoamento nas direções x, y e z, respectivamente (m/s);
- w<sub>s</sub> velocidade de queda do sedimento;
- >  $\epsilon_x$ ,  $\epsilon_y = \epsilon_z$  difusividades turbulentas do sedimento.

As componentes de velocidades do escoamento e difusividades turbulentas são obtidas a partir dos resultados do modelo de turbulência. O equacionamento considera que os coeficientes de difusividade turbulenta são independentes da concentração de material em suspensão, sendo esta hipótese válida para o intervalo de concentrações que ocorrem em rios e estuários (PARTHENIADES, 2009). A velocidade de queda do sedimento utilizada no equacionamento é definida com base na concentração de material em suspensão, já que a presença de outras partículas pode reduzir a velocidade de queda (DELTARES, 2014).

$$w_s = \left(1 - \frac{c_s^{tot}}{C_{solo}}\right) w_{s0}$$

Onde:

- ➤ w<sub>s</sub> velocidade de queda do sedimento;
- w<sub>s0</sub> velocidade de queda de referência do sedimento, desconsiderando o efeito das demais partículas;
- c<sup>tot</sup> concentração total de material em suspensão, considerando todas as frações de sedimento;
- C<sub>solo</sub> densidade de referência do material (kg/m<sup>3</sup>).

Para sedimentos coesivos, a velocidade de queda de referência é função da salinidade. A presença de sal na água (íons positivos) provoca redução da força de repulsão entre os minerais argilosos, carregados negativamente, de modo que as partículas passam a se encontrar de maneira suficientemente próxima para que se agreguem e formem flocos (ALFREDINI e ARASAKI, 2014). Estes flocos apresentam maiores dimensões em relação às partículas individuais e, consequentemente, se depositam mais rapidamente. No caso do Delft3D®, a velocidade de queda de referência é função da velocidade de queda em água doce e da velocidade de queda em água salgada é calculada por:

$$w_{s0} = \begin{cases} \frac{w_{s,max}}{2} \left(1 - \cos\left(\frac{\pi S}{S_{max}}\right)\right) + \frac{w_{s,f}}{2} \left(1 + \cos\left(\frac{\pi S}{S_{max}}\right)\right), & quando \ S \le S_{max} \\ w_{s,max}, & quando \ S > S_{max} \end{cases}$$

- >  $w_{s0}$  velocidade de queda de referência;
- $\blacktriangleright$   $w_{s,max}$  velocidade de queda quando a salinidade é máxima;
- >  $w_{s,f}$  velocidade de queda em água doce;
- ➤ S salinidade;
- >  $S_{max}$  salinidade em que a velocidade de queda é máxima.

As variações de fundo são calculadas a partir da formulação de Partheniades-Krone (DELTARES, 2014), que calcula os volumes erodidos e depositados a partir da relação entre os valores de tensão de cisalhamento junto ao fundo e tensões críticas para erosão ou depósito de sedimentos na camada de fundo. As tensões críticas para acúmulo e erosão de material são parâmetros de calibração do modelo:

$$E = MS(\tau_{cw}, \tau_{cr,e})$$
$$D = w_s c_b S(\tau_{cw}, \tau_{cr,d})$$
$$c_b = c \left(z = \frac{\Delta z_b}{2}, t\right)$$

Onde:

- ➤ E fluxo erosivo (kg/m²s);
- M parâmetro de erosão (parâmetro de calibração);
- D fluxo de deposição (kg/m<sup>2</sup>s);
- $\blacktriangleright$  w<sub>s</sub> velocidade de queda;
- c<sub>b</sub> concentração de sedimentos na camada computacional mais próxima ao fundo;
- >  $\Delta z_b$  espessura da camada de fundo;
- > t tempo
- τ<sub>cw</sub> máxima tensão de cisalhamento do fundo em decorrência da ação do escoamento (ondas e correntes);
- >  $\tau_{cr,e}$  tensão de cisalhamento crítica para erosão;
- τ<sub>cr,d</sub> tensão de cisalhamento crítica para deposição;
- >  $S(\tau_{cw}, \tau_{cr,e})$  função de erosão

$$S(\tau_{cw}, \tau_{cr,e}) = \begin{cases} \left(1 - \frac{\tau_{cw}}{\tau_{cr,e}}\right), para \tau_{cw} > \tau_{cr,e} \\ 0, para \tau_{cw} \le \tau_{cr,e} \end{cases}$$

>  $S(\tau_{cw}, \tau_{cr,d})$  – função de deposição

$$S(\tau_{cw}, \tau_{cr,d}) = \begin{cases} \left(1 - \frac{\tau_{cw}}{\tau_{cr,d}}\right), para \tau_{cw} < \tau_{cr,d} \\ 0, para \tau_{cw} \ge \tau_{cr,d} \end{cases}$$

#### 5.2.2. Descrição do modelo e parâmetros utilizados

A área modelada foi definida com base na linha de costa traçada a partir das imagens de satélite disponíveis no software Google Earth®. Os limites oceânicos

foram determinados de modo que pudessem representar a propagação da onda de maré adequadamente ao longo de toda a área modelada. O limite fluvial foi definido de modo que se encontrasse em uma região em que a salinidade é nula em toda a coluna d'água. Este limite encontra-se aproximadamente a 20 km da embocadura do estuário (SCHETTINI, 2002), conforme Figura 5.7.



A grade computacional utilizada tem 14.011 células, com resolução variável, sendo que na bacia de evolução do Complexo Portuário de Itajaí a resolução adotada para as células foi de 40 x 20 metros. A Figura 5.8 apresenta a visão geral da grade utilizada e a Figura 5.9 ilustra a grade computacional no interior da bacia de evolução do Complexo Portuário de Itajaí.



Figura 5.8 – Grade computacional – Visão Geral



Figura 5.9 – Grade Computacional – Área de interesse

Definiu-se para resolução vertical do modelo a divisão da coluna d'água em 12 camadas, para fiel representação da estratificação do estuário e, também, de seu

efeito no transporte de sedimentos coesivos. Além disto, para melhor representação dos fenômenos junto ao fundo, a coluna d'água foi detalhada de modo que a resolução junto ao fundo apresentasse melhor definição. Do fundo para a superfície, as camadas foram divididas em 2-2-3-4-5-6-7-9-11-14-17-20%.

Para a batimetria do modelo, foram utilizados os dados obtidos em 2007, em março, maio, julho e novembro. Além disto, para as áreas não hidrografadas nestes levantamentos foram utilizados dados da Carta Náutica 1841 da Marinha para a região do Complexo Portuário de Itajaí (CHM - CENTRO DE HIDROGRAFIA DA MARINHA, 2015).



Figura 5.10 - Batimetria utilizada no modelo computacional

O contorno oceânico do modelo foi forçado a partir de amplitudes e fases de constantes astronômicas geradas pelo modelo global de marés TPXO, para a região de interesse. Já para o contorno fluvial, foi especificada uma vazão aproximadamente 43% superior à medida no posto de Indaial. Este procedimento foi adotado, pois este posto de medição representa aproximadamente 70% de toda a

bacia de drenagem (SCHETTINI, 2002). Para a rugosidade de fundo foi adotado coeficiente de Manning igual a 0,010, uniforme em todo o domínio.

Os efeitos de vento e ondas não foram considerados, pois estes não são representativos na área de interesse para o transporte de sedimentos (SCHETTINI, 2002). No entanto, foi realizada uma simulação de teste, a fim de verificar eventuais efeitos do vento no escoamento.

A salinidade no contorno fluvial foi considerada nula, pois este contorno está localizado a aproximadamente 20 km da embocadura do estuário, onde já não há mais intrusão salina em toda a coluna d'água. Para o contorno oceânico, foi atribuída salinidade de 35 ppm, com distribuição uniforme.

Para o material de fundo, foi considerada a presença apenas de uma fração de sedimentos coesivos, pois o modelo tem o objetivo exclusivo de avaliar as variações das concentrações de sedimentos nas proximidades do fundo. As propriedades do material foram determinadas para que este representasse fielmente uma suspensão que não se consolide facilmente no fundo, simulando a presença de uma camada de lama fluida.

A massa específica das partículas foi considerada como a densidade do quartzo (2650 kg/m<sup>3</sup>), material predominante em sedimentos naturais (YE, 2006). Valores típicos para o parâmetro de erosão estão no intervalo entre 0,00001 kg/m<sup>2</sup>/s e 0,0005 kg/m<sup>2</sup>/s. A densidade aparente adotada foi determinada para simular uma fração de sedimentos finos que está praticamente sempre em suspensão (ELFRINK, BUNDGAARD, *et al.*, 2008).

A calibração de modelos de transporte de sedimentos coesivos envolve basicamente o ajuste de três parâmetros: velocidade de queda, tensão de cisalhamento crítica para erosão e tensão de cisalhamento crítica para depósito de sedimentos (FUHRHOP, 2013). A tensão crítica para erosão geralmente é definida entre 0,1 e 5 N/m<sup>2</sup> (WINTERWERP, VAN KESTEREN, *et al.*, 2012). Já a tensão crítica para a sedimentação foi considerada nula, a partir da premissa de que este material não se consolidaria, mantendo-se em suspensão próximo ao fundo.

As velocidades de queda para água doce e salgada, por sua vez, foram ajustadas ao longo das simulações de calibração para melhor reprodução do modelo de transporte de sedimentos. A salinidade em que a velocidade de queda do sedimento é máxima foi adotada como 30 ppm, por ser o maior valor de salinidade obtido em medições na região da bacia de evolução do Complexo Portuário de Itajaí (SCHETTINI, 2002). A Tabela 5.2 apresenta um resumo dos parâmetros utilizados.

Parâmetros - Modelo de Transporte							
Massa Específica do Sedimento	2650 kg/m <sup>3</sup>						
Velocidade de Queda (Água Doce)	0.01 mm/s						
Velocidade de Queda (Água Salgada)	0.1 mm/s						
Salinidade (Smax)	30 ppm						
Tensão crítica para acúmulo	0 N/m²						
Tensão crítica para erosão	0.1 N/m²						
Parâmetro de erosão	0.0005 kg/m/s						
Densidade	180 kg/m³						

Tabela 5.2 – Parâmetros – Modelo de Transporte de Sedimentos

No contorno fluvial foram utilizados valores de concentração de material em suspensão medidos em Indaial ao longo do ano de 2007. Já para o contorno oceânico considerou-se concentração nula deste material em suspensão, a partir da premissa de que estes sedimentos finos se originariam somente da bacia de drenagem e não seriam de origem oceânica.

#### 5.2.3. Calibração do modelo

Para calibração do nível d'água do modelo numérico, foram geradas séries de maré a partir de constantes astronômicas fornecidas pelo modelo global de marés TPXO para o Porto de Itajaí. A Figura 5.11 apresenta o ajuste do campo em relação aos dados fornecidos pelo modelo global. A linha azul representa o nível modelado e a linha vermelha representa os dados do modelo TPXO.



Figura 5.11 – Calibração – Nível d'água – Porto de Itajaí. Linha Azul: Modelo; Linha Vermelha: TPXO.

Para avaliação quantitativa da aderência do nível d'água do modelo em relação ao modelo global, foi utilizado o parâmetro RMAE – Relative Mean Absolute Error. Trata-se de um parâmetro comparativo entre os dados de campo e os resultados modelados, sendo que quanto mais seu valor se aproxima de zero, mais precisa está a representação do modelo.

$$RMAE = \frac{<|M-C|>}{<|C|>} = 0,13$$

Onde:

- M valor modelado;
- C valor medido em campo;

Para as velocidades de corrente, foram consideradas como valores de referência as velocidades medidas no ADCP localizado nas proximidades do píer do CEPSUL (Figura 5.12), utilizado para o monitoramento realizado no estuário do rio Itajaí-açu pela UNIVALI, entre 2006 e 2012 (CENTRO DE CIÊNCIAS TECNOLÓGICAS DA TERRA E DO MAR - CTTMAR, 2012). A Tabela 5.3 apresenta os valores médios de velocidade de corrente obtidos no ADCP mensalmente entre 2006 e 2012. Em função da indisponibilidade da série temporal de medições, foram comparadas as ordens de grandeza das velocidades medidas e modeladas, para avaliação do

modelo. A Figura 5.13 apresenta a magnitude das velocidades de correntes simuladas ao longo do ano de 2007 em comparação com a faixa dos valores medidos no monitoramento, entre 2006 e 2012, indicando que a mesma apresenta ordem de grandeza compatível com as medidas em campo.



Figura 5.12 – Localização ADCP – Píer CEPSUL

Tabela 5.3 – Média das velocidades de correntes no estuário do rio Itajaí-açu, próximo ao píer do CEPSUL, entre os anos de 2006 e 2012. Fonte: Centro de Ciências Tecnológicas da Terra e do Mar, 2012.

Ano	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
2006	-	-	0,19	-	0,33	-	-	-	0,4	-	0,26	-
2007	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,22	0,22
2008	-	0,42	0,23	0,34	0,35	0,29	-	-	0,46	0,51	0,93	0,59
2009	0,68	0,33	-	-	-	-	-	0,3	0,5	0,67	-	-
2010	-	0,38	0,53	-	-	-	-	0,35	-	0,22	-	-
2011	0,35	0,24	0,32	0,42	0,32	0,27	0,43	0,5	0,47	0,32	0,31	0,22
2012	0,5	0,24	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-



Figura 5.13 – Comparação - Velocidade de Corrente Modelada X Medições - Píer CEPSUL

Foi realizada uma simulação incluindo o efeito dos ventos, extraídos do modelo global NCEP/NCAR (National Centers for Environmental Prediction / National Center for Atmospheric Research), que é forçado a partir de observações meteorológicas obtidas de navios, aviões, estações meteorológicas e satélites (KALNAY, KANAMITSU, *et al.*, 1996), para comparação entre as velocidades de corrente para o caso sem vento e o caso considerando o efeito de vento. Os dados foram extraídos do ponto ilustrado na Figura 5.14 e o vento foi forçado uniformemente ao longo de toda a área do modelo.



Figura 5.14 - Localização - Ponto de extração dos dados de vento NCEP/NCAR

A Figura 5.15 apresenta o resultado desta comparação para a localização do ADCP da CEPSUL (Figura 5.12), ilustrando que os efeitos do vento para as velocidades de corrente são desprezíveis, assim como observado por Schettini (2002). Deste modo, o vento foi desconsiderado nas simulações de transporte de sedimentos.



Figura 5.15- Comparação – Efeitos do Vento no Escoamento. Vermelho: Com vento. Azul: Sem vento
A calibração da salinidade foi realizada com referência nas medições realizadas por Schettini (2002), conforme apresentado anteriormente na Figura 5.7. Para comparação, foi traçado um perfil longitudinal de 20 km ao longo do estuário (Figura 5.16), a partir do qual foram extraídos resultados do modelo numérico. A Figura 5.17 apresenta os resultados do modelo para uma vazão de 200 m<sup>3</sup>/s, para um instante de preamar, sendo a linha vermelha a salinidade na camada superficial e a linha azul a salinidade na camada de fundo.

A bacia de evolução do Complexo Portuário de Itajaí está localizada entre 3 e 5 km do perfil, delimitada pelas linhas verticais azuis, onde o modelo apresenta salinidade de 35 ppm na camada de fundo e entre 7 e 10 ppm na camada de superfície, sendo estes resultados condizentes com os valores apresentados por Schettini (2002) (Figura 5.7).



Figura 5.16 - Perfil longitudinal para avaliação da intrusão salina



A concentração de material em suspensão modelada foi avaliada a partir dos dados medidos no estudo realizado por Schettini (2002), conforme exposto na Figura 5.18. Foram extraídos dados do modelo em 11 pontos no interior da bacia de evolução do Complexo Portuário de Itajaí para comparação (Figura 5.19). A Figura 5.20 apresenta os resultados de concentração de material em suspensão do modelo para os pontos P1 a P11 na camada de fundo, enquanto a Figura 5.21 apresenta os mesmos resultados, mas para a camada superficial. Estes resultados foram extraídos para o período entre 25/04/2007 e 01/05/2007, quando a vazão medida em Indaial foi de aproximadamente 200 m<sup>3</sup>/s.



Figura 5.18 - Perfil longitudinal de concentração de material em suspensão (mg/L) ao longo do estuário do rio Itajaí-açu com descarga fluvial de 233 m³/s. Fonte: Schettini, 2002.



Figura 5.19 – Localização – Pontos na Bacia de Evolução



Figura 5.20 – Concentração de material em suspensão modelada na camada de fundo (kg/m³)



Figura 5.21 – Concentração de material em suspensão modelada na camada superficial (kg/m³)

Os pontos analisados, de modo geral, apresentaram concentrações junto ao fundo entre 100 e 200 mg/L, se aproximando dos valores observados em campo (Figura

5.18) para uma vazão semelhante do rio Itajaí-açu, na bacia de evolução do Complexo Portuário de Itajaí. A concentração de material em suspensão na superfície modelada variou entre 10 e 90 mg/L, também de acordo com a ordem de grandeza observada por Schettini (2002).

# 6. RESULTADOS

# 6.1. SUPERFÍCIES COMPARATIVAS

As figuras abaixo ilustram as superfícies comparativas construídas a partir dos pares de levantamentos batimétricos utilizados.







A análise das superfícies comparativas indica grande variabilidade de espessura da camada existente entre os refletores de alta e baixa frequência. É possível notar que em 15/05/2007 e 05/11/2007 a camada de lama fluida apresenta espessuras mais significativas na maior parte da área, quando comparadas aos demais levantamentos.

Na superfície comparativa realizada a partir dos levantamentos de 15/05/2007 é possível observar áreas em que a camada de lama fluida apresenta espessura superior a 2,5m, sendo que, na maior parte da bacia de evolução do Complexo Portuário de Itajaí, esta camada apresenta espessura superior a 1 m. A partir da superfície comparativa realizada com os levantamentos do dia 05/11/2007, é possível observar que a camada de lama fluida apresenta espessura de 1 m a 1,5 m na maior parte da área.

Quanto às superfícies comparativas realizadas a partir dos demais levantamentos (30/03/2007 e 12/07/2007), é possível observar camadas de lama fluida menos significativas, apresentando espessura de até 0,5m na maior parte da bacia de evolução do Complexo Portuário de Itajaí em ambas as datas.

## 6.2. PERFIS DE MASSA ESPECÍFICA

Os resultados relativos à correlação linear realizada entre as profundidades obtidas na ecossondagem de baixa frequência (33 kHz) e as profundidades correspondentes às massas específicas de 1150, 1200 e 1250 kg/m<sup>3</sup> estão expostos na Tabela 6.1. Ressalta-se que, para comparação com os perfis densimétricos realizados no mês de abril de 2007, foi utilizada a batimetria realizada em 30/03/2007. Quanto mais o valor de R<sup>2</sup> se aproxima de 1, melhor a correlação entre profundidades.

Tabela 6.1 - Valores de R<sup>2</sup> obtidos a partir da correlação entre as profundidades encontradas no levantamento batimétrico de 33kHz e as profundidades correspondentes às massas específicas de 1150. 1200 e 1250 kg/m<sup>3</sup>

Correlação - Massa Específica x Batimetria						
Deríode (Ceresetus ão	R <sup>2</sup>					
Periodo/Concentração	1150 kg/m³	1200 kg/m³	1250 kg/m³			
abr/07	0,0105	0,0557	0,0999			
mai/07	0,4731	0,7412	0,7641 0,1559			
jul/07	0,5429	0,5033				
nov/07	0,8045	0,789	0,0014			

De maneira geral, é possível observar que os melhores valores de R<sup>2</sup> foram encontrados na correlação entre as profundidades obtidas com a ecossondagem de baixa frequência e a profundidade em que ocorrem as massas específicas de 1150 kg/m<sup>3</sup> e 1200 kg/m<sup>3</sup>. É possível observar que para os meses de julho e novembro de 2007, a cota em que foi encontrada massa específica de 1150 kg/m<sup>3</sup> apresenta melhor correlação com a cota obtida com ecobatímetro de 33kHz. Ademais, nota-se que, em maio de 2007 as cotas em que foram encontradas as massas específicas de 1200 kg/m<sup>3</sup> e 1250 kg/m<sup>3</sup> apresentam valor de R<sup>2</sup> semelhante quando relacionadas às cotas obtidas no levantamento batimétrico de baixa frequência. Quanto ao levantamento de perfis densimétricos realizados em abril de 2007, observa-se que não há boa correlação das cotas obtidas a partir dos valores adotados de massa específica com as cotas observadas no levantamento batimétrico de 33kHz.

Os gráficos ilustrados nas Figuras Figura 6.5 a Figura 6.7 apresentam as melhores correlações obtidas para os meses de maio, julho e novembro de 2007, já que para o mês de abril, as correlações não foram satisfatórias.



Figura 6.5 - Correlação entre cotas - Maio/2007



Figura 6.6 - Correlação entre cotas - Julho/2007



Figura 6.7 - Correlação entre cotas – Novembro/2007

## 6.3. MODELAGEM NUMÉRICA

## 6.3.1. Estimativa de volumes de dragagem realizada

Para auxílio na análise da variação sazonal da camada de lama fluida, foram estimados os volumes de dragagem para o Complexo Portuário de Itajaí, com base nos volumes de sedimentos aportados na bacia de evolução. Este volume foi calculado a partir do transporte de sedimentos total modelado ao longo do ano de 2007, considerando a seção transversal ilustrada na Figura 6.8.



Figura 6.8 – Seção Transversal para Avaliação do Transporte de Sedimentos

A Tabela 6.2 apresenta o histórico de volumes de dragagem para o Porto de Itajaí entre 1958 e 2011, apresentado pela Superintendência do Porto de Itajaí e obtido junto à ANTAQ (Agência Nacional de Transportes Aquaviários). A partir de 1999, a dragagem de manutenção do Complexo Portuário de Itajaí foi realizada por meio do método de injeção de água, de modo que os volumes dispostos na tabela são estimados e não medidos a partir dos volumes em cisternas das dragas (AGÊNCIA NACIONAL DE TRANSPORTES AQUAVIÁRIOS - ANTAQ, 2010).

## Tabela 6.2 - Histórico de Dragagens no Porto de Itajaí. Fonte: ANTAQ, 2016

SUPERINTENDÊNCIA DO PORTO DE ITAJAÍ HISTÓRICO DE DRAGAGENS NO PORTO DE ITAJAÍ - PERÍODO DE 1958 a 2011

1958	Druguuo	d	Origem aos Kecursos	e	d	Tolerância	d	Classificação	Obs:
	200,000.00	m³	Ministério dos Transportes	6.50	m	0.50	m	Manutenção	Canal Ext
1971	120,989.00	m³	Ministério dos Transportes	6.00	m	0.50	m	Manutenção	Bacia
1971	174,100.00	m³	Ministério dos Transportes	6.00	m	0.50	m	Manutenção	Canal Int
1971	196,800.00	m³	Ministério dos Transportes	6.00	m	0.50	m	Manutenção	Canal Ext
1972	1,034.00	m³	Ministério dos Transportes	6.00	m	0.50	m	Manutenção	Bacia
1972	45,000.00	m³	Ministério dos Transportes	6.00	m	0.50	m	Manutenção	Canal Int
1978	531,378.00	m³	Ministério dos Transportes	7.00	m	0.50	m	Aprofundamento	Canal Ext
1978	396,164.00	m³	Ministério dos Transportes	7.00	m	0.50	m	Manutenção	Canal Int
1978	358,133.00	m³	Ministério dos Transportes	7.00	m	0.50	m	Manutenção	Bacia
1980	43,147.00	m³	Ministério dos Transportes	8.00	m	0.50	m	Aprofundamento	Canal Ext
1980	232,772.00	m³	Ministério dos Transportes	8.00	m	0.50	m	Manutenção	Canal Int
1980	197,999.00	m³	Ministério dos Transportes	8.00	m	0.50	m	Manutenção	Bacia
1982	241,004.00	m³	Ministério dos Transportes	8.05	m	0.50	m	Aprofundamento	Bacia
1982	237,058.00	m³	Ministério dos Transportes	8.05	m	0.50	m	Manutenção	Canal Int
1982	106,573.00	m³	Ministério dos Transportes	8.05	m	0.50	m	Manutenção	Canal Ext
1989	172,000.00	m³	Ministério dos Transportes	8.05	m	0.50	m	Manutenção	-
1990	1,596,694.00	m³	Ministério dos Transportes	8.10	m	0.50	m	Aprofundamento	-
1991	528,512.00	m³	Próprios	8.10	m	0.50	m	Aprofundamento	-
1992	842,610.97	m³	Próprios	8.10	m	0.50	m	Manutenção	-
1993	841,180.00	m³	Próprios	8.10	m	0.50	m	Manutenção	-
1994	53,927.00	m³	Próprios	8.10	m	0.50	m	Manutenção	-
1995	796,870.00	m³	Próprios	8.10	m	0.50	m	Manutenção	-
1996	2,250,000.00	m³	Próprios	8.15	m	0.50	m	Manutenção	-
1997	898,787.00	m³	Próprios	8.15	m	0.50	m	Manutenção	-
1998	1,500,000.00	m³	Próprios	9.15	m	0.50	m	Aprofundamento	-
1998	1,102,530.00	m³	Próprios	10.00	m	0.50	m	Manutenção e	Man:1102530 Aprof:2177470
1999	1,234,345.21	m³	Próprios	10.00	m	0.50	m	Manutenção	Canal Ext, Int e Bacia
2000	2,000,000.00	m³	Próprios	10.00	m	0.50	m	Manutenção	Canal Ext, Int e Bacia
2001	1,870,000.00	m³	Próprios	10.00	m	0.50	m	Manutenção	Canal Ext, Int e Bacia
2002	1,800,000.00	m³	Próprios	10.00	m	0.50	m	Manutenção	Canal Ext, Int e Bacia
2003	1,893,750.00	m³	Próprios	10.00	m	0.50	m	Manutenção e	Man:1800000 Aprof:93750
2004	1,850,430.04	m³	Próprios	10.00	m	0.50	m	Manutenção	Canal Ext, Int e Bacia
2005	1,800,000.00	m³	Próprios	10.00	m	0.50	m	Manutenção	Canal Ext, Int e Bacia
2006	4,373,679.00	m <sup>3</sup>	Próprios/DNIT	11.00 e 12.00	m	0.30	m	Manutenção e	Manutenção (próprios):1102530 /
			1					Aprotundamento	Aprolundamento(DN11):28/36/ 9
2007	2,000,000.00	m³	Próprios	11,00 e 12,00	m	0.30	m	Manutenção	Canal Ext, Int e Bacia
2008	2,200,000.00	m³	Próprios	11,00 e 12,00	m	0.30	m	Manutenção	Canal Ext, Int e Bacia
2009	3,500,000.00	m³	Secretaria de Portos e Próprios	10,50 e 11,30	m	0.30	m	restabelecimento de prof assoreamento das enchentes	próprios (manutenção): 1.000.000m <sup>3</sup> e SEP(restabelecimento): 2.500.000m <sup>3</sup>
2010	2,000,000.00	m³	Próprios	10,50 e 11,30	m	0.30	m	Manutenção	Canal Ext, Int e Bacia
2011	8,200,000.00	m³	Próprios e Secretaria de Portos	14,00 e 14,50	m	0.30	m	Manutenção, Aprofundamento e restabeleciemnto de prof. Das enchentes	Próprios (manutenção): 350.000m³, SEP(aprofundamento): 6.200.000m³, SEP(restabelecimento): 1660.000-3

Obs: Os volumes de dragagem de manutenção de 1999 a março 2011 são estimativos em função do método constante e contínuo de dragagem utilizado, conhecido como Injeção de Água.

Atualizado em 17/11/11



O modelo estima que aproximadamente 1.500.000 m<sup>3</sup> de material aportou na região de interesse ao longo de 2007, respeitando a ordem de grandeza do volume de dragagem estimado pela superintendência do Porto. É importante destacar que a maior parte deste aporte ocorreu entre o fim do mês de maio e a segunda quinzena do mês de junho de 2007. A Tabela 6.3 apresenta os resultados obtidos para os períodos entre os levantamentos batimétricos analisados.

Volumes Aportados Entre Batimetrias(m <sup>3</sup> ) - Modelo						
Período	Volume Aportado (m <sup>3</sup> )	% do Total Anual				
30/03/2007 - 15/05/2007	8.159	1%				
15/05/2007 - 12/07/2007	816.378	60%				
12/07/2007 - 05/11/2007	242.320	18%				

Tabela 6.3 – Volumes Aportados Entre Batimetrias – Resultados de Modelo

#### 6.3.2. Padrões hidrossedimentológicos

A Figura 6.10 apresenta a variação do nível d'água no Complexo Portuário de Itajaí e a concentração média de material em suspensão modelada para a bacia de evolução na camada de fundo e na camada de superfície, considerando os 11 pontos selecionados para a avaliação desta concentração, conforme a Figura 5.19. Já a Figura 6.11 e a Figura 6.12 apresentam também a concentração média de material em suspensão modelada, mas comparada com as vazões líquida e sólida afluentes à bacia de evolução do Complexo Portuário de Itajaí, respectivamente. Quanto aos gráficos de vazão, esclarece-se que valores positivos de vazão indicam que o escoamento flui no sentido de vazante, enquanto vazões negativas indicam que o escoamento ocorre estuário acima. As concentrações modeladas estão dispostas no gráfico de acordo com o eixo secundário.



Figura 6.10 – Variação do Nível d'água e Concentração Média de Material em Suspensão na Bacia de Evolução do Complexo Portuário de Itajaí



Figura 6.11 - Variação da Vazão Líquida Afluente e Concentração Média de Material em Suspensão na Bacia de Evolução do Complexo Portuário de Itajaí



Figura 6.12 - Variação da Vazão Sólida Afluente e Concentração Média de Material em Suspensão na Bacia de Evolução do Complexo Portuário de Itajaí

Destes resultados, observa-se que a concentração de material em suspensão, tanto na camada superficial como na camada junto ao fundo não apresenta estreita relação com os ciclos de maré, sendo que não há concordância direta entre os picos de concentração e os períodos de sizígia e quadratura.

Quando comparadas às vazões fluviais, as concentrações de material em suspensão na camada superficial apresentam aumento quando a vazão afluente supera aproximadamente 400 m<sup>3</sup>/s, alcançando aproximadamente 0,1 kg/m<sup>3</sup>. No entanto, não se observa relação entre as concentrações de material em suspensão junto ao fundo e as vazões fluviais.

A concentração de material em suspensão na camada superficial é diretamente relacionada à vazão sólida afluente à bacia de evolução do Complexo Portuário de Itajaí, como se pode observar, principalmente, no período próximo ao dia 30/04/2007, em que há um pico de vazão sólida, acompanhado por um aumento da concentração de material em suspensão na camada superficial. Já na camada de fundo, observa-se que o aumento da concentração é gradual e ocorre após o pico de descarga sólida, de modo que há um intervalo de tempo entre a chegada do material em suspensão e sua queda até as camadas de fundo. Deste modo, a análise da evolução da camada de lama fluida na área de interesse foi baseada neste parâmetro.

A análise da evolução da camada de lama fluida foi baseada em simulações mensais sendo elas entre 15/03/2007 e 15/04/2007, entre 01/05/2007 e 01/06/2007, entre 28/06/2007 e 28/07/2007 e entre 20/10/2007 e 20/11/2007.

As figuras abaixo apresentam os resultados simulados para vazão sólida descarregada na bacia de evolução do Complexo Portuário de Itajaí e concentração de material em suspensão, tanto no fundo, como na superfície, para as simulações mencionadas, considerando os períodos mais próximos aos dias em que foram realizados os levantamentos batimétricos de dupla frequência.



Figura 6.13 - Vazão Sólida e Concentração de Material em Suspensão - Março/2007



Figura 6.14 - Vazão Sólida e Concentração de Material em Suspensão - Maio/2007





Para o levantamento realizado no dia 30/03/2007, destacam-se os baixos valores de descarga sólida e concentração de material em suspensão, tanto no fundo como na superfície. Já para o período próximo ao dia 15/05/2007, observa-se um acréscimo

nas concentrações de material em suspensão junto ao fundo, acompanhando a tendência indicada pela vazão sólida no mesmo período.

No mês de julho, no período imediatamente anterior ao dia 12/07/2007, dia em que foi realizada a sondagem batimétrica de dupla frequência, o modelo indica um pico de descarga sólida na área de interesse e, consequentemente, elevados valores de material em suspensão, principalmente junto ao fundo da área de interesse.

No período próximo ao dia 05/11/2007, foram medidas as maiores vazões para o ano de 2007 no rio Itajaí-açu, provocando um pico de descarga sólida e, consequentemente, elevados valores de concentração de material em suspensão na bacia de evolução do Complexo Portuário de Itajaí, tanto no fundo como na superfície.

# 7. ANÁLISES E DISCUSSÕES

As superfícies comparativas concebidas a partir dos levantamentos batimétricos de dupla frequência indicaram que os levantamentos realizados em 15/05/2007 e 05/11/2007 apresentaram camada de lama fluida mais espessa que os demais, sendo que, em algumas regiões no interior da área de interesse, foram encontradas espessuras de aproximadamente 2,5 m. Em 30/03/2007 e 12/07/2007, a camada de lama fluida na região da bacia de evolução do Complexo Portuário de Itajaí apresentou espessura de até 0,5 m na maior parte da área.

A partir dos resultados modelados, observou-se que a principal condicionante ambiental para aumento da concentração de material em suspensão na área de interesse, tanto junto ao fundo como próxima à superfície, é a descarga sólida. A descarga sólida é função da concentração de material em suspensão e da vazão fluvial concomitantemente, de modo que o aumento de apenas uma destas variáveis não necessariamente corresponde a um aumento do aporte sedimentar, caso haja diminuição da outra variável. No entanto, é possível, também, que elevadas velocidades de escoamento provoquem remobilização do material do fundo já existente na bacia, aumentando a concentração de material em suspensão independentemente do aporte sedimentar à área de interesse.

Para o levantamento realizado no dia 30/03/2007, em que foi observada camada de lama fluida pouco expressiva, destacam-se os baixos valores de descarga sólida e concentração de material em suspensão, tanto no fundo como na superfície (< 0,1 kg/m<sup>3</sup>), justificando a espessura reduzida da camada de lama fluida. Os resultados da simulação numérica para o período próximo à sondagem batimétrica realizada em 15/05/2007, indicam um acréscimo nas concentrações de material junto ao fundo no período próximo a este dia, justificando a camada mais expressiva de lama fluida encontrada nos levantamentos de dupla frequência.

No mês de julho, no período imediatamente anterior ao dia 12/07/2007, dia em que foi realizada a sondagem batimétrica de dupla frequência, o modelo indica um pico de descarga sólida na área de interesse e, consequentemente, elevados valores de material particulado em suspensão. Este resultado modelado não é coerente com o

apresentado no levantamento de campo, sendo que, neste levantamento, a camada entre os refletores de alta e baixa frequência apresenta espessura no máximo da ordem de 0,5 m em toda a bacia de evolução.

No entanto, é importante destacar que, para o período entre 15/05/2007 e 12/07/2007, foi estimado aporte sedimentar de aproximadamente 815.000 m<sup>3</sup> de sedimentos, representando cerca de 60% do volume aportado ao longo de todo o ano analisado. Deste modo, considera-se que os esforços de dragagem nos espaços náuticos do Complexo Portuário de Itajaí foram mais intensos neste período. Assim, é possível atribuir a incongruência encontrada nos resultados do modelo a esta interferência.

Salienta-se, também, que a questão da dragagem é um limitante para a análise referente também aos demais levantamentos. A cronologia destes procedimentos pode afetar os resultados apresentados, já que o modelo não representa este efeito. A dragagem na área de interesse é realizada por meio de jateamento de água no fundo, visando a remobilização de material, e neste caso não pode ser representada como simples remoção de material do fundo, uma vez que é possível que os procedimentos realizados inclusive aumentem a concentração de material em suspensão junto ao mesmo.

Quanto aos levantamentos dos perfis densimétricos, obteve-se melhor correlação com as massas específicas 1150 kg/m<sup>3</sup> e 1200 kg/m<sup>3</sup> representando o refletor do ecobatímetro de 33 kHz. Neste caso, destaca-se que os levantamentos foram realizados em datas distintas à realização das batimetrias e, assim, diminui-se a precisão da análise. Como o comportamento reológico e hidrossedimentológico do material de fundo é dinâmico, a proximidade cronológica dos levantamentos é fundamental.

## 8. CONSIDERAÇÕES FINAIS E CONCLUSÕES

Em um cenário de incremento nos calados dos navios e aumento, principalmente, das demandas de exportação de produtos brasileiros, a navegação em lama fluida, considerando o conceito de fundo náutico, prática comum em importantes regiões portuárias europeias, como Zeebrugge e Rotterdam, apresenta-se como uma possibilidade economicamente atraente. Os procedimentos de dragagem em fundos lamosos podem apresentar baixa eficiência e, assim, podem onerar os operadores portuários de maneira expressiva, sem que se atinja a eficácia desejada na manutenção das cotas de gabarito nos espaços náuticos.

A aplicabilidade do conceito do fundo náutico depende, também, mandatoriamente, da aceitação por parte da Autoridade Marítima, de modo que as profundidades consideradas na homologação de calados máximos permitidos para determinadas regiões portuárias sejam definidas à luz deste conceito, considerando, evidentemente, a segurança da navegação. Foram destacadas diversas áreas portuárias brasileiras cujos padrões hidrossedimentológicos propiciariam a aplicação deste conceito, podendo apresentar ganhos econômicos significativos.

Especificamente, quanto à área da bacia de evolução do Complexo Portuário de Itajaí, objeto de estudo deste trabalho, notou-se que a camada de lama fluida apresenta variações expressivas. Nos levantamentos realizados em maio e novembro de 2007, foram encontradas regiões em que a camada de lama fluida superou 2,5 metros, enquanto os levantamentos realizados nos meses de março e julho, a camada de lama fluida não apresentou espessura superior a 0,5 metros na maior parte da região de interesse.

A partir da modelagem numérica de transporte de sedimentos, foi possível associar as variações na camada de lama fluida à vazão sólida aportada à bacia de evolução deste complexo portuário, sendo que esta pode provocar incremento significativo na concentração de material em suspensão. Um aumento na vazão sólida provoca um incremento concomitante na concentração de material em suspensão nas camadas superficiais, sendo que o aumento desta concentração junto ao fundo ocorre com certo atraso, até que o material se deposite ao longo da coluna d'água. Estes efeitos puderam ser observados com clareza nos períodos próximos aos levantamentos realizados em março, maio e novembro de 2007.

O período próximo ao levantamento realizado em julho de 2007 foi o único a não apresentar coerência com os padrões observados para os demais levantamentos. Este fato foi atribuído à dragagem de injeção de água realizada nos espaços náuticos do Complexo Portuário de Itajaí, estimada em dois milhões de metros cúbicos para o ano de 2007. A partir da modelagem, estimou-se que aproximadamente 60% do aporte anual à bacia de evolução ocorreu no período entre o final de maio e o fim do mês de junho de 2007, sendo que, assim, conclui-se que os procedimentos de dragagem devem ter sido realizados com mais frequência neste período, comprometendo os padrões hidrossedimentológicos analisados.

Quando comparadas às cotas obtidas nos levantamentos batimétricos de baixa frequência, as massas específicas de 1.150 kg/m<sup>3</sup> e 1.200 kg/m<sup>3</sup> apresentaram melhor correlação, sendo estes os valores que mais devem se aproximar da densidade de referência para definição do Fundo Náutico para a região do Complexo Portuário de Itajaí, sendo estes valores muito próximos de densidades de referência utilizadas mundialmente em áreas portuárias com fundo lamoso. A variação observada nos valores ideais de massa específica crítica era esperada, uma vez que as características da lama se alteram por efeito de sazonalidade e em função da dragagem por injeção de água.

No entanto, é importante salientar as limitações desta análise. A área da bacia de evolução do Complexo Portuário do Itajaí é sujeita à dragagem para manutenção de cotas por injeção de água e não se dispõe de uma cronologia exata da execução deste procedimento, apenas uma estimativa global de volume removido da área de estudo. Deste modo, as intervenções da draga podem ter impacto nas conclusões aqui apresentadas.

Além disso, quanto à análise de perfis densimétricos em correlação com as cotas da ecossondagem de baixa-frequência, é importante destacar que os perfis densimétricos foram coletados em datas diferentes às datas em que foram realizadas as batimetrias, podendo causar imprecisões nos resultados.

Por fim, o modelo computacional utilizado foi calibrado com dados presentes na bibliografia e em modelos globais, não se dispondo de medições contínuas de dados

de campo, especificadas para este tipo de estudo e ideais para os ajustes dos parâmetros físicos do modelo. A partir de um conjunto mais robusto de levantamentos de campo é possível que o modelo apresente maior precisão quantitativa, possibilitando, assim, estimativas de maior acurácia.

Cabe, também, destacar que para complementação deste trabalho, ainda seria necessária a realização de um estudo multidisciplinar da região, contendo amplo conjunto de ensaios de manobras de navios, tanto *fast-time* como *real-time*, em diferentes condições hidrodinâmicas consideradas críticas para a operação do terminal. Além disto, é requerido que estes ensaios sejam realizados considerando diferentes folgas sob a quilha, com o objetivo de se identificar quais as situações mais favoráveis e mais críticas sob a óptica das manobras de navios.

Por fim, ressalta-se também a importância da realização de simulações em modelos físicos reduzidos, com embarcações em escala e representação do fundo conforme a situação real, para avaliação dos principais processos que provocam as interações entre a embarcação e o fundo, inclusive visando a adequada representação destes fenômenos nos modelos computacionais de manobras.

## 9. PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS

Considerando os conceitos expostos e os resultados obtidos, apresentam-se as seguintes propostas para continuidade das atividades deste estudo:

- Refinamento da modelagem computacional realizada, a partir de medições em campo contínuas de velocidades de corrente (ADCP), níveis d'água (marégrafo) e, também, de concentração de material em suspensão no interior da bacia de evolução do Complexo Portuário de Itajaí, para realização de uma calibração baseada em dados de campo, de modo a aumentar a precisão da estimativa de transporte e, também, dos processos hidrodinâmicos avaliados;
- Realização de densimetrias e levantamentos de dupla frequência em dias coincidentes, de modo que a avaliação da correlação entre as ecossondagens e a massa específica no fundo seja mais precisa, estabelecendo-se um valor de massa específica crítica para a região. É importante lembrar que este procedimento deve ser sazonalmente repetido devido à variabilidade das características do fundo;
- Realização de ensaios em modelos físicos reduzidos, a fim de se estudar os efeitos da interação entre o fundo e a embarcação em diferentes condições de folga sob a quilha;
- Ainda em modelos físicos reduzidos, há a possibilidade da realização de simulações de manobras, a partir da utilização do SIAMA, Simulador Analógico de Manobras, desenvolvido no Laboratório de Hidráulica da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (BERNARDINO, 2015). Estas simulações poderiam ser realizadas considerando uma representação em escala do fundo real, considerando diferentes situações de folga sob a quilha, a fim de verificar as possíveis adversidades no controle e manobrabilidade das embarcações. Este modelo seria calibrado a partir de dados hidrodinâmicos obtidos do modelo computacional;

Simulações em simuladores numéricos de manobras, tanto do tipo real-time, como fast-time, a fim, também, de auxiliar nos possíveis efeitos do fundo nas manobras realizadas. Estes modelos devem ser adaptados a partir dos resultados dos modelos físicos, de modo que representem adequadamente os efeitos hidrodinâmicos das folgas sob a quilha adotadas para as simulações.

Acredita-se que, a partir deste robusto conjunto de estudos, seria possível a homologação junto às autoridades marítimas do conceito de fundo náutico não só para a região do Complexo Portuário de Itajaí, mas também para qualquer região portuária em que seja desejável a aplicação deste conceito.

## 10. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA NACIONAL DE TRANSPORTES AQUAVIÁRIOS - ANTAQ, 2010. Disponivel em: <a href="http://www.antaq.gov.br/>">http://www.antaq.gov.br/>. Acesso em: Setembro 2016.</a>

ALFREDINI, P.; ARASAKI, E. Engenharia Portuária. São Paulo: Edgard Blucher, 2014. 1307 p.

BERNARDINO, J. C. D. M. Abordagem experimental para avaliação de manobras de navios em modelos físicos de espaços náuticos. São Paulo: Escola Politécnica - Universidade de São Paulo, 2015. 302 p.

CENTRO DE CIÊNCIAS TECNOLÓGICAS DA TERRA E DO MAR - CTTMAR. Monitoramento Ambiental do Estuário do Rio Itajaí-açu na Área de Influência do Porto de Itajaí - Síntese dos Sub-programas de Monitoramento Ambiental Entre 2006 e 2012. Universidade do Vale do Itajaí. Itajaí, p. 93. 2012.

CENTRO DE CIÊNCIAS TECNOLÓGICAS DA TERRA E DO MAR. Monitoramento Ambiental do Estuário do Rio Itajaí-Açu na Área de Influência. Universidade do Vale do Itajaí. Itajaí, p. 93. 2012.

CHM - CENTRO DE HIDROGRAFIA DA MARINHA, 06 Março 2015. Disponivel em: <a href="http://www.mar.mil.br/dhn/chm/box-cartas-raster/raster\_disponiveis.html">http://www.mar.mil.br/dhn/chm/box-cartas-raster/raster\_disponiveis.html</a>. Acesso em: 06 Março 2015.

CLAEYS, S. Evaluation and combination of techniques used to determine the **Nautical Bottom - A call for rheology based instruments**. Evolutions in hydrography. Antuérpia, Bélgica. 2006. p. 141-144.

COLLEGE OF EARTH, OCEAN AND ATMOSPHERIC SCIENCES - OREGON STATE UNIVERSITY (OSU). The OSU TOPEX/Poseidon Global Inverse Solution TPXO, 2010. Disponivel em: <a href="http://volkov.oce.orst.edu/tides/global.html">http://volkov.oce.orst.edu/tides/global.html</a>. Acesso em: Outubro 2016.

DELEFORTRIE, G. Manoeuvring Behaviour of Container Vessels. Gante, Bélgica, 2007. 294 p.

DELEFORTRIE, G. et al. Evaluation of Safety of Navigation in Muddy Areas through Real-Time Maneuvering Simulation. Journal Of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering - ASCE, v. 133, p. 125-135, 2007.

DELEFORTRIE, G.; VANTORRE, M.; ELOOT, K.; VERWILIGEN, J.; LATAIRE, E. Squat prediction in muddy navigation areas. **Ocean Engineering**, v. 37, p. 1464-1476, Setembro 2010.

DELTARES. Delft3D-FLOW - Simulation of multi-dimensional hydrodynamics flows and transport phenomena, including sediments. User Manual. Delft: Deltares, 2014. 712 p.

DÖBEREINER, C. E. Sedimentação no estuário do rio Itajaí, SC. Congresso Latino Americano de Hidráulica. Rio de Janeiro, 1986. p. 1-10.

DYER, K. R. Sediment Transport Processes in Estuaries. In: PERILLO, G. M. E. **Geomorphology and Sedimentology of Estuaries**. Elsevier Science, v. 53, 1995. Cap. 14, p. 423-449.

ELFRINK, B. et al. **Porto de Santos - Modelagem do Transporte de Sedimentos**. Danish Hydraulics Institute - DHI. p. 43. 2008.

FEMAR - FUNDAÇÕES DE ESTUDOS DO MAR, 06 Março 2015. Disponivel em: <a href="http://www.fundacaofemar.org.br/">http://www.fundacaofemar.org.br/</a>. Acesso em: 06 Março 2015.

FERREIRA, T. R. S. Ocorrência de Lama Fluida no Porto de Santos. Rio de Janeiro, 2013. 96 p.

FERZIGER, J. H.; PERIC, M. **Computational Methods for Fluid Dynamics**. 3<sup>a</sup>. ed. Berlim, Alemanha: Springer, 2002. 431 p.

FUHRHOP, H. Sediment Management in the Mississipi River - Impact of sediment diversions on the Lower Mississipi River. Delft: Delft University of Techonolgy (TU Delft), 2013.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS HIDROVIÁRIAS - INPH. Parecer Técnico Sobre a Inclusão de Camada de Silte de Baixa Densidade como Profundidade Náutica. Portobrás. Rio de Janeiro, p. 17. 1986. (24/86 (INPH)). KALNAY, E. et al. The NCEP/NCAR 40-Year Reanalysis Project. Bulletin of the American Meteorological Society, 77, n. 3, Março 1996. 437-471.

KINEKE, G. C.; STERNBERG, R. W. Distribution of fluid muds on the Amazon continental shelf. International Journal of Marine Geology, Geochemistry and Geophysics, n. 125, p. 193-233, 1995.

KRANENBURG, C.; WINTERWERP, J. C. Erosion of Fluid Mud Layers. I: Entrainment Model. **Journal of Hydraulic Engineering**, n. 123, Junho 1997. 504-511.

MALHERBE, B. **Towards a definition of the nautical bed in mud deposits:** The concept of rheologic transition, RT. International Workshop On Cohesive Sediments: Towards a Definition of "Mud". Bruxelas, Bélgica: Royal Belgium Institute For Natural Sciences. 1990. p. 54-57.

MARTENS, C. et al. Improving the Nautical Acess to Zeebrugge Harbor: A Multidisciplinary Study. International Conference on Coastal Engineering (ICCE 2012), Santander, Espanha, 1-6 Julho 2012. 10.

MCANALLY, W. H. et al. Management of Fluid Mud in Estuaries, Bays, and Lakes: Present State of Undersanding on Character and Behavior. **Journal of Hydraulic Engineering**, v. 133, p. 9-38, Janeiro 2007.

MCLAUGHLIN, R. T. Settling Properties of Suspension. **Transactions**, 126, 1961. 1734-1786.

MEDEIROS, A. D. A influência da máre e da batimetria sobre a intrusão salina no estuário do rio Itajaí-açu. Rio de Janeiro, 2003.

MEHTA, A. J. et al. Cohesive Sediment Transport. Journal of Hydraulic Engineering, 1989. 1076-1112.

MEHTA, A. J. et al. Fluid Mud Properties in Nautical Depth Estimation. **Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering**, n. 140, p. 210-222, Março/Abril 2014. PARTHENIADES, E. **Cohesive Sediments in Open Channels**. 1. ed. Burlington, EUA: Elsevier, 2009. 358 p.

PIANC. Harbour Approach Channels Design Guidelines, 2014. 322 p.

PORTO ITAJAÍ, 06 Março 2016. Disponivel em: <www.portoitajai.com.br>. Acesso em: 2016.

SCHETTINI, C. A. F. Caracterização Física do Estuário do Rio Itajaí-açu, SC. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 7, n. 1, p. 123-142, Março 2002.

SCHETTINI, C. A. F. et al. A snapshot of suspended sediment and fluid mud occurrence in a mixed-energy embayment, Tijucas Bay, Brazil. **Geo-Marine Letters**, 2010. 47-62.

SCHETTINI, C. A. F.; TRUCCOLO, E. C. Circulação do baixo estuário do Rio Itajaí. In: JOAQUIM OLINTO BRANCO, M. J. L.-B. **Estuário do Rio Itajaí-açu, Santa Catarina:** caracterização ambiental e alterações antrópicas. Itajaí, SC: Editora UNIVALI, 2009. Cap. 1, p. 312.

SEIFERT, A. In situ detection and characterisation of fluid mud and soft cohesive sediments by dynamic piezocone penetrometer testing. Bremen, 2010. 180 p.

TANNEHILL, J. C.; ANDERSON, D. A.; PLETCHER, R. H. **Computational Fluid Mechanics and Heat Transfer**. 2<sup>a</sup>. ed. Washington, EUA: Taylor & Francis, 1997.

TRUCCOLO, E. C. Hidrodinâmica em Frequência Mareal e Submareal do Estuário do Rio Itajaí-açu, SC. Porto Alegre, 2009.

VANTORRE, M.; LAFORCE, E.; DELEFORTRIE, G. **A novel methodology for revision of the nautical bottom**. Flanders, a maritime region of knowledge (MAREDFlow). Flanders. 2006. p. 15-34.

VERSTEEG, H. K.; MALALASEKERA, W. An Introduction to Computational Fluid Dynamics - The Finite Volume Method. 2<sup>a</sup>. ed. Harlow: Pearson Education, 2007. 517 p.

WINTERWERP, J. C. et al. A conceptual framework for shear flow-induced erosion of soft cohesive sediment beds. **Journal of Geophysical Research**, v. 117, p. 17, Outubro 2012.

WURPTS, R.; TORN, P. 15 years experience with fluid mud: Definition of the Nautical Bottom Rheological Parameters. **Terra et Acqua**, p. 22-32, 2005.

YE, Q. Modelling of Cohesive Sediment Transportation, Deposition and Resuspension in the Haringvliet Mouth - MSc. Thesis. Delft: UNESCO-IHE - Institute for Water Education, 2006.