

## VI – ARTIGOS CIENTÍFICOS

# LAMA FLUIDA EM PORTOS E CANAIS DE NAVEGAÇÃO: A ABORDAGEM ADOTADA PARA O TERMINAL 2 DO PORTO DO AÇU (RJ)

*Juliane Castro Carneiro<sup>1</sup>  
Luiz Gustavo Cruz Henriques da Silva<sup>2</sup>  
Paulo Cesar Colonna Rosman<sup>3</sup>*

### RESUMO

Muitos portos e canais de navegação ao redor do mundo apresentam assoreamento e presença de lama fluida que podem causar reduções na profundidade náutica. Este artigo apresenta uma abordagem integrada do estudo das camadas lamosas em regiões portuárias, sendo enfatizada a camada lamosa na região do Porto do Açu, único complexo portuário privado em operação no país. A combinação dos perfis de densidade com dados reológicos, granulométricos, estudos em laboratório, uso de ecobatímetros de dupla frequência e modelagem hidrossedimentológica permitem estimar um potencial aumento de calado dependendo da localização, critério

---

<sup>1</sup> Oceanógrafa (UFPR). Mestre em Sistemas Costeiros e Oceânicos (UFPR). Doutora em Engenharia Oceânica (COPPE/UFRJ). Pós-doutoranda em Engenharia Costeira (COPPE/UFRJ). Oceanógrafa Sênior da Porto do Açu Operações S.A.

<sup>2</sup> Oficial de Náutica da Marinha Mercante (EFOMM/CIAGA). Engenheiro de Produção (DEIN/UERJ). Especialista em Gestão de Frota de Navios (LMA-UK). Mestrando em Estudos Marítimos (PPGEM/EGN). Gerente de Desenvolvimento Portuário da Porto do Açu Operações S.A.

<sup>3</sup> Engenheiro Civil / Recursos Hídricos (Poli/UFRJ). Mestre em Engenharia Oceânica (Coppe/UFRJ). Ph.D. em Coastal Engineering (Civil Engineering Department, Massachusetts Institute of Technology – MIT-USA). Professor Titular do Dept. Recursos Hídricos e Meio Ambiente da Escola Politécnica/UFRJ e da Área de Engenharia Costeira & Oceanográfica da COPPE/UFRJ.



de profundidade náutica e condições hidrodinâmicas. Espera-se que a combinação de técnicas e medições *in loco* permitam o desenvolvimento de ferramentas para navegação em lama fluida, com potencial aumento do calado, aprimorando a Segurança da Navegação. O artigo pretende fomentar o debate sobre o assunto, de forma a contribuir com o desenvolvimento de novos estudos, bem como com a normatização que, inevitavelmente, competirá à Autoridade Marítima no momento oportuno.

**Palavras-chave:** Lama Fluida; Navegação; Fundo Náutico; Modelagem; Portos.

## ABSTRACT

Many ports and navigation channels around the world have silting and the presence of fluid mud which can cause reductions in nautical depth. This article presents an integrated approach to the study of muddy layers in port regions, mainly the one discussed in Porto do Açu, the only private port complex in operation in the country. The combination of density profiles with rheological and grain size data, laboratory studies, use of dual-frequency echo sounders and sedimentological modeling allow estimating a potential increase in draft, depending on the location, nautical depth criteria and hydrodynamic conditions. It is expected that the combination of techniques and *in situ* measurements will allow the development of tools for navigation in fluid mud, with potential increase in the Safety of Navigation. The article intends to promote the debate to contribute to the development of new studies as well as to the standardization that, inevitably, will be up to the Maritime Authority at the appropriate time.

**Keywords:** Fluid mud; Navigation; Nautical bottom; Modelling; Ports.

## 1. INTRODUÇÃO

Diversas regiões portuárias apresentam substratos caracterizados pela presença de sedimentos coesivos, sendo aqui referidos como lama (Jiang & Zhao, 1989; De witt, 1995; McAnally *et al.*, 2007). Estes sedimentos coesivos são composições de sedimentos finos, matéria orgânica (MO), água e gases, cujo comportamento varia no tempo e espaço, sendo governados pela disponibilidade de sedimentos, condições meteorológicas e hidrodinâmicas, atividade biológica e demais fatores (Winterwerp & Van Kesteren, 2004; Carneiro, 2018).

Essas regiões lamosas podem apresentar uma camada de alta densidade acima do fundo consolidado, a qual pode alcançar centímetros a metros de espessura em condições promovidas pela hidrodinâmica local (Wurpts & Torn, 2005). O transporte de sedimentos coesivos tem sido estudado a partir de estudos de campo, experimentos laboratoriais e modelos matemáticos. Durante as últimas décadas, a acumulação de sedimentos coesivos e a formação de depósitos de lama fracamente consolidados, incluindo lama fluida, ganharam maior atenção (Becker, 2011), principalmente em regiões portuárias e canais de navegação.

Nesse contexto, está inserido o Porto do Açu, sendo um complexo portuário privado, localizado no município de São João da Barra, região norte do Estado do Rio de Janeiro, único complexo portuário privado em operação no país. Suas operações comerciais foram iniciadas em outubro de 2014 com o primeiro embarque de 80 mil toneladas de minério de ferro no navio “Key Light” com destino à China, realizado pela empresa Ferroport. Em franco crescimento desde então, segundo dados da Agência Nacional de Transportes Aquaviários (ANTAQ, 2022), o Porto do Açu movimentou 55,8 milhões de toneladas de cargas em 2021, volume inferior somente



ao registrado no Porto de Santos (SP). Apesar de o Porto do Açu não ser um porto estuarino, a região onde foi estabelecido sofre influência da grande atividade sedimentológica percebida na foz do rio Paraíba do Sul, distante cerca de 25 km a norte do complexo.

A ação de ondas, correntes e a passagem de navios podem manter esses sedimentos finos em suspensão, sendo essa camada responsável pelo principal mecanismo de transporte de sedimentos coesivos em regiões portuárias e costeiras (Faas, 1985). As questões referentes à compreensão da interação dos depósitos lamosos com a hidrodinâmica costeira sugerem um conhecimento integrado entre ambas, uma vez que os sedimentos se comportam de maneira singular sob cada regime hidrodinâmico específico (Leão, 2013), mostrando também a importância da modelagem hidrossedimentológica para o entendimento de processos associados a essas camadas lamosas.

Um elemento vital dos serviços portuários é a garantia da passagem de navios para as instalações. Esse serviço implica em custos significativos de manutenção, que aumentam exponencialmente, quando os canais de acesso mais profundos devem ser mantidos, além da necessidade de manter com segurança vias navegáveis da maneira mais eficiente. Nesse sentido, dragagens são obras de engenharia bastante complexas que, além do empenho de uma grande soma de recursos, representam riscos potenciais ao meio ambiente, os quais precisam ser devidamente gerenciados e mitigados ao longo da sua execução, tais como riscos à flora e à fauna, eventualmente, presente nas proximidades do porto (Silva, L., 2022).

Esses motivos estão entre aqueles que levam os gestores portuários a buscar novas alternativas para a gestão do calado máximo operacional (CMO) das embarcações que trafegam pela via buscando, entre outras possibilidades, a redução dos volumes

a serem dragados sem comprometimento da segurança da navegação. Entre as novas alternativas, merece atenção a implantação e a operação de sistemas para a determinação de folga dinâmica abaixo da quilha (calado dinâmico) (Silva, L., 2022), já normatizado pelas Normas da Autoridade Marítima para Implantação e Operação de Sistemas para a determinação de Folga Dinâmica Abaixo da Quilha (NORMAM-33/DHN) e os estudos aprofundados para a definição do fundo náutico, a partir da caracterização da coluna de lama fluida considerada navegável.

A PIANC (*World Association for Waterborne Transport Infrastructure*) sugere a utilização do conceito de fundo náutico nos canais de acesso aos portos, definido como “o nível em que as características físicas do fundo alcançam um limite crítico para além do qual, o contato com a quilha de um navio causa danos ou efeitos inaceitáveis na capacidade de controle e na manobrabilidade” (PIANC, 2014). Este limite crítico está associado às alterações nas propriedades reológicas da lama e é, geralmente, chamado de transição reológica (Van Craenenbroeck *et al.*, 1991). Embora possam ser realizados ensaios reológicos adequados em laboratório, ainda é difícil gerar perfis reológicos *in situ*. Assim, essas propriedades são, geralmente, correlacionadas com propriedades mais facilmente mensuráveis, como, por exemplo, a densidade (Carneiro *et al.*, 2017; Carneiro *et al.*, 2020).

A partir do conhecimento mais detalhado da morfologia do fundo, vários portos já discutem sobre a navegação em lama fluida, por exemplo, Rotterdam (Holanda), Bangkok (Tailândia), Suriname (Suriname), Tianjing Xingang (China), Yangtze (China), Liang Yungang (China) (Xu e Yuan, 2003). O entendimento dessa camada pode aumentar também a eficiência de dragagem (posicionamento do tubo de dragagem sobre o material mais denso), como também dimi-



nuir os impactos ambientais relacionados às atividades portuárias (Ferreira, 2013).

Outros estudos, como testes com modelos reduzidos e com navios para o porto de Zeebrugge (Bélgica), mostraram que é possível a navegação nessa camada de lama, considerando a determinação da Folha Abaixo da Quilha de segurança (Van Craenenbroeck & Vantorre, 1992; Delefortrie *et al.*, 2005; Ferreira, 2013; Carneiro, 2018). Esse conceito é válido quando o material de sedimentação consiste em lama fluida. Em princípio, as lamas fluidas têm características de resistência tão baixas que não causam problemas para a navegação (PIANC, 1997; Fontein & Van Der Wal, 2006).

Espera-se que a combinação de técnicas de detecção, medição e modelagem permita, posteriormente, o desenvolvimento de ferramentas para navegação em lama fluida, com potencial incremento do calado, além de definir densidades críticas para as áreas portuárias com valores de resistência aos movimentos seguros à navegação.

Nesse contexto, o presente trabalho apresenta a abordagem definida pela Administração Portuária do Terminal 2 (T2) do Porto do Açu para o estudo e a caracterização do material existente no leito marinho do canal de acesso ao T2, a partir de uma abordagem estruturada composta pela realização de levantamentos hidrográficos em dupla frequência, medições de densidade de material *in situ* e coleta e caracterização de material em laboratório, que adota as principais referências nacionais e internacionais sobre o tema.

O processo proposto tem por objetivo identificar a existência de uma camada de lama fluida no leito marinho da área de interesse e, a partir desse conhecimento, avaliar as possibilidades de gestão que se abrem, quais sejam a sua utilização para fins de navegação, a redução de volumes e/ou o espaçamento das campanhas de dragagem, alterações na técnica adotada para o manejo

e deposição do material etc., visando à obtenção de externalidades positivas ao porto.

Dessa forma, ao apresentar uma abordagem para a questão da lama fluida que pode ser replicada ou adaptada a outros cenários e contextos, é aberta à comunidade marítima e portuária a oportunidade do debate sobre o assunto o que, por fim, contribui para a melhoria do sistema portuário nacional, aproximando-o de práticas já adotadas em outras regiões geográficas.

### 1.1 Porto do Açu

Com relação à infraestrutura portuária propriamente dita, o porto é subdividido espacialmente entre dois grandes grupos de terminais, nomeados Terminal 1 (T1) e Terminal 2 (T2). O T1, localizado mais ao norte, é um terminal construído sobre ponte, protegido por quebra-mar constituído com caixões de concreto, onde encontram-se os terminais de minério de ferro e de petróleo. O canal de acesso ao T1 é dragado para 25,0 metros em sua seção mais profunda.

Em oposição, o T2 é um terminal escavado em terra, acessado por um canal marítimo dragado a 14,5 m e com largura de 300 metros em seu trecho mais largo. Chegando à linha natural da costa, o T2 é protegido por quebra-mares constituídos com caixões de concreto, entre os quais, se encontra uma bacia de evolução dragada a 14,5 metros, sendo que o canal de acesso continua em direção à terra, dragado a 14,5 metros no trecho mais profundo (leste-oeste), e a 10,0 metros no trecho final e mais raso (norte-sul). A Figura 1 a seguir apresenta a representação cartográfica do Porto do Açu conforme a carta náutica DHN 1405 (MARINHA DO BRASIL, 2021):

Após o término da dragagem de aprofundamento (construção) do canal do T2, duas grandes campanhas de dragagem de manutenção foram realizadas



nos anos de 2019 e 2021. Ambas ocorreram no trecho E-F1/F2-G do canal do T2, ilustrado na Figura 2, em que os maiores esforços foram concentrados, haja vista este trecho concentrar cerca de 90% de todo o material sedimentado no canal, segundo os resultados obtidos pela comparação simples das superfícies batimétricas obtidas no tempo.

Nesse respectivo trecho, de cerca de 1,0 km<sup>2</sup> de área, as campanhas de batimetria em dupla frequência, consubstanciado por iniciativas de coleta e análise de material do leito marinho, indicam a possível existência de uma camada de material fluido (lama fluida) imediatamente após o perfil batimétrico de 200 kHz, o que desperta ainda mais interesse de estudo desse material.



Figura 1 – Porto do Açu – Terminais T1 e T2. (Marinha do Brasil, 2021)

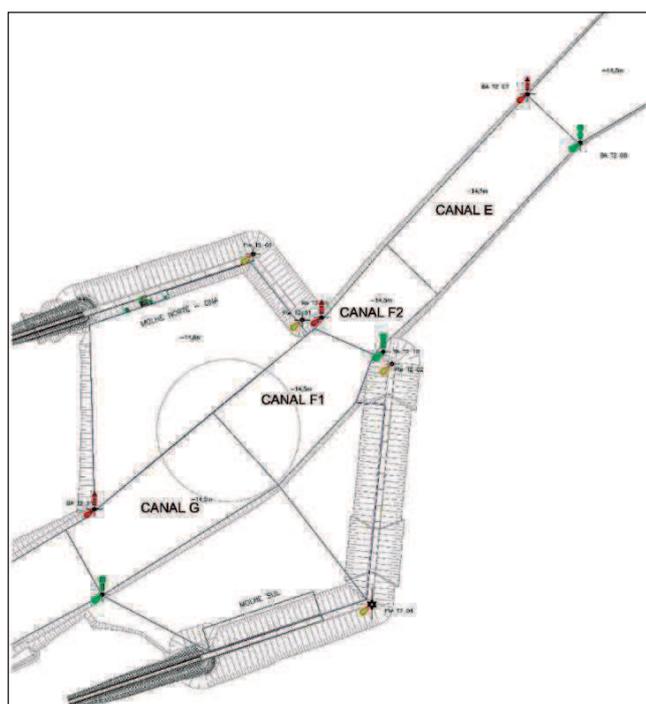


Figura 2 – Canal de acesso ao T2



## 2. REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1 Lama Fluida no mundo

Na literatura, existem diversas definições de lama fluida. Uma delas de McAnally *et al.* (2007) diz que é “uma alta concentração de sedimentos finos na qual a sedimentação é substancialmente impedida pela proximidade dos grãos de sedimentos com flocos, além disso, não formou uma matriz interligada com laços fortes o suficiente para eliminar o potencial de mobilidade”. Por sua vez, Dyer (1986) diz que lama fluida é “a suspensão de sedimentos coesivos em uma concentração dentro ou próxima do ponto de gel, da ordem de 101 a 102 g/l”. Já Wurpts & Torn (2005) considera “uma suspensão altamente concentrada de sedimentos finos coesivos, com baixa densidade que possui uma leve tendência à consolidação”.

A lama fluida ocorre em muitos lugares ao redor do mundo sendo que nos Estados Unidos, por exemplo, inclui San Francisco, CA; Gulfport, MS; Mobile, AL; e Savannah, GA (Hall, 2014). Em alguns portos, já se pratica a navegação em lama fluida a partir da determinação de uma densidade crítica. Consequentemente, dependendo do tipo de sedimento de fundo, a densidade da lama que pode ser considerada navegável pode variar para cada tipo de porto (Carneiro, 2018). O limite é definido em alguns lugares, por razões práticas, como sendo uma densidade crítica da lama fluida, já que é o parâmetro que pode ser medido de maneira contínua, o que é indispensável em termos de navegação (Delefortrie, 2007).

No porto de Zeebrugge, na Bélgica, o fundo é coberto com uma camada de lama com características físicas (densidade, viscosidade, tensão limite de escoamento ou rigidez inicial), aumentando gradualmente com a profundidade. As medições

*in situ* na década de 1980 mostraram que a transição corresponde a uma densidade de 1.150 kg/m<sup>3</sup> ou superior; sendo então essa densidade selecionada como o limite crítico. Alguns outros portos já navegam em lama fluida com densidades críticas de navegação, por exemplo: Rotterdam na Holanda (1.200 kg/m<sup>3</sup>), Bangkok na Tailândia (1.200 kg/m<sup>3</sup>), Yangtse na China (1.250 kg/m<sup>3</sup>), Bordeaux na França (1.200 kg/m<sup>3</sup>), entre outros (Carneiro, 2018).

É possível citar também alguns portos da Alemanha: no Porto de Emden, as análises de sondas que abrangem um período de dois anos mostraram um volume médio de lama fluida de aproximadamente 662.000 m<sup>3</sup>. No porto de Bremerhaven, a análise de sondas que abrangem um período de quatro anos (2001/2004) mostrou um volume médio da camada de lama fluida em aproximadamente 116.000 m<sup>3</sup> no porto exterior. Esse, assim como o Porto de Emden, tem uma camada estável que variou apenas 20% durante o período de investigação (Nasner *et al.*, 2007).

Kruiver *et al.* (2012) realizaram um estudo com um questionário envolvendo diversos atores interessados na otimização da navegação nos portos da Holanda. Os objetivos do questionário foram os de determinar uma melhor definição de navegabilidade para as vias navegáveis com fundos fluidos, facilitar a discussão sobre o assunto, avaliar necessidades e melhorias. A maioria indicou que a densidade, a viscosidade e a espessura da lama são os principais parâmetros, além de taxa de cisalhamento, tamanho dos grãos, limites de Atterberg, temperatura, parâmetros biológicos, tixotropia, limite reológico e ondas internas.

No Brasil, são diversos os trabalhos que relatam a presença de lama fluida nos mais variados estados. No Cassino e Lagoa dos Patos (Rio Grande do Sul), Vinzon *et al.* (2009) ressaltaram sobre a formação dos



bancos de lama na região próxima à desembocadura da Laguna dos Patos, evidenciando que a taxa de suprimento de sedimentos finos para a plataforma interna é primordialmente governada por variações das forçantes atmosféricas, as quais exercem importante ação sobre as oscilações no nível médio do mar, tendo relação direta com a vazão do estuário para a plataforma continental. Trabalhos mais recentes como Leão (2013) caracterizaram depósitos de lama fluida ao longo da região do Porto de Rio Grande.

No Amazonas, trabalhos como Vinzon & Mehta (2001), Gabioux *et al.* (2005) destacaram que a presença das camadas de lama fluida na Plataforma Amazônica tem consequências importantes sobre a hidrodinâmica, evidenciando o papel da redução do atrito devido à presença desses depósitos junto ao fundo, que diminuem a dissipação de energia, promovendo então um aumento das amplitudes de maré ao longo da costa. Vilela (2011) investigou a influência da hidrodinâmica sobre os processos de acumulação de sedimentos finos no estuário do rio Amazonas, utilizando dados de campo e modelagem numérica. Leão (2013) e Silva, I. (2015) analisaram a variação das características da camada de lama fluida, correlacionando com o regime hidrodinâmico (magnitude e direção das correntes de maré), por meio dos perfis de densidade, salinidade, temperatura e concentração de sedimentos em suspensão.

COMISSÃO “Barra Norte” (2019) publicou, nos Anais Hidrográficos, sobre o navio “Sirius” que realizou uma sondagem batimétrica, coleta de dados maregráficos e apoio a pesquisadores do LDS-COPPE/UFRJ em pesquisa de lama fluida e correntometria na Foz da Barra Norte do Rio Amazonas, estudo esse que analisa permitir também a operação de embarcações de maior calado na citada região e ajudou a viabilizar acordos firmados em 2021 e 2022.

Quaresma *et al.* (2011) demonstraram a aplicação de métodos acústicos de investigação geofísica na identificação da ocorrência de lama fluida no Porto de Tubarão em Vitória (Espírito Santo). Os autores ressaltaram sobre a importância de que os resultados combinados com as mais variadas frequências e fontes sísmicas contribuiriam para o mapeamento completo tanto da distribuição espacial quanto da espessura dos pacotes de lama fluida. Schettini *et al.* (2010) estudaram a presença de depósitos de lama fluida no Rio Tijucas (Santa Catarina), sul do Brasil, enquanto Ferreira (2013) verificou a ocorrência de lama fluida no Porto de Santos (São Paulo).

Carneiro *et al.* (2020) apresentaram uma abordagem integrada para analisar as camadas de lama fluida em diferentes regiões portuárias da América do Sul (Canal Norte do Amazonas, Santos, Itajaí, no Brasil; e Montevideú, no Uruguai) e sob condições controladas em uma coluna em laboratório. As medições *in situ* foram obtidas com equipamento acústico de dupla frequência, um perfilador chirp e um densímetro. O experimento de laboratório foi operado em uma coluna de sedimentação de 4,3 m de altura, ecobatímetro de dupla frequência, e medições de densidade foram usadas para monitorar eventos de sedimentação e ressuspensão. Em relação à detecção das camadas de lama por meio de medições de ecobatímetro de dupla frequência, o retorno de alta frequência (HF) está associado à interface água e lama fluida (lutoclina), e o retorno de baixa frequência (LF1) é mais difuso. A alta frequência registrou a posição superior das camadas formadas, seja por ressuspensão ou presença de suspensão diluída. A profundidade medida pela baixa frequência pode ser relacionada a densidades mais altas ou associada a um segundo gradiente de densidade observado nos perfis.



Por fim, Michimoto & Ayres (2017) destacam a importância de desenvolver estudos sistemáticos sobre a ocorrência e características da lama fluida, como esse, que permitirão utilizar tal parâmetro de forma mais consistente no cálculo da Folga Abaixo da Quilha (FAQ) nos canais de acesso dos portos brasileiros.

## 2.2 Equipamentos acústicos, Densidade e Reologia

A questão da navegabilidade em lama fluida pode ser agravada pelo fato da lama, na sua forma não consolidada e estado fluido altamente dinâmico, geralmente não ser detectada por ecobatímetros convencionais instalados em navios comerciais. Esse fato enfatiza a necessidade de maiores investigações sobre a questão da lama fluida, e seus métodos de detecção (Schrottke *et al.*, 2006). O aumento acentuado na concentração de sedimentos no topo da camada de lama fluida, conhecida como lutocline, pode retornar um fundo falso para sistemas de sonar (McAnally *et al.*, 2016), fazendo a determinação da profundidade ambígua e altamente variável. De acordo com Pereira (2006), negligenciar uma medição individual ou qualquer procedimento doutrinário conduzirá a representações equivocadas do fundo marinho.

Existem estudos com equipamentos acústicos e sísmicos, como os ecobatímetros de dupla frequência para detecção de lama (Shi *et al.*, 1999; Madson & Sommerfield, 2003; Schettini *et al.*, 2010). No entanto, esses métodos indiretos não determinam a navegabilidade dos depósitos lamosos nem a natureza desse depósito (se fluido, se consolidado, por exemplo) e, conseqüentemente, devem ser acoplados com observações *in situ* por meio de métodos diretos e amostragens para testes laboratoriais (Carneiro *et al.*, 2017).

De acordo com USACE (2002), quando a camada de sedimentos não está bem consolidada, há dificuldade na medição de fundo e as metodologias não são totalmente correlacionáveis entre si, ou talvez nem mesmo forneçam leituras consistentes. Essas partículas podem estar muito próximas da densidade da água e ficar suspensas por um longo tempo. A densidade dentro dessa camada de material suspenso tende a permanecer relativamente constante, e essa combinação de fatores pode dificultar leituras de equipamentos acústicos, por exemplo.

Para estabelecer o fundo náutico, esse limite crítico é geralmente associado a uma transição reológica no comportamento da lama. No entanto, as propriedades reológicas são difíceis de avaliar *in situ* e assim, outras propriedades, como a densidade, é utilizada para essa finalidade. Valores habituais para a densidade crítica (densidade associada ao nível inferior náutico) ficam entre 1.100 e 1.300 kg/m<sup>3</sup> (McAnally *et al.*, 2016). No entanto, como a reologia da lama não depende apenas da densidade, mas também de muitas outras propriedades do sedimento (tamanho de partícula e mineralogia, teor de matéria orgânica, presença de contaminantes, salinidade etc.), testes laboratoriais devem ser realizados para correlacionar densidade e reologia.

A reologia é o estudo do escoamento e da deformação. Assim, uma melhor avaliação do comportamento da lama é possível a partir de sua análise reológica. Com a reometria, é possível conhecer o comportamento pseudoplástico dos sedimentos coesivos (Greiser *et al.*, 2002). Isso significa que a lama se comporta como um fluido, em vez de um material sólido quando é forçada a se mover, e a viscosidade da lama fluida diminui substancialmente com o aumento do estresse de cisalhamento.

De acordo com PIANC (2014), em geral, a tensão limite de escoamento (*yield*



*stress*) aumenta com a densidade: uma maior fração de material sólido levará a um comportamento mais parecido com Bingham. Para a transição entre areia e partículas de lama definidas a 63  $\mu\text{m}$ , para uma fração de areia baixa, as propriedades reológicas aumentam muito mais rapidamente com a densidade e a presença de material orgânico tem um efeito de fluidização significativo.

Também se pode fazer uma distinção entre lama fluida e plástica: a lama fluida apresenta uma baixa fração de sólidos (baixa densidade), sendo uma suspensão similar à água (também chamada de água preta – *black water*), com viscosidade e tensão limite de escoamento (*yield stress*) que não são necessariamente dependentes da densidade; já a lama plástica apresenta uma maior fração de sólidos (maior densidade), com propriedades reológicas não newtonianas que dependem da densidade. Além de comportamento viscoso, esse tipo de lama tem um comportamento elástico comparável ao solo, sendo essa combinação conhecida como “visco-elasticidade”. Essa mudança no comportamento estrutural é chamada de mudança reológica ou transição reológica (PIANC, 2014).

Como abordado, a profundidade náutica pode ser utilizada para reduzir a frequência das dragagens e o volume do material dragado nos portos e canais onde a lama fluida está presente em quantidades substanciais (McAnally *et al.*, 2016). Dessa forma, na determinação de uma profundidade náutica para navegação, temos que considerar os parâmetros relacionados à resistência da lama ao movimento do navio, ou seja, efeitos sobre a sua manobrabilidade (Wurpts & Torn, 2005). Para a manobrabilidade, a profundidade náutica é localizada na transição reológica do sedimento, onde ocorre uma mudança brusca na relação entre a tensão limite de escoamento (*yield stress*) e a viscosidade (Delefortrie, 2007).

Greiser *et al.* (2002) afirmam que a tensão limite de escoamento ou rigidez inicial deve ser o parâmetro utilizado para a determinação da profundidade náutica. Na mesma linha de pensamento, Wurpts e Torn (2005) comentam que este parâmetro é essencial para distinguir lama navegável de não navegável, já que está diretamente relacionado à resistência da lama contra o movimento do navio. Por exemplo, para o Porto de Emden, após a realização de estudos, definiu-se que sedimentos com limite de escoamento menor que 100  $\text{N/m}^2$  são navegáveis.

Até hoje, os ecobatímetros com frequências diferentes são usados para monitorar as profundidades náuticas. Ainda assim, os resultados não são suficientes, considerando as profundidades monitoradas remotamente e a camada real de sedimentos, por isso, validações prévias são necessárias (Liebetruth & Eibfeldt, 2003). Neste contexto, são importantes as medições de densidade e os ecobatímetros de dupla frequência de forma simultânea, porque as interfaces entre a água, a lama fluida e a consolidada são dinâmicas e, frequentemente, os sinais se tornam ruidosos e difíceis de identificar na prática.

Os sinais do ecobatímetro podem fornecer informações sobre a localização do fundo ou alguma interface acústica nos sedimentos que possam existir. Se uma camada de lama fluida de alta concentração estiver perto do leito coeso, as alterações no retorno podem ser indicativos do limite superior ou inferior desta camada, já que o gradiente de impedância acústica é muito alto nesses limites. Isso pode ser estimado por meio do uso de ecobatímetros de dupla frequência, que operam simultaneamente em altas (200 – 220 kHz) e baixas (10 – 33 kHz) frequências.

A interface entre a água ou suspensão diluída até o fundo consolidado em fundos lamosos ocorre de forma gradual, dependendo, não somente do tipo de material (granulometria, mineralogia, conteúdo



de matéria orgânica etc.), mas também das condições hidrodinâmicas, nas quais, essas camadas lamosas são submetidas. A determinação do “fundo” é, portanto, motivo de controvérsias. Diferentes métodos de medição da profundidade nesse tipo de ambientes, geralmente, dão valores diferentes, sem sequer oferecer medidas consistentes entre uma medição e outra (USACE, 2002; Schrottko *et al.*, 2006). Também, em alguns casos, as estimativas do fundo náutico por meio de ecobatímetros são excessivamente conservadoras e podem representar, por exemplo, custos adicionais relacionados à dragagem (McAnally *et al.*, 2007).

Portanto, é importante avaliar a detecção de lama fluida por métodos acústicos e sísmicos (ecobatímetro de dupla frequência e chirp por exemplo) e comparar com métodos diretos como densidade por diapação, medidos simultaneamente, observando os principais resultados da comparação desses equipamentos. Além disso, sugere-se realizar observações, em condições controladas, da resposta acústica das camadas lamosas em laboratório.

### 2.3 Modelagem Hidrossedimentológica

Estimar a taxa de assoreamento nos canais de navegação de portos, com o objetivo de dar suporte ao seu gerenciamento, com campanhas periódicas de batimetria, ou, então, avaliar o impacto na qualidade da água que efeitos de ressuspensão de sedimentos finos podem gerar são exemplos importantes de processos que modelagens hidrossedimentológicas podem auxiliar em prognósticos e tomadas de decisão em ambientes portuários.

Os sedimentos coesivos são os que apresentam os maiores desafios em estudos e avaliações de projetos de engenharia, pois as variáveis envolvidas no transporte desses sedimentos abrangem diversas áreas do

conhecimento. Devido a essa grande quantidade de fatores interferindo de maneira complexa na mobilidade dos sedimentos coesivos, os sistemas de modelagem em geral definem essa variável como um parâmetro de calibração dos fluxos de erosão e deposição.

Com relação aos modelos computacionais, é preciso definir as trocas de massa que o fluido faz com o leito. Então, prescrevem-se fluxos de erosão e de deposição para contabilizar as entradas e saídas de sedimentos no modelo pelo fundo. No decorrer da modelagem, os parâmetros que vão definir se uma dada condição de escoamento causará erosão no fundo ou deposição dos sedimentos em trânsito na coluna d'água são, respectivamente, a tensão crítica de erosão, e a de deposição (Peixoto, 2015).

Para os estudos de lama fluida, incluindo os de modelagem, é necessário conhecer o comportamento e os processos e mecanismos físicos desse fluido. A formação da lama fluida ocorre, principalmente, por meio de dois processos, a sedimentação e a liquefação, sendo esta causada por ondas. Como as ondas passam pelo leito, o aumento da pressão da onda pode aumentar a pressão dos poros no leito e superar a resistência de escoamento. A tensão de cisalhamento em excesso é necessária para iniciar ou manter o movimento do fluido, e o transporte de sedimentos coesivos é governado por complexos processos não-lineares, tais como a erodibilidade, floculação e o processo de amortecimento do fluxo de transporte (Carneiro, 2018).

Por se tratar de um ambiente onde predomina a ocorrência de sedimentos coesivos (siltes e argilas), o nível de complexidade envolvido na calibração de modelos hidrossedimentológicos é muito superior àquele associado a modelos onde predomina a ocorrência de sedimentos granulares (areias). Quatro parâmetros são considerados fundamentais nesse processo:



velocidade de queda das partículas, tensão crítica de erosão, parâmetro de erosão e concentração de sedimentos em suspensão ao longo das fronteiras. A velocidade de queda e a tensão crítica de erosão são parâmetros dinâmicos que dependem não apenas da granulometria do leito, mas também do grau de floculação e adensamento que caracterizam a interação entre as partículas.

Os sedimentos coesivos sofrem erosão quando a tensão de cisalhamento aplicada pela ação das correntes/ondas for superior à tensão crítica para a erosão. Esses parâmetros, sobretudo a tensão crítica de erosão, dependem das características do material de fundo, dos processos deposicionais, e do modo de consolidação ao qual o sedimento foi submetido. Dessa forma, para um leito consolidado, quanto mais fundo, maior será a tensão necessária para causar erosão. Com relação à dissipação, a lama fluida é dissipada, principalmente, por meio de arraste para a coluna de água (Peixoto, 2015; Carneiro, 2018). A deposição é definida como a taxa de incorporação (adesão) dos sedimentos ao fundo do corpo d'água. No entanto, muitas partículas ou flocos não suportam as tensões de cisalhamento no fundo e se mantêm em suspensão. Já a consolidação (ou adensamento) define os processos de estabilização e deformação dos sedimentos, de acordo com os espaçamentos intersticiais e forças de ligação entre as partículas que compõem os sedimentos (Partheniades, 1984).

A dinâmica de transporte de lama fluida envolve uma variedade de mecanismos físicos nem sempre bem conhecidos, incluindo, por exemplo, a camada limite e de transporte orientado à gravidade, modulação da turbulência, floculação, comportamento reológico não newtoniano e consolidação. Dessa forma, processos que ocorrem no interior da camada limite, por exemplo, precisam ser parametrizados para fornecer coeficiente de arrasto de fundo e taxa de transporte de sedimentos. São

diversos os processos envolvidos na modelagem de lama fluida. A parametrização requer cuidados especiais. A taxa de erosão em modelos computacionais é geralmente calculada em função da diferença da tensão de cisalhamento de fundo e a tensão crítica de erosão.

A grande vantagem da modelagem em um protocolo de estudo de lama fluida é entender os processos, nos quais, esse fluido está envolvido e principalmente o contexto dos processos. No caso do Porto do Açu, onde as principais fontes de sedimentos são os rios localizados ao norte da área do porto, particularmente o rio Paraíba do Sul, para a modelagem se torna de extrema importância entender e indicar a carga de sedimentos em suspensão como principal aspecto ambiental para variações da espessura da lama fluida na área de estudo.

A Figura 3 mostra as principais relações entre outras ferramentas de grande importância para a modelagem e, de forma cíclica, a modelagem ajuda a explicar os processos envolvidos.

Grande parte dos processos variam de acordo com as características dos sedimentos, então, quanto melhor conhecermos as características, melhor conseguimos avaliar os parâmetros. A ferramenta de modelagem nesse caso, em particular, acaba sendo inclusive um "laboratório de testes" para complementar os resultados obtidos em tanques e ensaios laboratoriais. A aplicação do critério de transporte de sedimentos consiste em avaliar a ocorrência ou não de deposição, bem como a ocorrência ou não de erosão de sedimentos. Para isso, compara-se a tensão de arrasto no fundo, causada pelas correntes em um dado local, com as tensões críticas para erosão e deposição dos sedimentos no mesmo local.

Os parâmetros relativos à lama, utilizados como condições iniciais e de contorno em modelos, podem ser a localização geográfica do depósito, a espessura, a densidade e



Figura 3 – Ferramentas de uso para modelagem hidrossedimentológica

a viscosidade. Com relação aos parâmetros físicos, a espessura da camada e a sua densidade, consideradas constantes em todo o domínio do modelo, se faz necessária a realização de testes de sensibilidade para avaliação dos resultados obtidos.

### 3. ABORDAGEM DEFINIDA PELO TERMINAL 2 DO PORTO DO AÇU E RESULTADOS ESPERADOS

A análise das camadas de lama fluida no Terminal 2 do Porto do Açu segue uma abordagem de combinação de ferramentas que, juntas, possibilitam um melhor mapeamento e caracterização do fundo para, em um segundo momento, discutir sobre os resultados com relação à navegabilidade a partir dos dados obtidos. O objetivo é identificar e descrever as espessuras das camadas de lama fluida e sua variação por meio de levantamentos batimétricos, perfilagens de densidade e amostragens de material para reologia, granulometria e testes em laboratório em uma grande coluna de sedimentação. Utilizando modelagem hidrodinâmica e de transporte de sedimentos finos com o uso do software SisBaHiA<sup>®</sup>, busca-se analisar as condições ambientais que podem causar variações nas espessuras das camadas de lama fluida no Terminal 2 do Porto do Açu.

Para tanto, são realizados:

1) Batimetrias periódicas com duplas frequências estratégicas ao longo do ano para maior entendimento e monitoramento das espessuras das diferenças entre os refletores de baixas e altas frequências, obtidos a partir do ecobatímetro. As batimetrias periódicas também contribuem para um maior entendimento sobre as regiões de maiores assoreamentos no canal de acesso ao T2.

2) Perfilador de densidade com um diapasão chamado *DensiTune*<sup>®</sup>, da STEMA Systems. Para cada medição, é obtida uma relação de frequência e amplitude, as quais determinam a densidade *in situ* do material. Devido às particularidades que cada material apresenta, uma calibração se faz necessária. Portanto, é preciso realizar a coleta de sedimentos da área de estudo para calibração em laboratório e pós-processamento dos dados. O *DensiTune*<sup>®</sup> é medido de forma simultânea ao ecobatímetro de dupla frequência para posterior relação da espessura do equipamento e da diferença entre refletores.

3) Amostragem de material para calibração do densímetro, mas também para caracterização. Nesse momento, é possível, em laboratório, medir a reologia por meio de protocolos já estabelecidos na literatura, por exemplo, Carneiro *et al.* (2017) entre outros, buscando entender a transição reológica e



buscando a relação densidade x reologia. O material do fundo (sedimento) também é coletado para análise do tamanho do grão por meio de granulometria a laser, para a análise de velocidade de sedimentação, sendo esse um parâmetro que pode contribuir para uma melhor calibração do modelo de transporte de sedimentos finos, além de possibilitar a realização de testes em uma grande coluna de sedimentação com diferentes densidades, utilizando os mesmos equipamentos densímetro e ecobatímetro, mas em ambiente controlado em laboratório.

4) Modelagem hidrossedimentológica é realizada de forma concomitante no modelo SisBaHiA<sup>®</sup>. É de extrema importância a modelagem não só para entender processos, mas para auxiliar no monitoramento das condições ambientais que podem variar as espessuras das camadas de lama fluidas, que devem estar relacionadas também às concentrações dos sedimentos em suspensão do Paraíba do Sul, por exemplo.

Dessa forma, temos a caracterização do fundo com um conjunto de ferramentas, tornando possível entender e viabilizar informações consistentes de caracterização e monitoramento para discussões a respeito do uso desse material para um aumento do calado com incremento na segurança da navegação.

#### 4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A espessura da camada de lama fluida em portos e canais de navegação pode variar de acordo com as condições hidrodinâmicas e sedimentológicas de cada região. Entretanto, a abordagem, as ferramentas e as informações necessárias para fomentar a aplicabilidade são similares. A partir da comparação entre levantamentos batimétricos de dupla frequência e medidas de densidades específicas, espera-se que seja possível observar a densidade específica de referência que pode variar de acordo com o local.

A combinação de técnicas para detecção e medição das camadas de lama fluida é uma abordagem promissora para capacitar e desenvolver ferramentas usando lama fluida para navegação, com potencial de aumento do calado, bem como para definição de densidades críticas de portos e canais, visando a uma navegação segura.

Sobre a combinação de equipamentos, espera-se que a alta frequência reflita bem, em geral, a lutoclina, tanto nos dados obtidos em campo quanto nos experimentos em laboratório, e que as amostragens, testes de laboratório, reologia e densidade auxiliem a um melhor entendimento da reflexão da baixa frequência, facilitando assim as amostragens, já que medições acústicas podem ser uma boa ferramenta para o conceito de fundo náutico por ter vantagens como maior cobertura.

Medições não intrusivas podem ser uma boa ferramenta para o conceito de fundo náutico por apresentarem vantagens, tais como cobertura mais ampla. No entanto, eles devem ser combinados com diferentes metodologias, reologia e outras propriedades. A associação de dados de densidade com os resultados de perfis acústicos pode melhorar significativamente a determinação do fundo náutico. Espera-se que a combinação de técnicas de detecção e medição, bem como outras informações disponíveis, permitam o desenvolvimento de ferramentas para navegação em lama fluida, com potencial de aumento do calado, e definir densidades críticas em portos e canais de navegação.

Notícias recentes mostram a importância econômica de estudos extensivos em portos com sedimentos coesivos devido aos aspectos econômicos e operacionais, no que diz respeito à navegação na região da lama fluida e na implementação do modelo de transporte de sedimentos, visando a compreender os processos responsáveis pela



acumulação de sedimentos finos em portos e canais navegáveis.

Considerando um cenário em que os calados dos navios tendem a aumentar para atender às demandas de exportação de produtos brasileiros, a navegação em lama fluida representa uma possibilidade lucrativa. Devido à dificuldade dos procedimentos de dragagem em fundos lamosos, esses procedimentos podem ser significativamente caros sem trazer os resultados esperados.

Dessa forma, estudos de modelagem, calado dinâmico e fundo náutico, por exemplo, são muito importantes para o entendimento de taxas de assoreamento e programação de dragagens, além de conhecer os processos. No contexto geral, importantes portos brasileiros têm necessidade constante de dragagens periódicas e diversos deles com presença de lama fluida.

Pela variabilidade de informações, os resultados obtidos para um porto não são aplicáveis em outro e a adoção direta de critérios utilizados em outros portos não é possível, porém, metodologias, protocolos e normativas similares podem ser adotadas. Além disso, é importante destacar que, além de verificar as causas de formação e variações nas camadas de lama fluida, mais trabalhos são necessários para aplicar o conceito de

Fundo Náutico. Uma vez caracterizado o material existente no canal de acesso, estudos complementares relacionados à manobrabilidade das embarcações podem ser estruturados usando-se ferramentas de simulação computacional, por exemplo.

Apesar de competir à Administração do Porto o estabelecimento do calado máximo das embarcações no porto, a melhor aplicação do conceito de Fundo Náutico com utilização de camada de lama fluida envolve uma estrita cooperação técnica com a Autoridade Marítima. Dessa forma, o presente trabalho busca contribuir com o debate e aumento da massa crítica sobre o assunto, incentivando ainda o desenvolvimento de novos estudos que, por fim, permitam a eventual normatização do assunto por parte da Autoridade Marítima.

## 5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Diretoria de Administração Portuária da Porto do Açú Operações S.A. pelo apoio dado no desenvolvimento do trabalho, à Lidiane Lima, Patricia Auler Rosman, Alexander Ishikawa Kataoka e COPPE/UFRJ pelas valiosas contribuições no modelo de sedimentação aqui citado, e a Olavo Franco pelo auxílio nas figuras.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA NACIONAL DE TRANSPORTES AQUAVIÁRIOS (Brasil). *Estatístico Aquaviário* (2.4.1). Brasília: ANTAQ, 2022.

BECKER, M. *Suspended Sediment Transport and Fluid Mud Dynamics in Tidal Estuaries*. Dissertação de doutorado em Ciências, Departamento de Geociências da Universidade de Bremen, Alemanha. 2011.

CARNEIRO, J. C. *Estudo das camadas de lama fluida em portos e canais de navegação*. Tese de doutorado em Engenharia Oceânica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE-UFRJ. 2018.

CARNEIRO, J.C. et. al. *Strategies for measuring fluid mud layers and their rheological properties in ports*. *Journal of Waterway Port Coastal Ocean Engineering*. 2017



CARNEIRO, J. C. et. al. *Detection of fluid mud layers using tuning fork, dual-frequency echo sounder, and chirp sub-bottom measurements*. *Ocean Dynamics* 70, 2020. p. 573–590.

COMISSÃO “Barra Norte”. *Anais Hidrográficos*, Rio de Janeiro, v. 76, p. 67, 2019.

DE WITT, P. J. *Liquefaction of cohesive sediments caused by waves*. *Delft Studies in Integrated Water Management* 6, Delft University Press, 1995.

DELEFORTRIE, G. et. al. *Revision of the nautical bottom concept in Zeebrugge based on the manoeuvrability of deep-drafted container ships*||, In: Csiti, A. (ed.) *Dredging: the extremes: CEDA dredging days*. Rotterdam, the Netherlands, 2005.

DELEFORTRIE, G. *Manoeuvreergedrag van containerschepen in slibrijke vaarwateren*. PhD Thesis. Universiteit Gent: Gent. ISBN 978-90-8578-146-2. XVI, 2007.

DYER, K. R. *Coastal and Estuarine Sediment Transport*. A Wiley – Interscience Publication. Institute of Oceanographic Sciences. Bidston, UK. 1986. 342p.

FAAS, R. W. *Time and density-dependent properties of fluid mud suspensions, NE Brazilian continental shelf*, *Geo-Marine Letters*, v. 4, 1985, pp. 147–152.

FERREIRA, T. R. S. F. *Ocorrência de lama fluida no Porto de Santos*. Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Oceânica, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2013.

FONTEIN, W & VAN DER VAL, J. *Assessing nautical depth efficiently: in terms of rheological characteristics*, in: *Evolutions in hydrography, 6th – 9th November 2006, Provincial House Antwerp, Belgium: Proceedings*. 2006.

GABIOUX, M. et al. *Tidal propagation over fluid mud layers in the Amazon Shelf*, *Continental Shelf Research*, v. 25 (1), 2005, p. 113-125.

GREISER, N. et al. *Pseudoplasticity of Cohesive Sediments: Causes and Innovative Techniques for Pre-Dredging Surveys*||. In: *Proceedings of the CEDA Dredging Days*, pp. 27-33, Casablanca, Morocco, 2002, p. 27-33.

HALL, C. L. *A model of fluid mud transport*. Dissertation submitted to the Faculty of Mississippi State University for the Degree of Doctor of Philosophy in Civil and Environmental Engineering in the Department of Civil and Environmental Engineering Mississippi State, Mississippi, 2014.

JIANG, L. & ZHAO, Z. *Viscous damping of solitary waves over fluid-mud seabeds*. *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, v. 115, n. 3 (May), 1989, pp. 345–363.

Kruiver, P. et al. *Enquête: De bevaarbare waterdiepte bij slibbodems*. DELTARES report 1205981-004 (In Dutch), 2012.

LEÃO, T. F. *Características de depósitos de lama sobre diferentes regimes hidrodinâmicos*. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-graduação em Engenharia Oceânica, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2013.



Liebetruth, F. & Eibfeldt, F. P. *Grundlagen für die Sicherheit und Leichtigkeit des Schiffsverkehrs – Untersuchungen zur nautischen Sohle. Mitteilungsblatt Bundesanstalt für Wasserbau*, 2003, 86:77 – 82.

MADSON, J. & SOMMERFIELD, C. K. *Application of sidescan sonar, sub bottom profiling and echo sounding techniques to study sediment deposition and erosion in estuaries: results from the lower Delaware River and upper Delaware Bay. Proc., US Hydro Conference, Mississipi, United States*, 2003, 24-27.

MARINHA DO BRASIL. Diretoria de Hidrografia e Navegação. Brasil – Costa Leste, Porto de Açu (Carta náutica 1405). Rio de Janeiro: DHN, 2021. 1 carta náutica, color. Escala: 1:25.000.

McAnally, W. et al. *Management of fluid mud in estuaries, bays, and lakes. II: Measurement, modeling, and management. J. Hydraul. Eng.*, 2007, p. 23–38.

McAnally, W. et al. **Nautical Depth for U.S. Navigable Waterways: A Review.** J. Waterway, Port, Coastal, Ocean Eng., 2016.

MICHIMOTO, M. de C. & AYRES, A. **Avaliação de Parâmetros Operacionais Portuários e Lama Fluida na Navegação.** Anais Hidrográficos, Rio de Janeiro, v. 74, p. 104-114, 2017.

NASNER, H. et. al. *Properties of Fluid Mud and Prevention of Sedimentation, Proceedings of WODCON XVIII*, Orlando, 2007.

Partheniades, E. *A fundamental Framework for Cohesive Sediment Dynamics.* Estuarine Cohesive Sediment Dynamics, in: Mehta, A. J. (ed.) *Lecture Notes on Coastal and Estuarine Studies* n.14, Springer-Verlag, 1984, p. 219-250.

Peixoto, R. Desenvolvimento de um modelo 2DH de Transporte de Sedimentos Coesivos. Mestrado em Engenharia Oceânica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2015.

PEREIRA, D. L. da S. *Incertezas e Controle de Qualidade na Medição de Profundidades por meio de Ecobatímetro Multifeixe.* Anais Hidrográficos, Rio de Janeiro, v. 73, p. 53-65, 2016.

PIANC. *Approach Channels: A Guide for Design. Report of Working Group No. 30 of the Permanent Technical Committee II, Supplement to Bulletin No. 9.* Brussels: General Secretariat of the Permanent International Association of Navigation Congresses. 1997. 24 p.

PIANC. *Harbour Approach Channels – Design Guidelines.* PIANC REPORT N° 121. 2014.

Quaresma, V. et al. *Utilização de métodos geofísicos para mapeamento de lama fluida no porto de Tubarão, Vitória (ES-Brasil).* Revista Brasileira de Geofísica, Vol. 29(3), 2011.

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, v. 30: 47–62.

SCHROTTKE, K. et al. *Fluid mud dynamics in the Weser estuary turbidity zone tracked by high-resolution side-scan sonar and parametric sub-bottom profiler.* Geo-Marine Letters, 2006, 26: 185–198.

SHI, Z. et al. *Acoustic profiling of fine suspension concentration in the Changjiang Estuary.* *Estuaries*, 22, 3A, 1999, 648-656.



SILVA, I. O. *Dinâmica sedimentar na Barra Norte – Foz do Rio Amazonas*. Tese de Doutorado, Programa de Pós-graduação em Engenharia Oceânica, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2015.

SILVA, L. G. C. H da. *Novas Tecnologias Empregadas pelo Setor Portuário Brasileiro na Gestão de Canais de Acesso*. Revista Marítima Brasileira, 2022, v. 142. No Prelo.

USACE (US Army Corps of Engineers) et al. Depth measurement over irregular or unconsolidated bottoms, Engineering Manual 1110-2-1003, chapter 21, Department of the Army, Washington DC, 2002.

VAN CRAENENBROECK, K.; VANTORRE, M.; DE WOLF, P. *Navigation in muddy areas; Establishing the navigable depth in the port of Zeebrugge* ||, In: Proceeding of the CEDA-PIANC Conference Accessible Harbors, Amsterdam, 1991.

VAN CRAENENBROECK, K. & VANTORRE, M. *Navigation in muddy areas: establishing the navigable depth in the port of Zeebrugge*||, In: *Terra et Aqua 47: International Journal on Public Works, Ports and Waterways Developments*. The Hague, 1992, p. 3-12.

VILELA, C. P. X. *Influência da Hidrodinâmica Sobre os Processos de Acumulação de Sedimentos Finos no Estuário do Rio Amazonas*. Tese (doutorado) UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Oceânica, 2011.

VINZON, S. B. & MEHTA, A. *Boundary layer effects due to suspended sediment in the Amazon River estuary*, In: *Coastal and Estuarine Fine Sediment Processes*, Marine Science Series (3), Elsevier, 2001, p. 359-372.

VINZON, S. B. et al. *Mud deposit formation on the open coast of the larger Patos Lagoon Casino Beach system*, *Continental Shelf Research*, (Setembro), 2009, p. 17.

WINTERWERP, J. C. & VAN KESTEREN, W. G. *Introduction to the physics of cohesive sediment in the marine environment*. Amsterdam, Elsevier, 2004.

WURPTS, R. & TORN, P. *15 Years Experience with Fluid Mud: Definition of the Nautical Bottom with Rheological Parameters*||, *Terra et Aqua*, v. 99, 2005, p. 22-32.

XU, J. & YUAN, J. Study on the Possibility of Occurrence of Fluid Mud in the Yangtze Deep Waterway||. *International Conference on Estuaries and Coasts*, China, 2003.

