



UNIVERSIDADE FEDERAL DO MARANHÃO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM OCEANOGRAFIA

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA CORRENTE MARÍTIMA NA REMOÇÃO DOS  
SEDIMENTOS NO TERMINAL MARITIMO PONTA DA MADEIRA EM SÃO LUÍS -  
MA**

**Alexandre Ramos de Figueiredo**

**Orientador:** Prof. Dr. Audalio Rebelo Torres Jr.

**Co-orientador:** Prof. Dr. Francisco José da  
Silva Dias

SÃO LUÍS

2018



ALEXANDRE RAMOS DE FIGUEIREDO

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA CORRENTE MARÍTIMA NA REMOÇÃO DOS  
SEDIMENTOS NO TERMINAL MARITIMO PONTA DA MADEIRA, SÃO LUÍS - MA**

Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-Graduação em Oceanografia da Universidade Federal do Maranhão como parte dos requisitos para à obtenção do título de Mestre em Oceanografia

**Linha de pesquisa:** Dinâmica dos sistemas costeiros e oceânicos.

**Orientador:** Prof. Dr. Audalio Rebelo Torres Jr.

**Co-orientador:** Prof. Dr. Francisco José da Silva Dias

SÃO LUÍS

2018



Ficha gerada por meio do SIGAA/Biblioteca com dados fornecidos pelo(a) autor(a).  
Núcleo Integrado de Bibliotecas/UFMA

Figueiredo, Alexandre Ramos de.

ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA CORRENTE MARÍTIMA NA REMOÇÃO  
DOS SEDIMENTOS NO TERMINAL MARITIMO PONTA DA MADEIRA EM  
SÃO LUÍS - MA / Alexandre Ramos de Figueiredo. - 2018.  
57 p.

Coorientador(a): Francisco José da Silva Dias.

Orientador(a): Audalio Rebelo Torres Junior.

Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-graduação em  
Oceanografia/ccbs, Universidade Federal do Maranhão, São  
Luís, 2018.

1. Dragagem. 2. Levantamento batimétrico. 3.  
Sedimentação. I. Dias, Francisco José da Silva. II.  
Torres Junior, Audalio Rebelo. III. Título.



FIGUEIREDO, Alexandre Ramos de. **Análise da influência da corrente marítima na remoção dos sedimentos no Terminal Marítimo Ponta da Madeira em São Luís – MA.** 2018. 57 f. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Oceanografia, Universidade Federal do Maranhão, São Luis, 2013.

Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-Graduação em Oceanografia da Universidade Federal do Maranhão, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Oceanografia.

**Linha de pesquisa:** Dinâmica de Sistemas Costeiros e Oceânicos.

**Área de Concentração:** Oceanografia Física

Aprovada em **06 / 09 / 2018.**

#### COMISSÃO EXAMINADORA

---

Prof. Dr. Audalio Rebelo Torres Junior  
Universidade Federal do Maranhão  
Instituto de Ciências do Mar  
**ORIENTADOR**

---

Prof. Dr. Francisco José da Silva Dias  
Universidade Federal do Maranhão  
Instituto de Ciências do Mar  
**CO-ORIENTADOR**

---

Prof. Dr. Osvaldo Ronald Saavedra Mendez  
Universidade Federal do Maranhão  
Instituto de Engenharia Elétrica

---

Prof. Dr. Ricardo Luvizotto Santos  
Universidade Federal do Maranhão

São Luís  
2018



## AGRADECIMENTOS

A Deus, por me dar saúde e força para me manter firme e nunca desistir.

A meus pais, Carmelo e Telma Figueiredo, por me darem todos os subsídios necessários para realização dos meus objetivos e, também, por sempre confiarem em meu potencial.

A minha esposa, Jackeline Gama de Figueiredo, por ter sido tão especial e pelo seu apoio incondicional, apesar de tantas dificuldades, entendendo as minhas ausências e cuidando tão bem do nosso filho Paulo Gabriel.

Aos meus irmãos que sempre me incentivam. Entenderam e supriram minha ausência em diversos encontros familiares, acreditando que estou em busca das realizações profissionais e pessoais.

Aos amigos Iris Pestana da Programação e Paulo Aurélio Cardoso da Marítima (VALE), por aceitarem o desafio de expormos e analisarmos as deficiências do assunto abordado neste estudo.

Ao Prof. Audalio Torres, pela honra da orientação deste trabalho, por aceitar as reuniões fora do horário, pela paciência para entender a rotina de um profissional acadêmico e por fazer de mim um profissional melhor.

A todos os colegas do curso Oceanografia (LHiCEAI), em especial e principalmente, Vivian Salles e Erlen Santos por se preocuparem comigo e por entenderem o esforço deste desafio e que hoje fazem parte do meu ciclo de amizades.

Agradeço aos professores participantes da banca examinadora que dividiram comigo este momento tão importante e esperado.

No mais, agradeço a todos que contribuíram direta ou indiretamente para a conclusão deste trabalho.



## RESUMO

O Terminal Marítimo da Ponta da Madeira é composto por três píeres com profundidades média de 25 metros, o que possibilita assim a atracação de navio de grande calado. Porém os píeres estão situados em regiões de intensas dinâmica sedimentar, ficando essas áreas sujeitas a processos de assoreamento, que demandam frequentes atividades de dragagem. Para garantir as profundidades adequadas para as operações portuárias, a Vale realiza, há mais de 30 anos, dragagens para a manutenção deste terminal. O objetivo deste trabalho foi analisar o comportamento hidrodinâmico e sedimentológico do Píer IV Norte do Terminal Marítimo de Ponta da Madeira. Tem como objetivo analisar o comportamento hidrodinâmico e sedimentológico e seus impactos na operação do Píer a partir de pesquisa em campo, levantamento e análise histórica dos dados batimétricos; monitoramento da sequência de Construção – Píer 4 Norte a influência da cravação das estacas na erosão do fundo marinho (processo de construção do píer) e na movimentação de sedimentos; definir profundidades mínimas a serem mantidas em função do navio de projeto e avaliar a estratégia de dragagem para minimizar impactos operacionais. Diante da análise preliminar dos dados (LH), permite identificar o impacto de manter o navio atracado e carregado, em condições operacionais extremas. Foi necessário definir rotina com estruturação de equipe dedicada para LH, processamento e análise das batimetrias, como também, direcionador para intervenções das dragagens e otimizar a demanda de volume para dragagem que impacta nas horas de utilização do píer. A continuidade do estudo de sedimentação com frequentes levantamentos hidrográficos proporciona melhor conhecimento do comportamento da dinâmica de sedimentação uma vez que as profundidades mínimas a serem mantidas para navio de projeto (VMAX) exigem avaliar a melhor estratégia de dragagem para minimizar impactos operacionais e financeiros.

**Palavras-chave:** Sedimentação, levantamento batimétrico, dragagem.



## ABSTRACT

The Ponta da Madeira Maritime Terminal is composed of three piers with an average depth of 25 meters, which allows the mooring of a large draft. However, the piers are located in regions of intense sedimentary dynamics, these areas being subject to silting processes, which require frequent dredging activities. To ensure adequate depths for port operations, Vale has been carrying out dredging for more than 30 years to maintain this terminal. The objective of this work was to analyze the hydrodynamic and sedimentological behavior of Pier IV Norte of the Maritime Terminal of Ponta da Madeira. It has as purpose to analyze the hydrodynamic and sedimentological behavior and its impacts on the operation of the Pier from research in Field, survey and historical analysis of the bathymetric data; monitoring of the Sequence of Construction - Pier 4 Norte the influence of the cutting of the stakes in the erosion of the seabed (process of construction of the pier) and the movement of sediments; define minimum depths to be maintained as a function of the project vessel and evaluate the dredging strategy to minimize operational impacts. Before the preliminary data analysis (LH), it allows identifying the impact of keeping the ship berthed and loaded under extreme operational conditions. It was necessary to define routine with dedicated team building for LH, bathymetry processing and analysis, as well as a guide for dredging interventions and to optimize the volume demand for dredging that impacts the hours of use of the pier. The continuity of the sedimentation study with frequent hydrographic surveys provides a better understanding of the behavior of sedimentation dynamics since the minimum depths to be maintained for the project vessel (VMAX) require evaluating the best dredging strategy to minimize operational and financial impacts.

**Keywords:** Sedimentation, bathymetric survey, dredging



## LISTA DE TABELAS

|  |    |
|--|----|
| <b>Tabela 1</b> - Limites de área do Píer IV Norte.....  | 31 |
| <b>Tabela 2</b> - Valores de offsets. ....   | 32 |
| <b>Tabela 3</b> - valores do patch test.....   | 34 |
| <b>Tabela 4</b> – Valores obtidos no período de referência pelo ADCP, instalado no Dolfim 08. .... | 38 |
| <b>Tabela 5</b> - Valores obtidos no período de referência pelo ADCP, instalado no Dolfim 15. .... | 39 |
| <b>Tabela 6</b> - Profundidades operacionais dos píeres.....                                       | 50 |
| <b>Tabela 7</b> – Estimativa de frequência de dragagem de manutenção do Píer IV Norte              | 53 |
| <b>Tabela 8</b> – Volumes médios mensais de dragagem de manutenção.....                            | 53 |
| <b>Tabela 9</b> – Cálculo para descobrir a capacidade de transporte .....                          | 54 |





## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ADCP – *Acoustic Doppler Current Profiler* (Perfilador hidroacústico horizontal)

ANTAQ – Agência Nacional de Transportes Aquaviários

BM – Baixa-mar

CHM – Centro de Hidrografia da Marinha do Brasil

CLN – Capacitação Logística Norte

DNPM – Departamento Nacional de Produção Mineral

EFC – Estrada de Ferro Carajás

FCTH – Fundação Centro Tecnológico de Hidráulica

FMDS – *Floor Management Development System*

LH – Levantamentos hidrográficos

LI – Linhas de Instabilidade

NR – Nível de redução que são referidas as alturas de maré de sondagem

OHI – Organização Internacional de Hidrografia

PM – Preamar

TMPM – Terminal Marítimo de Ponta da Madeira

TUP – Terminal de Uso Privado



## SUMÁRIO

|   |    |
|---|----|
| <b>1. Introdução</b> .....  | 14 |
| <b>2. Objetivos</b> .....   | 18 |
| 2.1. Objetivo geral .....   | 18 |
| 2.2. Objetivos específicos .....  | 18 |
| <b>3. Área de estudo</b> .....  | 19 |
| 3.1.1. Climatologia .....   | 21 |
| 3.1.2. Marés .....  | 21 |
| 3.1.3. Correntes .....  | 23 |
| 3.2. Batimetria .....   | 24 |
| 3.3. Dragagem .....   | 26 |
| 3.3.1. Equipamentos de Dragagem.....  | 27 |
| <b>4. Métodos e materiais</b> .....   | 29 |
| 4.1. Levantamento batimétrico .....   | 31 |
| 4.1.1. Estação Maregráfica.....   | 31 |
| 4.1.2. Calibração .....   | 32 |
| 4.1.3. Calibração dos Equipamentos de LH - Patch Test.....  | 33 |
| 4.2. Processamento dos dados.....   | 34 |
| 4.2.1. Aquisição e Processamento .....  | 34 |
| 4.2.2. Processamento do Levantamento Batimétrico.....   | 35 |
| 4.2.3. Frequência de levantamentos batimétrico por área de controle .....                               | 35 |
| <b>5. Resultados e discussão</b> .....  | 36 |
| 5.1. Medição da intensidade das velocidades da corrente e amplitude de maré ...                         | 36 |
| 5.2. Identificação da dinâmica de sedimentação .....  | 40 |
| 5.2.1. Durante o estágio de construção.....   | 41 |
| 5.2.2. Durante o estágio de comissionamento (atracação e amarração) .....                               | 43 |
| 5.2.3. Durante o estágio de <i>ramp-up</i> e teste de operação (atracação e carregamento parcial) ..... | 44 |
| 5.2.4. Durante o estágio de operação (atracação e carregamento total) .....                             | 44 |
| 5.3. Definição de profundidades mínimas operacionais para navio de projetado ...                        | 49 |
| 5.4. Avaliação da estratégia de dragagem para minimizar possíveis impactos operacionais .....           | 50 |
| 5.4.1. Definição de área de controle e área de intervenção para dragagem .....                          | 50 |
| 5.5. Elaboração do cronograma de dragagem .....   | 51 |
| 5.5.1. Frequência de dragagem.....  | 52 |



|  |           |
|--|-----------|
| 5.5.2. Volume de dragagem .....  | 53        |
| 5.5.3. Impacto operacional da dragagem (janelas de atracação de navios para manutenção de profundidade)..... | 53        |
| 5.5.4. Evolução da profundidade e impactos da dragagem.....  | 54        |
| <b>6. Conclusão.....</b>   | <b>55</b> |
| <b>7. Referências bibliográficas .....</b>   | <b>58</b> |

## 1. Introdução

O Brasil exportou mais de 85% do minério de ferro produzido em 2010 – sendo o segundo maior produtor de minério de ferro do mundo, atrás apenas da Austrália - e o quarto em reservas, cerca de 29 bilhões de toneladas, de acordo com o Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM, 2018).

O minério de ferro respondeu por cerca de 40% do total de cargas transacionadas pelas instalações portuárias brasileiras em 2010. Já em 2017 este produto representou a principal carga movimentada, cerca de 88%. É o principal produto em termos de tonelagem. A movimentação total registrada foi de 395,4 milhões de toneladas, 5,2% maior do que em 2016, conforme consta no anuário da Agência Nacional de Transportes Aquaviários (ANTAQ, 2018).

Os Terminais de Uso Privativo (TUP), com relação ao tipo de instalação portuária responsável pela movimentação do minério, foram os principais movimentadores da carga, respondeu por 88% da movimentação em 2017. Percebe-se a tendência para a predominância dos terminais de uso privado pois este tipo de granel é escoado em sua maior parte por instalações altamente especializadas, principalmente pelos terminais de empresas como a Vale (ANTAQ, 2018).

As principais instalações portuárias que movimentaram minério de ferro em 2017 são: Ponta da Madeira (MA), Tubarão (ES), Itaguaí (RJ), Ilha Guaíba (RJ) e Porto do Açu (RJ). Conforme mostra a figura 1, o terminal foi a principal instalação que movimentou minério de ferro em 2017, de acordo com o anuário da ANTAQ (2018).

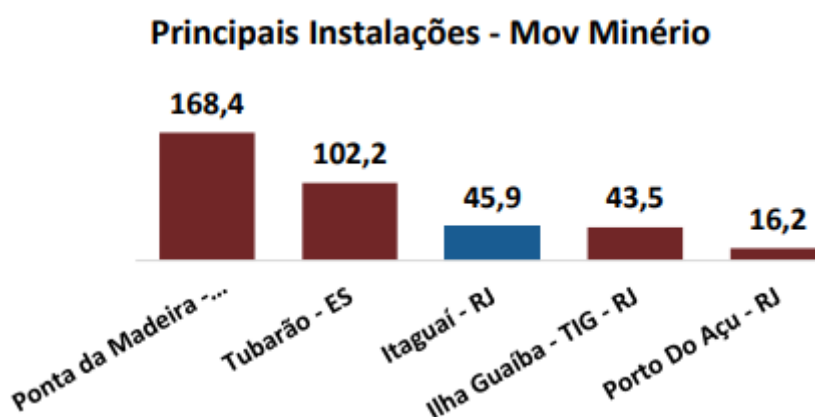


Figura 1. Movimentação de Minério por Instalação  
Fonte: ANTAQ (2018)

O Terminal Marítimo de Ponta da Madeira representa um dos principais ativos da Empresa Vale e um dos mais importantes terminais de embarque de minério de ferro e manganês do mundo, e está localizado na cidade de São Luís - MA, que possui a maior amplitude de maré das Américas e a segunda maior do mundo.

Inaugurado em 06 de janeiro de 1986, em São Luís - MA, o Terminal Marítimo Ponta da Madeira (TMPM), completou 32 anos, e está se preparando para ser o maior porto do mundo em 2018 (VALE, 2017). O crescimento da movimentação do terminal de 2010 a 2017 foi de 79%, conforme pode ser observado na figura 2.

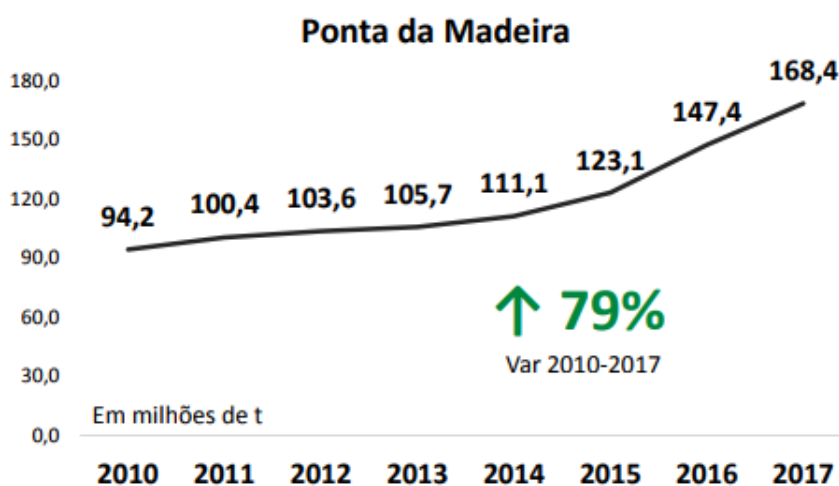


Figura 2. Evolução de movimentação de carga do TMPM  
Fonte: ANTAQ (2018)

O terminal é uma das principais estruturas portuárias do país, por onde atracam os maiores navios do mundo. Tem capacidade de acomodar cinco navios simultaneamente. Usado para movimentar principalmente minério de ferro, e também minério de manganês. Possui 600 mil metros quadrados, 55 milhas náuticas de canal de acesso, sete áreas de fundeio, 1,6 quilômetros de acesso e píer com profundidades que variam entre 23 a 25 metros.

Com mão de obra qualificada e tecnologia de ponta, este terminal marítimo é líder nacional em movimentação de carga, e se prepara para duplicar a capacidade de movimentação até 2018.

A Vale S/A publicou em seu site que com investimentos bilionários para receber o minério de ferro do projeto de mineração em Canaã dos Carajás (PA), que vai agregar 90 milhões de toneladas à produção do Sistema Norte da mineradora, e Ponta da Madeira e ficará à frente de portos da Austrália (Figura 3),

principal exportador do mundo da *commodity*. O projeto Capacitação Logística Norte, CLN150 e S11D são os maiores projetos de infraestrutura logística da história da Vale S/A. Estes projetos, somados, irão capacitar o Sistema Norte para transportar e embarcar, a partir de 2018, um total de 230 milhões de toneladas de minério de ferro por ano. Desta forma, a Vale S/A, maior produtora global de minério de ferro, deve começar a produzir mensalmente, já no segundo semestre de 2018, o mesmo volume desenhado para 2020.

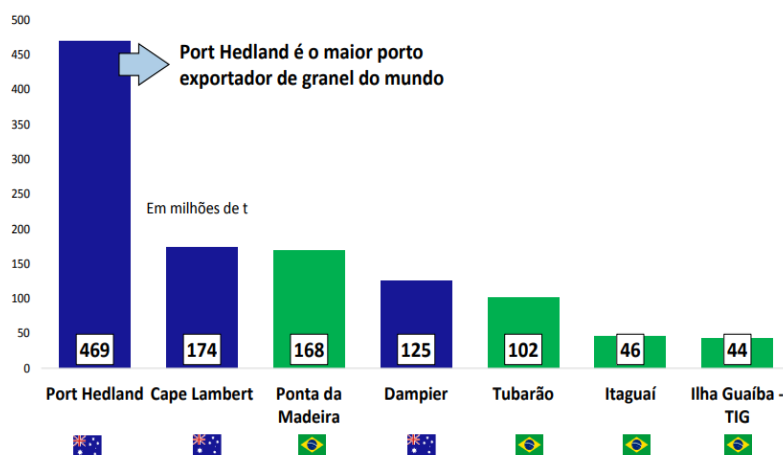


Figura 3. Posição do TPM nos portos mundiais  
Fonte: ANTAQ (2018)

As obras de ampliação da estrutura portuária já alcançaram 100% da execução, que incluíram intervenções no TPM, ampliações *onshore* e *offshore*, além da expansão do terminal ferroviário, localizado dentro do porto. Em função do projeto, estão previstas ainda a construção de um ramal ferroviário, com 101 quilômetros de extensão, e a expansão da Estrada de Ferro Carajás (EFC).

O projeto Capacitação Logística Norte, o CLN 150, teve como implantação no porto – TPM as etapas *onshore* e *offshore*. Esta última etapa foi responsável pela construção do Píer 4 (berço Sul) e a ponte de acesso ao píer 4 (Figura 4).

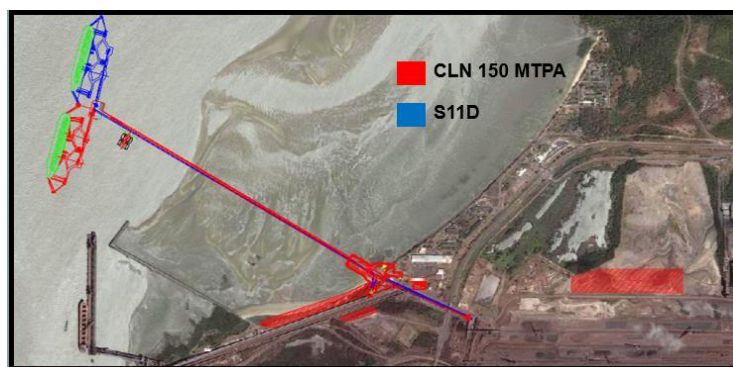


Figura 4. Esquemático do Projeto de Expansão Offshore  
Fonte: Vale S/A

Já, o projeto *Offshore* do S11D consiste na construção do Píer IV Norte, obra que acontece em um píer localizado a 1,8 km da costa, sob influência de fortes correntes de maré, capaz de receber navios do tipo Valemax, os maiores mineraleiros do mundo, com capacidade para transportar 400 mil toneladas de minério em uma única viagem e com o intuito de escoar o minério de ferro proveniente das minas de Carajás e do projeto S11D.

Em 2017, o TPM teve a maior consignação média (Figura 5) com 217 mil toneladas por navio. Superando a carga média de outros grandes portos em movimentação de carga no Brasil, inclusive pertencentes à própria Vale S/A.



Figura 5. Consignação média TPM  
Fonte: ANTAQ (2018)

Essa movimentação de 217 mil toneladas por navio representa uma prancha média de 7,8 mil toneladas a cada hora, ou seja, um tempo médio de 28 horas para completar a carga de um navio, conforme descrito no anuário da ANTAQ (2018).

No capítulo 2 é descrito os objetivos gerais e específicos. No capítulo 3 é descrita as características da área de estudo, abordando fatores como climatologia, mares, correntes, batimetria. Além disso, é abordado a batimetria local e as atividades de dragagem realizada na região.

No capítulo 4 é descrito os métodos abordados neste trabalho, levantamento batimétrico, estações maregráfica, calibração dos equipamentos e processamento dos dados. Os resultados e discussão são dissertados no capítulo 5. A conclusão é descrita no capítulo 6.

## 2. Objetivos

O Terminal Marítimo Ponta da Madeira (TMPM) é uma das principais estruturas portuárias do país por onde atracam os maiores navios do mundo. Além disso, representa um dos principais ativos da Empresa Vale e é um dos mais importantes terminais de embarque de minério de ferro e manganês do mundo.

O TMPM é composto por três píeres com profundidades média de 25 metros, o que possibilita assim a atracação de navio de grande calado. Porém os píeres estão situados em regiões de intensa dinâmica sedimentar, ficando essas áreas sujeitas a processos de assoreamento, que demandam frequentes atividades de dragagem. Para garantir as profundidades adequadas para as operações portuárias, a Vale realiza, há mais de 30 anos, dragagens para a manutenção deste terminal.

A partir desta pesquisa poderá ser realizado um melhor gerenciamento das operações de dragagem, o que diminuiria os custos que a empresa Vale tem com a manutenção da profundidade dos píeres.

### 2.1. Objetivo geral

Analisar o comportamento hidrodinâmico e sedimentológico do Píer IV Norte do Terminal Marítimo de Ponta da Madeira.

### 2.2. Objetivos específicos

- Avaliar as intensidades das velocidades da corrente que atuam neste berço;
- Realizar levantamentos batimétricos para identificar a dinâmica de sedimentação da área estudada;
- Definir profundidades mínimas a serem mantidas a fim de garantir a operação do Píer IV Norte com a embarcação para o qual foi projetado;
- Avaliar a estratégia de dragagem para minimizar possíveis impactos operacionais;
- Avaliar os impactos da operação deste berço.



### **3. Área de estudo**

Neste capítulo é descrita a área de estudo, com um breve resumo sobre os regimes dos ventos, marés, precipitação e correntes da região.

#### **3.1. Complexo Estuarino de São Marcos**

O Complexo Estuarino de São Marcos (CESM) tem aproximadamente 3.000 km<sup>2</sup> de área e faz parte de um conjunto de estuários e reentrâncias com aproximadamente 5.414 km<sup>2</sup> de manguezais (SOUZA FILHO, 2005). A profundidade média do CESM é de 10 metros, porém em algumas regiões a profundidade pode ter mais de 50 metros (SOARES, 2015).

O CESM recebe vários rios, incluindo Grajaú, Pindaré e Mearim. Este último é conhecido pelo fenômeno natural chamado de pororoca, em que o mar avança sobre o leito do rio formando grandes ondas.

O Complexo Estuarino de São Marcos é fundamental na navegação marítima entre a ilha de São Luís e o oeste do Maranhão, sendo que em uma de suas margens está localizado o Complexo Portuário de São Luís, que abrange três importantes estruturas de portos que são o Terminal Marítimo da Ponta da Madeira (TMPM) que pertence a Empresa Vale, o Porto do Itaqui da Empresa Maranhense de Administração Portuária (EMAP) e o Terminal Portuário privado da Alumar (MILEN, A. F. et al. 2006).

De acordo com SANTOS (2001), a geomorfologia do setor leste do CESM, especificamente o trecho que se estende da ilha do Curupu até a proximidade do porto da Vale S/A é caracterizado pela presença de praias arenosas oceânicas dissipativas, formada por areia fina a muito fina de significativa extensão e baixa declividade. A conformação e batimetria, associado a presença de um dos mais profundos canais naturais, confere ao CESM uma vocação portuária e industrial. Em síntese, o CESM caracteriza-se geologicamente por formação do tipo sedimentar que encerra feições morfológicas predominantemente de ambiente estuarino sob o domínio de grandes amplitudes de marés.

A existência de um complexo portuário em São Luís torna a cidade um pólo de atração para indústrias que utilizam o transporte marítimo, a Vale S/A e a Alcoa são exemplos de empresas que se instalaram na cidade, atraídas, dentre outros fatores, pela potencialidade portuária. (MILEN, A. F. et al. 2006). A figura 6 apresenta uma imagem do Complexo Estuarino de São Marcos.

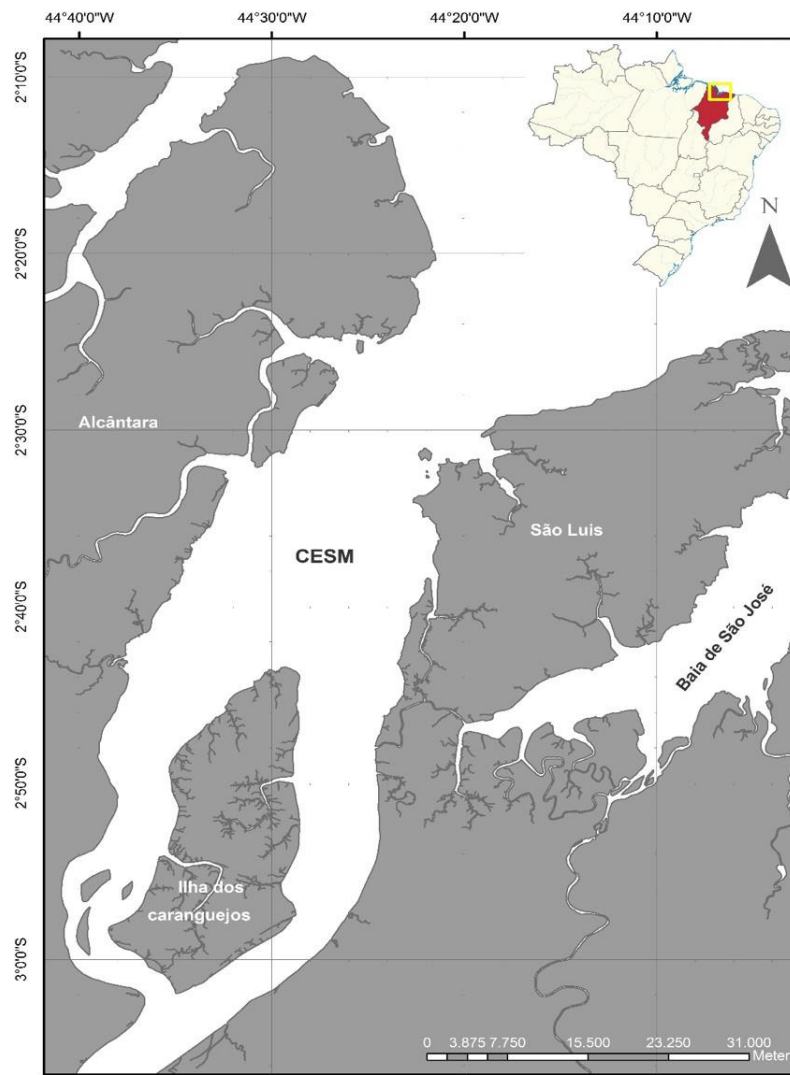


Figura 6. Complexo Estuarino de São Marcos

Além disso, o complexo apresenta características singulares quanto a sua dinâmica de sedimentos o que impacta diretamente na movimentação de carga dos portos existentes ali. Entender o regime de ventos e de precipitação, as marés e a velocidade de corrente são de suma importância para compreender a complexa dinâmica de sedimentação.

### 3.1.1. Climatologia

Segundo Viana (2000), o litoral norte da Ilha de São Luís sofre efeito de ventos constantes, com predominância de ventos alísio de nordeste, frequência de 43%. A figura 7 comprova a direção dos ventos no litoral maranhense.

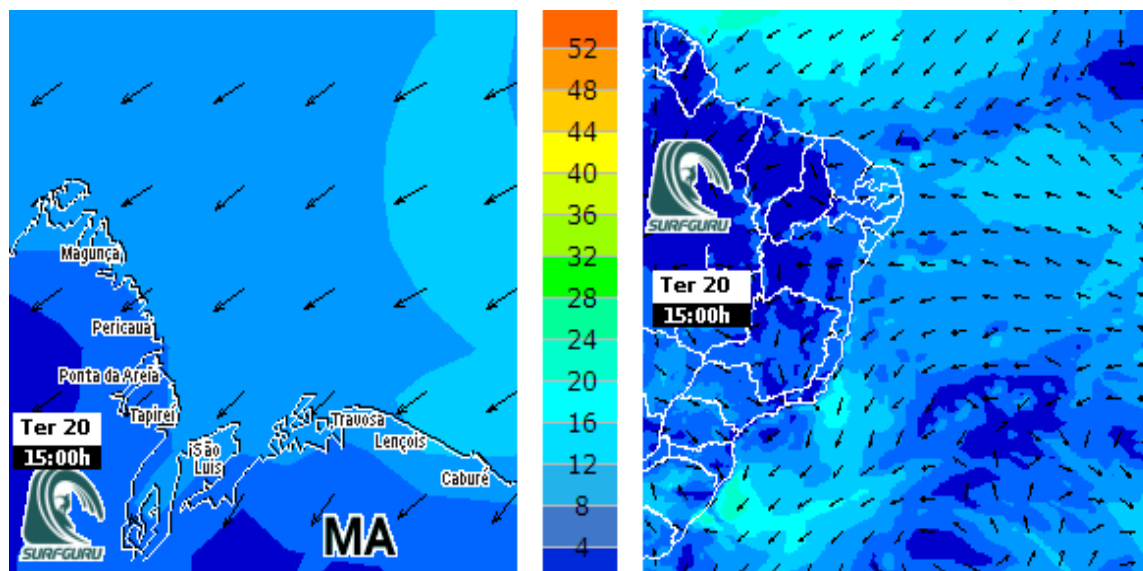


Figura 7. Direção dos ventos no litoral maranhense  
Fonte: CLIMA E TEMPO (2018)

A precipitação média anual no litoral norte nordeste é de aproximadamente 1.600 mm. Os máximos são observados no litoral norte com precipitações superiores a 2.500 mm por ano. Estes máximos apresentam ciclo anual bem distinto, com uma estação de estiagem e outra chuvosa, aumentando a precipitação desde o verão até o outono. Também é uma região, onde a precipitação durante todo o ano origina-se de sistemas precipitantes, oriundos de linhas de instabilidade (LI), que surgem devido à circulação de brisa marítima ao longo da costa atlântica da Guiana francesa até o norte do Maranhão (Cohen et al., 1995).

### 3.1.2. Marés

O CESH se caracteriza por uma hidrodinâmica regida pelo sistema de marés semi-diurnas (duas preamares e duas baixa-mares por dia lunar com intervalos proporcionais de cerca de 6h), com amplitude média de 2,9 metros, podendo atingir 6,5 metros de altura (DILLENBURG et al., 2009; KJERFVE; LACERDA, 1993; MOLION; BERNARDO, 2002) o que faz essa região ser considerada bem misturada (HAYES, 1975).

A observação e a mensuração realizada em campo da variação do nível da água, estão diretamente relacionadas à sua utilização direta na caracterização da maré observada local em proveito das atividades de levantamentos hidrográficos em apoio à produção e atualização de documentos náuticos (NORMAM 25-REV2, 2017).

A maregrafia é uma das atividades primordiais a serem executadas antes e durante um levantamento hidrográfico (LH), portanto qualquer descuido durante esta atividade poderá invalidar um LH. Logo, os passos que serão descritos a seguir visam identificar e explicar os pontos fundamentais de uma atividade de maregrafia em proveito da produção e atualização de documentos náuticos. Nas figuras 8 e 9, está descrito a apresentação dos parâmetros da estação maregráfica, com amplitudes e fases das componentes harmônicas do Terminal Marítimo Ponta da Madeira.


|   |  |  |   |  |  |  |
|---|--|--|---|--|--|--|
|    |  | 30 149   | <b>TÁBUA DAS MARÉS</b>  | F-41 – Padrão - Terminal da Ponta da Madeira – 30149 – Versão 1/2013 |  |  |
| F-41  |  | <b>DESCRIÇÃO DE ESTAÇÃO MAREGRÁFICA</b>  |   |  |  |  |
| Estação Terminal da Ponta da Madeira  |  | Estado MA  |   | Localidade Itaqui  |  |  |
| LH Carta N.º. 413 – Terminal da Ponta da Madeira e Proximidades do Porto de Itaqui  |  | Navio NHI SÍRIUS   |   | Ano 1991   |  |  |
| <b>Coordenadas geográficas</b><br>Lat 02° 33' 9 S<br>Long 044° 22' 7 W<br>Datum WGS-84<br>Fuso +3   |  | O nível de redução está 4,5 centímetros acima do zero da régua de 1991 a 1993.<br><b>Fonte de informação:</b> Análise estatística e harmônica de 731 dias de observação da maré.<br><b>Tipo de marégrafo:</b> Hidrologia mensal.<br><b>Zero do marégrafo:</b> Coincide com o zero da régua   |   |  |  |  |
| <b>Descrição das réguas de marés</b><br>Conjunto de régua de alumínio da Hidrologia S.A. com 1 m, perfazendo 9 m.<br>Esta ficha foi compilada do Relatório CVRD-06/90, F-41-400-001/91, F-41-410-001/98 e F-41-413-001/12 . Atualizada em 20/08/2013. |  | <b>Descrição das referências de nível</b><br>RN-P-CVRD – Disco de bronze chumbado em um pequeno pilar de concreto, no canto de piso, à direita de quem entra na porta de abrigo do marégrafo da empresa CVRD. Apresenta o número 1374 pintado de vermelho no pequeno pila de concreto. Citada a partir de 1990.<br>RN2-DHN – Lat: 02° 33' 56.03048 S, Long: 044° 22' 42.03127 W, Alt Elipsoidal: -19.847, Cravada aproximadamente 4 m à direita do abrigo do marégrafo da CVRD para quem o acessa. Implantada em 1998.<br>RN5-DHN –Localizada nas por ante a ré e à direita da guarita de acesso aos cais Implantada em 2012.<br>RN6-DHN – Lat: 02° 33' 57.68070 S, Long: 044° 22' 43.42738 W, Alt Elipsoidal: -19.938 ± 0.246m Localizada aproximadamente 4m à direita do marégrafo na direção do pilar subsequente em que se encontra a régua. Implantada em 2012. |   |  |  |  |
| DHN-6016-A  | <b>Arquivo Técnico a ser preenchida no CHM</b><br><b>Recebida em:</b><br>Relatório CVRD-06/90<br>LH-003/98 – RA-096/98<br><b>Documento de referência:</b><br>LH-010/12 e LH-014/12 – RA 422-12 |  | <b>Pessoal que tomou parte na montagem</b><br><table border="1" style="width: 100%;"> <tr> <td style="width: 50%;"> <b>Equipe de 1991:</b><br/>           SC Venceslau<br/> <b>Chefe da equipe:</b> SC Marco Antônio         </td> <td style="width: 50%;"> <b>Equipe de 2012:</b><br/>           CT Nascimento<br/>           CT Bruno Neves<br/>           IT Daniel Martins<br/>           3º SG-HN Moreira – CB-HN Jonilson<br/> <b>Chefe da equipe:</b> CC Toledo         </td> </tr> </table> |  | <b>Equipe de 1991:</b><br>SC Venceslau<br><b>Chefe da equipe:</b> SC Marco Antônio | <b>Equipe de 2012:</b><br>CT Nascimento<br>CT Bruno Neves<br>IT Daniel Martins<br>3º SG-HN Moreira – CB-HN Jonilson<br><b>Chefe da equipe:</b> CC Toledo |
| <b>Equipe de 1991:</b><br>SC Venceslau<br><b>Chefe da equipe:</b> SC Marco Antônio  | <b>Equipe de 2012:</b><br>CT Nascimento<br>CT Bruno Neves<br>IT Daniel Martins<br>3º SG-HN Moreira – CB-HN Jonilson<br><b>Chefe da equipe:</b> CC Toledo                                       |  |   |  |  |  |

Figura 8. Dados da Estação Maregráfica do TPM  
 Fonte: FEMAR

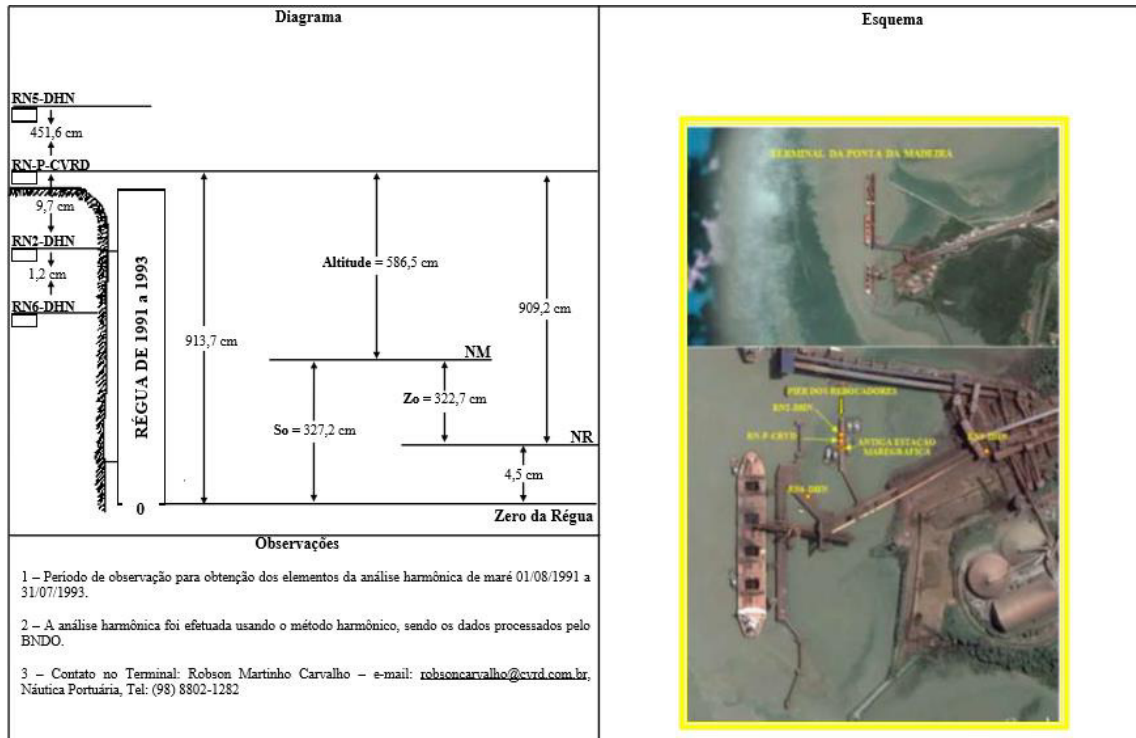


Figura 9. Dados e Localização da Estação Maregráfica do Tmpm  
 Fonte: FEMAR

### 3.1.3. Correntes

O transporte do material em suspensão depende do movimento da água. Em um movimento turbulento, as partículas se deslocam continuamente para cima e para baixo, devido à natureza do escoamento, de modo que o movimento vertical em um escoamento horizontal é zero (MORAIS, J.O. 1977).

Medições das correntes de maré feitas na zona de arrebentação do litoral norte da ilha de São Luís mostram o predomínio de correntes induzidas por ondas com deslocamento para esquerda, que correspondem à direção geral Leste-Oeste da praia, sendo esta direção mais coerente com a dos ventos dominantes, que provêm do quadrante nordeste (FEITOSA, 1989). Os resultados indicam o domínio de correntes de baixa velocidade com índices oscilando entre 0,40 m/s e 1,6 m/s.

Moraes (1977) mostra que no CESM, velocidades de correntes de maré alcançam até 2,5 m/s no Canal do Boqueirão. No canal, a leste do Banco dos Cavalos, as correntes de maré atingem a velocidade de 2,3 m e 1,2 a 1,5 m/s na parte interna.

Neste estudo, foram levados em consideração os resultados obtidos em campanhas de campo para correntometria, salinidade, temperatura das águas,

material em suspensão, sedimentos de fundo e das suas margens, batimetria e aspectos geomorfológicos que, associados, levam a definir o comportamento hidrodinâmicos sedimentar do CESM.

Sendo assim, a dinâmica de sedimentação engloba a movimentação de partículas do fundo do oceano com as interferências das velocidades das correntes, marés, ondas, precipitações e ventos. E, no estudo de caso deste trabalho, a também será considerada a influência da atracação, permanência durante carregamento e desatracação de navios no Píer IV do Terminal Marítimo Ponta da Madeira.

### 3.2. Batimetria

A batimetria é o estudo de profundidade de uma massa de água (maré, lagos, rios). O levantamento batimétrico é representado por curvas batimétricas, ou seja, curvas que unem pontos com a mesma profundidade e pode ser obtida de forma direta (uso do prumo de mão, estádias) ou de forma indireta (através de sensores acústicos, sensores eletromagnéticos ou aerotransportados) (KRUEGER, 2005), conforme representado na figura 10.

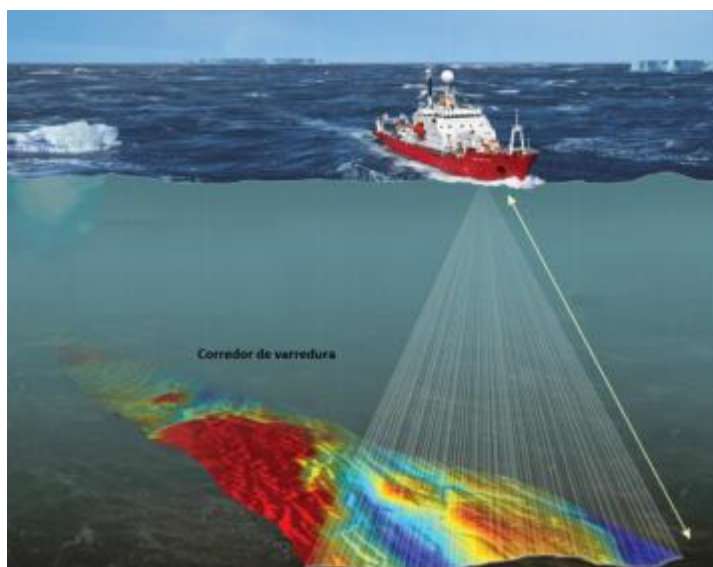


Figura 10. Curvas batimétricas  
Fonte: Vale S/A (2018)

Uma batimetria pode ser classificada como monofeixe e multifeixe. Na batimetria monofeixe, apenas um feixe sonoro é emitido, e apenas uma profundidade é obtida em um determinado instante. Assim, são obtidos perfis de profundidade (Figura 11).

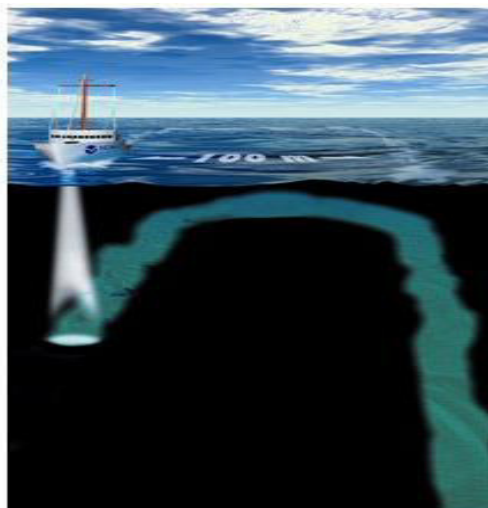


Figura 11. Batimetria Monofeixe  
Fonte: Vale S/A (2018)

Na batimetria multifeixe, é emitida uma grande quantidade de feixes simultaneamente. Os referidos feixes são dispostos de forma angular visando levantar áreas contíguas, seguindo a direção perpendicular à embarcação de medição. Isso possibilita o mapeamento de grandes faixas do leito, com variação de profundidade, obtendo grande resolução da área analisada (Figura 12).

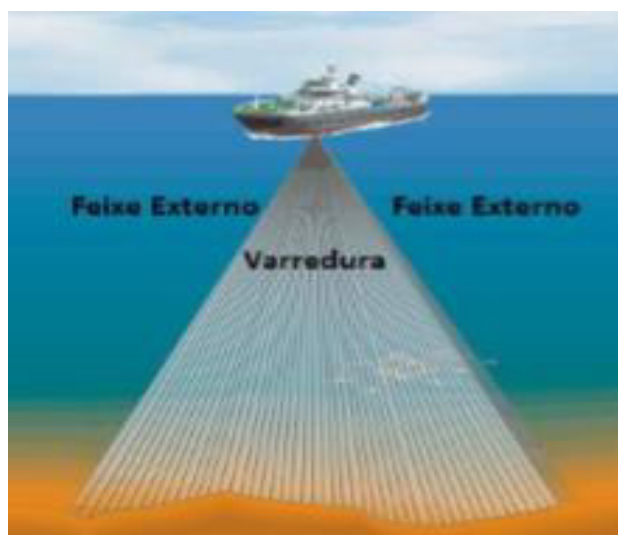


Figura 12. Batimetria multifeixe  
Fonte: Vale S/A (2018)

O levantamento batimétrico tem diversas aplicações: medição de vazão, processos de mineração, produção de alumínio, controle de assoreamento, dragagem, entre outros. Neste estudo, sua aplicação se deu para garantir a profundidade dos berços, de forma a habilitar atracação, permanência até o completo carregamento de navios de grande porte e também para verificação e

estudos de sedimentação para identificação da necessidade de realização de dragagem e definição do método e frequência de intervenção, assim como porte da embarcação e dimensionamento dos recursos a bordo.

Os equipamentos utilizados para realização da batimetria são: ecobatímetro e GPS. O GPS é usado para fornecer o posicionamento enquanto que o ecobatímetro é utilizado para conhecer a profundidade. Quando combinadas, a posição e a profundidade indicam a real batimetria do local. O levantamento batimétrico consiste então em navegar com a embarcação dotada destes equipamentos em linhas planejadas, de forma a cobrir a área de interesse.

### **3.3. Dragagem**

Dragagem é processo de ação mecânica, hidráulica ou pneumática que permite a realocação de sedimentos e solo submersos ou uma obra ou serviço de engenharia que consiste na limpeza, desobstrução, remoção, derrocamento ou escavação de material do fundo de rios, lagos, mares, baías e canais proporcionando assim, o aumento da calha de rios, estuários e áreas costeiras. Em sua principal atividade a manutenção de vias navegáveis e o desassoreamento de rio para evitar enchentes.

Na prática, é a remoção do solo submerso e o descarte em área devidamente regulamentada pelos órgãos ambientais (municipais, estaduais e federais). A dragagem, necessariamente, deve ser executada com equipamentos sensorizados e dotados de computadores de bordos para os controles: da produção, da posição vertical e da posição horizontal. Um equipamento de dragagem sensorizado e calibrado evita erros grosseiros de execução, como excessivas sobredragagem e dragagem fora da área delimitada.

A dragagem tem participação em, pelo menos, cinco importantes setores da economia: Transportes, Construção Civil, Saneamento, Mineração e Turismo. As obras de dragagem são aprofundamento ou de implantação de vias navegáveis e complexos portuários.



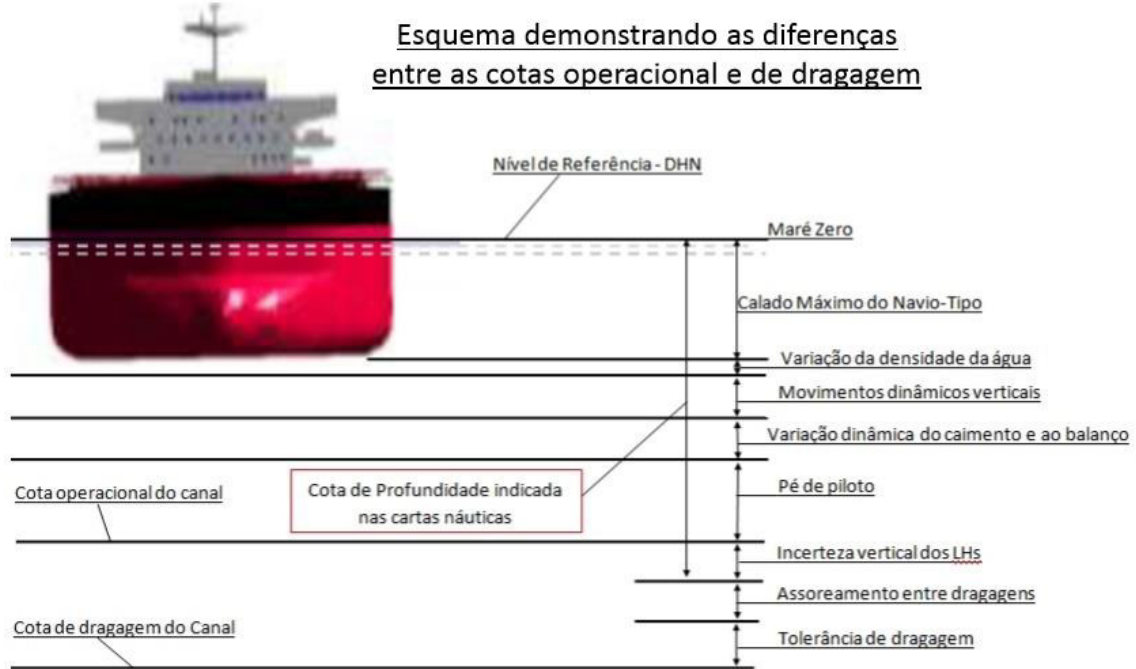


Figura 13. Esquemático da Cota Operacional e de dragagem  
Fonte: A2

### 3.3.1. Equipamentos de Dragagem

- Dragas Hidráulicas: Dragas autotransportadoras de arrasto, De Sucção e recalque com desagregador, de Sucção, de injeção de água;



Figura 14. Dragageira autotransportadora de arrasto

- Dragas de ação Mecânica: Retroescavadeiras, Caçamba Mandíbulas (Grab, Clamshell), Pá de arrasto, Alcatruzes
- Dragas pneumáticas

A Dragagem tem natureza tipicamente multidisciplinar. A Engenharia Civil Obra de engenharia civil por natureza, como dimensionamento de canais de acesso, estruturas de abrigo, bacia de evolução e estrutura de acostagem.



Dominar alguns conhecimentos básicos de Engenharia Naval, pelo menos de ordem qualitativa, são também desejáveis e úteis no projeto das obras portuárias. Importante conhecer melhor as características estruturais mais importantes dos navios e embarcações, as suas dimensões e condições de flutuação e estabilidade.

O melhor método de medir e avaliar o andamento da dragagem através de Levantamentos Hidrográficos. As normas e recomendações do Centro de Hidrografia da Marinha do Brasil (CHM) estão descritas na NORMAM25 e a S-44 da Organização Internacional de Hidrografia (OHI).

A engenharia mecânica está associada aos equipamentos de dragagem, devido a sua alta complexidade. Como caixas redutoras, bombas para sucção de materiais, guinchos e etc. A Geologia com a Geotecnia e a Mecânica dos Solos assumem um papel muito relevante no projeto das obras de dragagem portuárias. Já que o tipo de substrato a ser removido demandará um tipo de equipamento de dragagem a ser utilizado.

#### 4. Métodos e materiais

Apesar das grandes profundidades (25 metros), os píeres estão situados em regiões de intensa dinâmica de movimentação de sedimentos, ficando essas áreas sujeitas a processos de assoreamento, o que demanda frequentes atividades de dragagem. Para garantir as profundidades adequadas as operações portuárias, a Vale S/A realiza a mais de 30 anos dragagem para manutenção desse terminal.

Para um melhor controle das áreas monitoradas, no quesito sedimentação, foi necessário seccionar toda a área em áreas menores, de acordo com o requisito operacional.

Áreas de controle foram definidas para cada píer ou área de influência na sedimentação dos píeres. A dragagem de manutenção é realizada nas áreas do Píer I, Píer III, Píer IV, Píer de Rebocadores, Bacia de Evolução. As figuras 15, 16 e 17 ilustra os píeres da Vale S/A e as plantas com delimitação das áreas de controle.



Figura 15. Áreas de controle do Píer I, Píer de Rebocadores, Píer III berço e tardoz  
Fonte: Vale S/A (2018)

O monitoramento do Píer IV é realizada em 5 áreas: uma situada ao norte do berço norte (área A); outra à frente da linha de atracação (área B), uma ao sul do berço sul (área C); uma no tardoz (parte próxima à costa) do berço sul (área D); e outra do berço norte (área E).

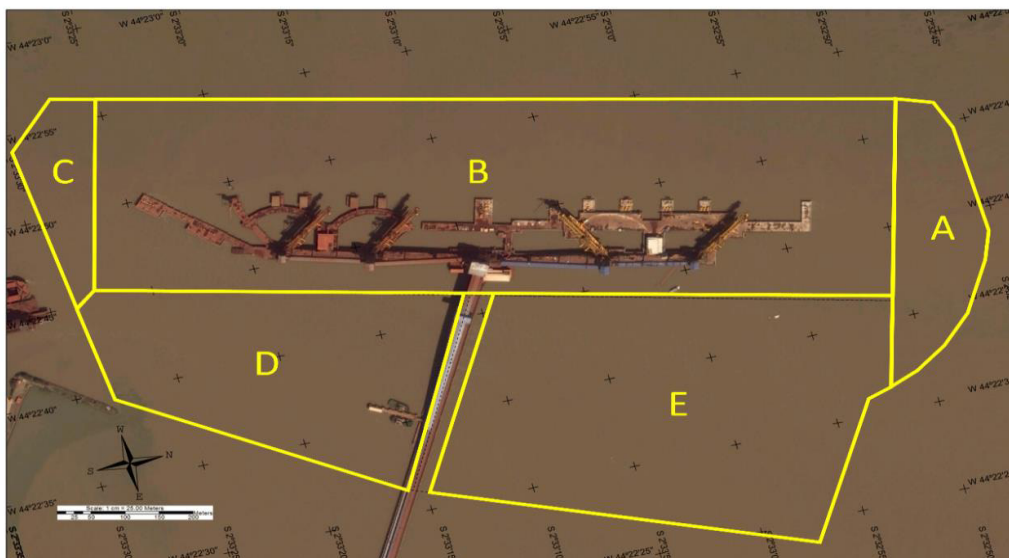


Figura 16. Área de controle no TMPM, Píer IV.  
Fonte: Vale S/A (2018)

A Bacia de Evolução é a área destinada às manobras de aproximação dos navios para atracação nos píeres e tem dimensão total de 5.134.544 m<sup>2</sup>, conforme figura 17, e está localizada à frente dos Píeres I, III e IV. Necessita de uma profundidade mínima de 23 metros.

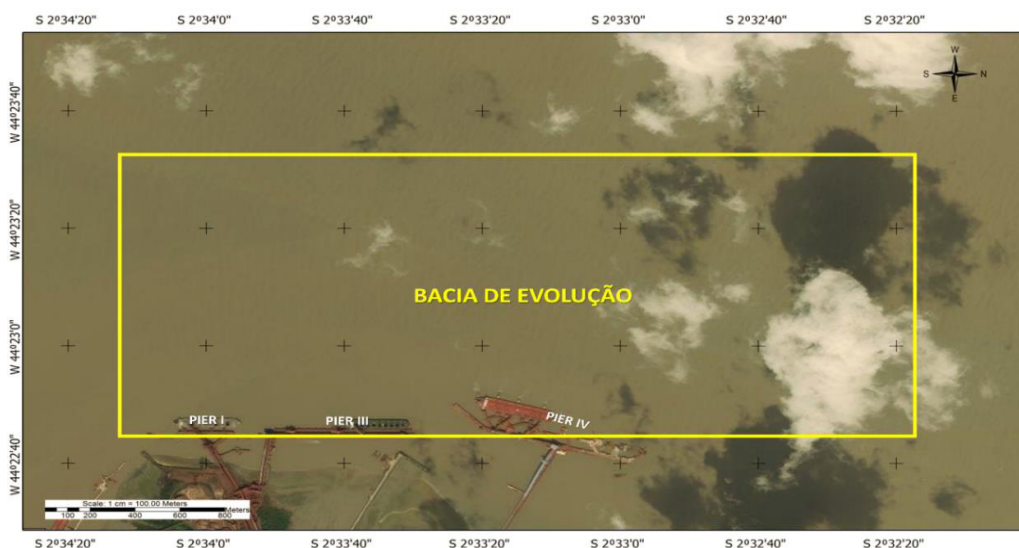


Figura 17. Área de controle da Bacia de Evolução.  
Fonte: Vale S/A (2018)

Devido à intensa dinâmica de movimentação de sedimentos característica da região, é necessário um constante acompanhamento da área para conhecer e prever o comportamento hidrodinâmico e morfológico do transporte de sedimentos. Esse acompanhamento será feito por meio de levantamentos batimétricos, cujos resultados irão subsidiar as operações de dragagem de manutenção.

#### 4.1. Levantamento batimétrico

Os levantamentos foram realizados utilizando como referência as instruções da NORMAN 25 (2ª revisão). O levantamento hidrográfico multifeixe foi realizado no berço e áreas adjacentes no Terminal Marítimo Ponta da Madeira, o berço em questão é o Píer IV Norte que está representado em azul, na figura 18.



Figura 18. Área do levantamento hidrográfico  
Fonte: Vale S/A (2018)

Os limites da área dos levantamentos hidrográficos (LH) são apresentados em coordenadas geográficas - WGS84 na tabela 1 abaixo:

Tabela 1 - Limites de área do Píer IV Norte

| COORDENADAS PIER IV NORTE |                   |
|---------------------------|-------------------|
| Latitude                  | Longitude         |
| 02°33'7.8617" S           | 044°22'46.2287" W |
| 02°32'52.8719" S          | 044°22'42.4692" W |
| 02°32' 51.9454" S         | 044°22'46.0336" W |
| 02°33'6.9253" S           | 044°22'49.9489" W |

Fonte: Vale S/A (2018)

##### 4.1.1. Estação Maregráfica

Para coleta de dados de maré foi utilizado a Estação Maregráfica 30149 - Terminal da Ponta da Madeira localizada no Píer I de rebocadores.

O marégrafo utilizado para aquisição de dados é o TideMaster de pressão de fabricação da Valeport (Figura 19). O sensor de pressão, nivelado com o zero da régua maregráfica, registra as medições da altura da coluna d'água por meio da

aferição da pressão. Vale S/A ressaltar que os dados coletados por este já desconsideram a pressão atmosférica atuante sobre a coluna d’água.



Figura 19. Marégrafo de pressão TideMaster  
Fonte: Vale S/A (2018)

#### 4.1.2. Calibração

Foi realizado, com o objetivo de garantir a calibração do sistema, a medida de offsets entre os sensores na embarcação, a determinação da imersão (*draft*) do ecobatímetro, a calibração do sistema multifeixe, bem como a calibração da profundidade através da perfilagem da velocidade do som na coluna d’água.

A embarcação utilizada na aquisição de dados foi a Inter II. Os offsets verticais e horizontais dos sensores dos sistemas multifeixe foram medidos com estação total e trena para comparação a fim de corrigir as defasagens entre os mesmos. Os valores obtidos foram inseridos no software de processamento dos dados, com exceção dos offsets do transdutor.

Segue abaixo os valores dos offsets obtidos com as devidas inserções no software de aquisição e processamento de dados HYPACK®MAX 2017<sup>1</sup> (Tabela 2).

Tabela 2 - Valores de *offsets*.

| <i>Offsets</i>   | Compensador de Ondas (IMU) | Transdutor (SONIC-2022) | GPS Navegação |
|------------------|----------------------------|-------------------------|---------------|
| <i>STARBOARD</i> | -2060                      | -2910                   | -0.920        |
| <i>FORWARD</i>   | 2970                       | 0.980                   | 2400          |
| <i>VERTICAL</i>  | -5846                      | -1995                   | -1040         |

<sup>1</sup> Software cedido pela VALE (licença 04B8857917004341)

### 4.1.3. Calibração dos Equipamentos de LH - Patch Test

A Calibração (*patch test*) é um dos procedimentos do processo do LH e é um passo essencial que consiste na determinação dos desvios em *roll*, *pitch*, *surge*, *sway* e proa (*yaw*) (Figura 20) para o transdutor e sensor de movimento e da latência do sistema de posicionamento.

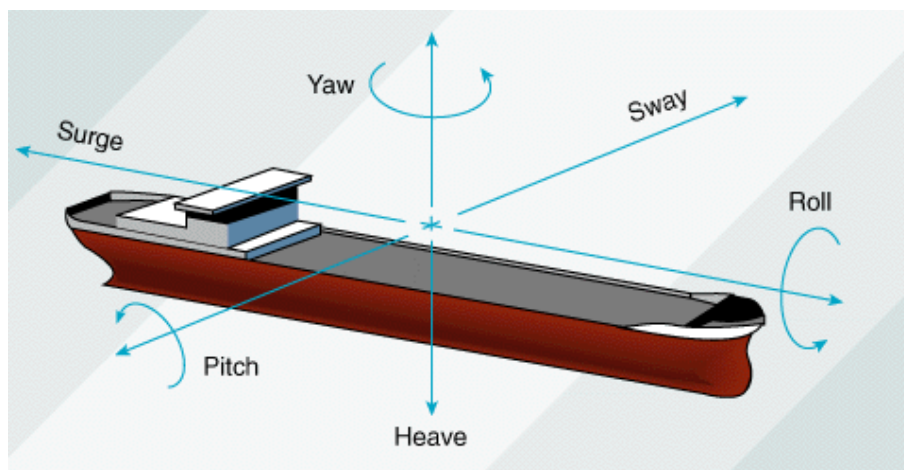


Figura 20. Ilustração – *Pitch*, *Roll* e *Heave*

A latência ou atraso do posicionamento (*latency*) é a diferença em tempo entre o posicionamento e a determinação da profundidade. Para a determinação da latência são efetuadas duas linhas sobrepostas, no mesmo sentido e velocidades diferente sendo uma em baixa velocidade e outra em alta velocidade, num fundo inclinado (Figura 21).

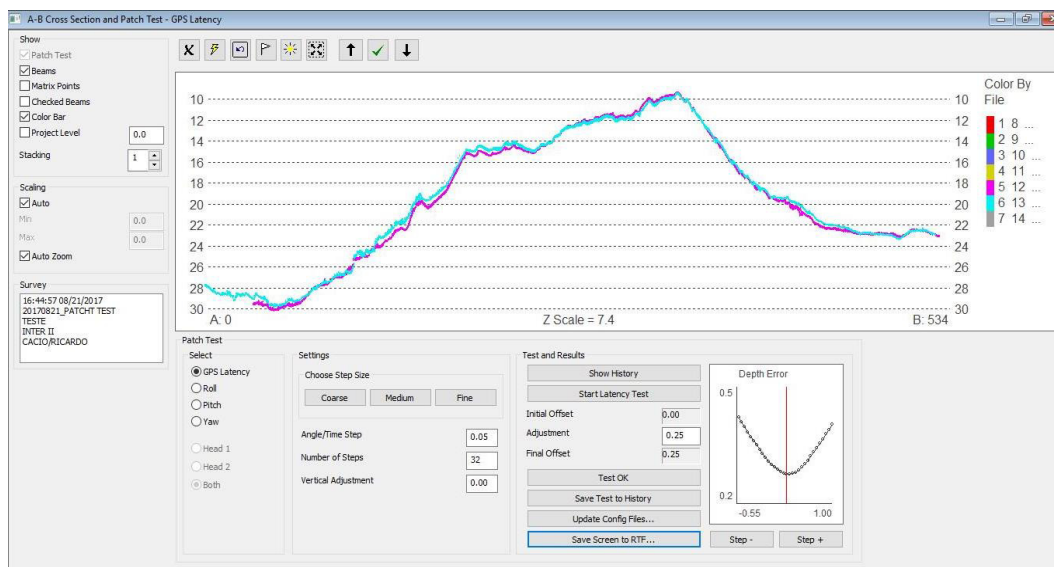


Figura 21. Exemplo da Calibração para Latência

Para se determinar o desvio em *pitch* são efetuadas duas linhas sobrepostas, em sentidos opostos e à mesma velocidade de trabalho, num fundo inclinado. Para

se determinar o desvio em *roll* são efetuadas duas linhas sobrepostas, em sentidos opostos e à mesma velocidade de trabalho, num fundo plano e regular. Na tabela 3 está descrito os valores encontrados após o Patch test.

Tabela 3 - valores do patch test

| Valores encontrados após o patch test |       |
|---------------------------------------|-------|
| Yaw                                   | -7.00 |
| Pitch                                 | -150  |
| Roll                                  | -340  |
| Latency                               | 0.250 |

O procedimento para determinar o desvio em proa (*yaw*) consiste em realizar dois pares de linhas adjacentes e recíprocas, à mesma velocidade de trabalho, numa área com uma estrutura batimétrica bem definida, por exemplo, um baixo.

A figura 22 ilustra a área de levantamento Patch test da área estudada.

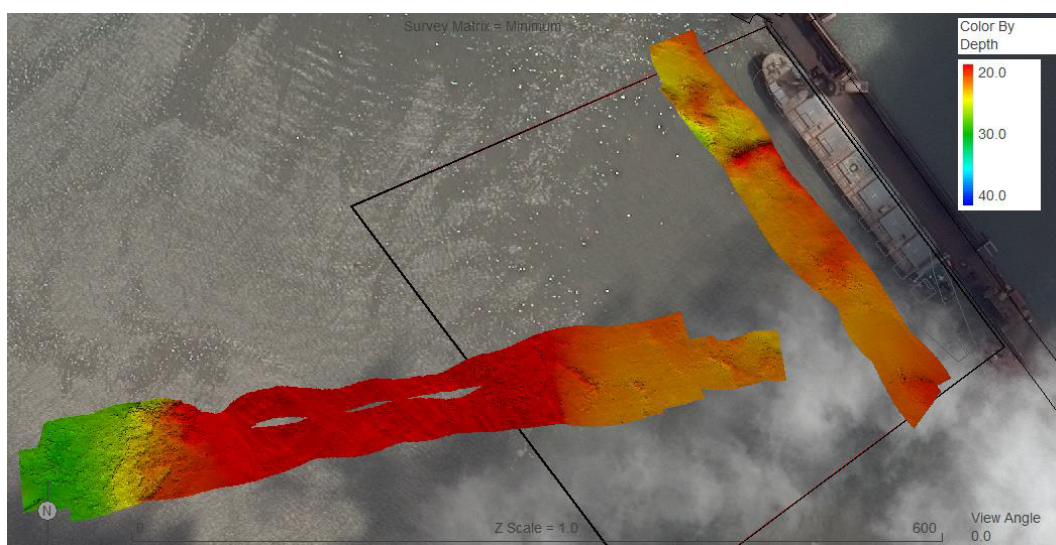


Figura 22. Área de levantamento do *Patch test*

## 4.2. Processamento dos dados

### 4.2.1. Aquisição e Processamento

O gerenciamento do sistema de aquisição automática de dados batimétricos foi executado pelo software hidrográfico HypackHysweep. O processamento dos dados batimétricos, realizado em gabinete, foi executado utilizando-se do mesmo *software*.



### 4.2.2. Processamento do Levantamento Batimétrico

Na fase do processamento no programa Hypack 2017, utilizou-se da ferramenta Hysweep Editor 64bits, para quantificar a qualidade do levantamento batimétrico multifeixe.

Após o processamento dos dados multifeixe, foram obtidos os arquivos no formato xyz com posicionamento e profundidades, representando a área sondada. A partir desses arquivos xyz, foram geradas 05 plantas batimétricas, onde estão apresentados os valores das profundidades e demais informações cartográficas.

### 4.2.3. Frequência de levantamentos batimétrico por área de controle

Para uma melhor avaliação das áreas de controle, foi definido um cronograma e este foi aplicado ao modelo de gestão da área. Este modelo foi um dos marcos do projeto do supervisor – Gerenciamento Visual – FMDS. Neste cronograma, foi determinado um número mínimo de levantamentos batimétricos por berço / área de controle. Os berços foram considerados denominados por áreas críticas e, portanto, o número mínimo foi de 4 batimetria por mês nos berços e uma nas demais áreas de controle.

Foi planejado se obter o levantamento batimétrico no início de cada mês e as demais batimetrias era de monitoramento e verificação da dragagem. Afim de se remover o sedimento em pontos exatos, sem impactar na operação e sem onerar por remoção em áreas sem restrição.

A figura 23 ilustra o cronograma elaborado pela equipe técnica da supervisão da marítima (engenheiro e técnico especializado) de acordo com o planejamento operacional e demanda de embarque de minério.

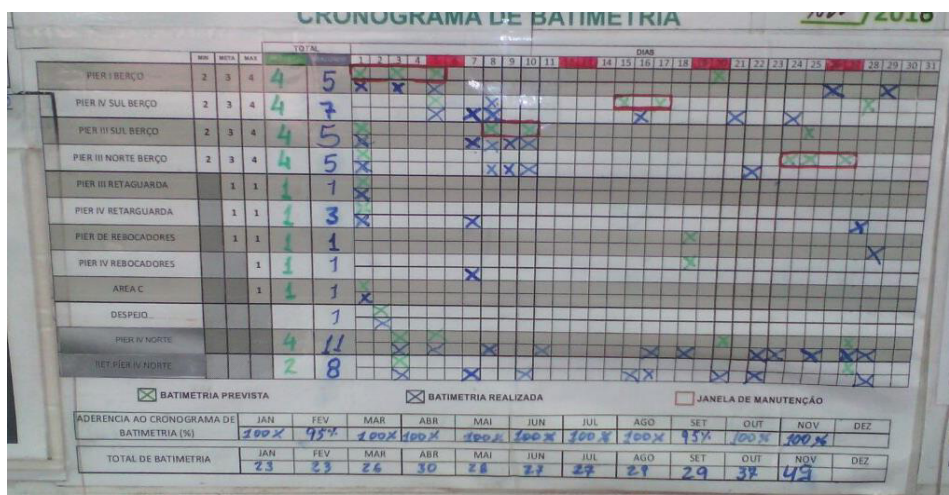


Figura 23. Cronograma de Batimetrias

As batimetrias, normalmente, eram realizadas no berço durante as manobras simultâneas dos navios ou janelas de manutenção.

## 5. Resultados e discussão

### 5.1. Medição da intensidade das velocidades da corrente e amplitude de maré

Para a medição da intensidade das velocidades de corrente foi contratada uma empresa especializada, com equipe dedicada. O levantamento consistiu na disposição de três equipamentos em pontos estratégicos do Píer IV. Foi convencionado a posição dos dolphins 01, 08 e 15 como forma de se obter a captura dos dados de corrente em toda a área do píer e a influência dos navios atracados em ambos os berços.

Entretanto, este trabalho se resume às interações do berço norte do píer e, por este motivo, apresenta-se apenas os dados das estações oceanográficas instaladas nos dolphins 08 e 15 (HMPDMDOLFIM08 e HMPDMDOLFIM15, respectivamente), demonstradas na figura 27. A demarcação em vermelho indica a área de captura dos dados pelos feixes perfiladores acústicos horizontais (ADCPs) das estações oceanográficas, utilizados para obtenção de dados das correntes atuantes nesses dolphins.

O sistema de estações da Vale S/A é composto ainda por duas estações maregráficas. A primeira instalada no píer de rebocadores do Píer I e a segunda, na ponte de acesso ao Píer IV (Figura 24), denominada neste trabalho como HMPDMTIDE.



Figura 24. Localização das estações oceanográficas e maregráfica no Píer 4 Norte.  
Fonte: Sismo (2018)

O monitoramento dos dados de corrente foi realizado em um período contínuo de 30 dias (lunação), sendo a maré nitidamente semidiurna, observa-se que as maiores amplitudes (diferença entre as alturas de PM e BM consecutivas) acontecem nas proximidades de lua cheia e nova; enquanto as menores amplitudes ocorrem durante as luas quarto crescente e minguante.

A figura 25 demonstra os dados de intensidade e direção das correntes obtidos pelo ADCP no Dolfim 08 ao longo do período, observados em nós e em escala registrada, em três pontos distintos (20m, 60m e 120m, respectivamente) e nível do mar em metros. Pode-se perceber que a 20m, a influência da sombra do navio atracado, principalmente na maré de sizígia, é maior do que a 60m e 120m, onde o equipamento fica completamente atrás do navio, o que influencia na captura dos dados.

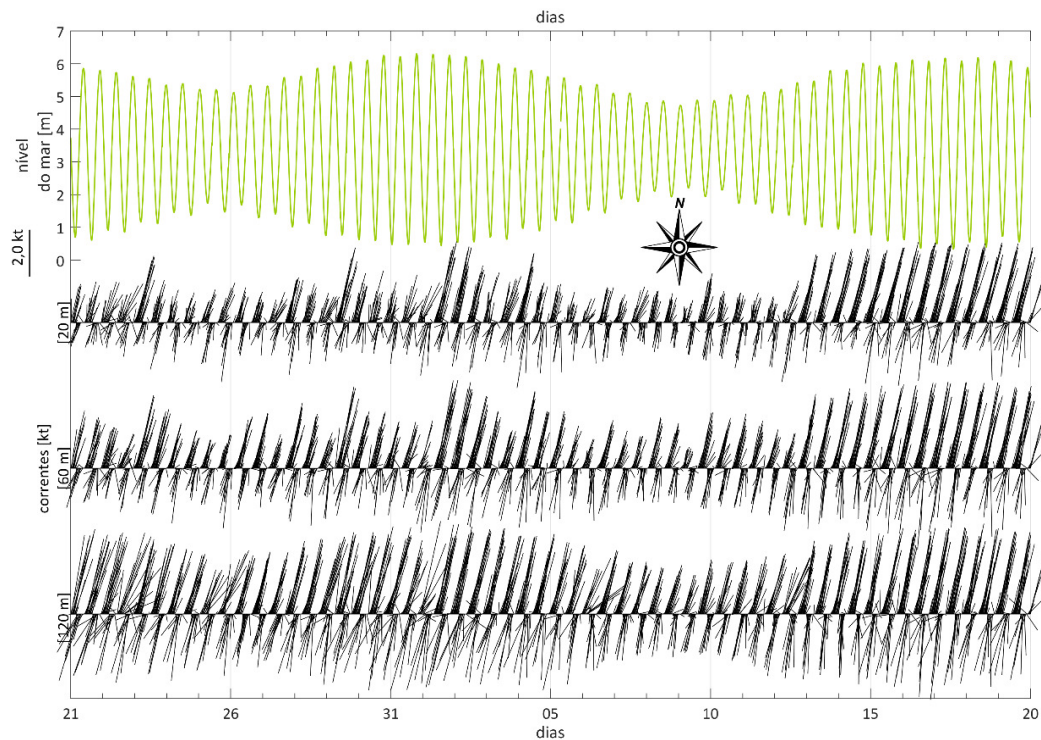


Figura 25. Dados oceanográficos observados no Dolfim 08  
Fonte: Sismo (2018)

A tabela 4 abaixo apresenta os dados de mínimo, máximo e média, além do desvio padrão e da variância de cada parâmetro avaliado. Analisando os dados capturados pelo ADCP instalado no Dolfim 8, é possível observar que existe pouca variação de intensidade e direção entre os campos mapeados (de 20m a 120m).

Tabela 4 – Valores obtidos no período de referência pelo ADCP, instalado no Dolfim 08.

| parâmetro         | mín   | méd   | máx   | desv pad | var   |
|-------------------|-------|-------|-------|----------|-------|
| Int (20.00) [kt]  | 0.02  | 1.15  | 3.81  | 0.81     | 0.656 |
| Int (40.00) [kt]  | 0.01  | 1.27  | 4.00  | 0.86     | 0.742 |
| Int (60.00) [kt]  | 0.01  | 1.39  | 4.21  | 0.90     | 0.802 |
| Int (80.00) [kt]  | 0.01  | 1.51  | 4.21  | 0.94     | 0.882 |
| Int (100.00) [kt] | 0.02  | 1.76  | 4.16  | 1.02     | 1.032 |
| Int (120.00) [kt] | 0.01  | 1.72  | 4.56  | 1.05     | 1.104 |
| T [°C]            | 28.85 | 29.15 | 29.49 | 0.11     | 0.01  |
| Nível do mar [m]  | 0.33  | 3.41  | 6.32  | 1.63     | 2.65  |

Fonte: Sismo (2018)

A predominância da corrente coletada é medida NNE com 50% de incidência com picos em marés de sizígia de até 4 nós para o período amostrado (Figura 26).

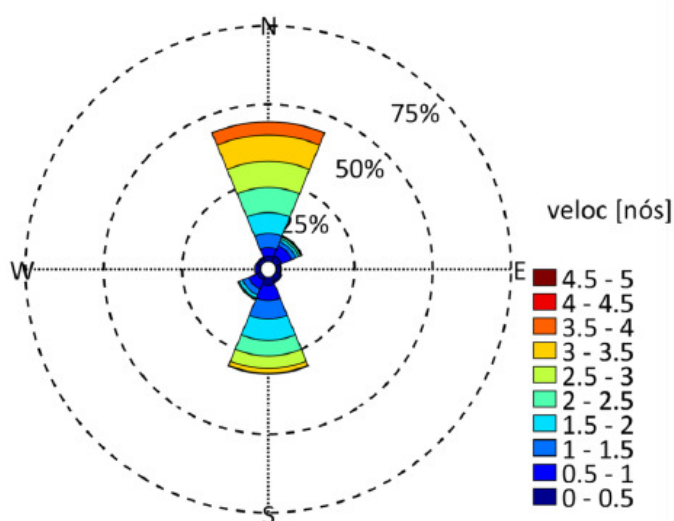


Figura 26. Rosa dos Ventos: incidência de corrente em nós do Dolfim 08.

Fonte: Sismo (2018)

A figura 27 demonstra os dados de intensidade e direção das correntes obtidos pelo ADCP no Dolfim 15 ao longo do período, observados em nós e em escala registrada, em três pontos distintos (20m, 60m e 120m, respectivamente), obedecendo os mesmos critérios estabelecidos para o Dolfim 8, pode-se perceber que há uma menor variação.

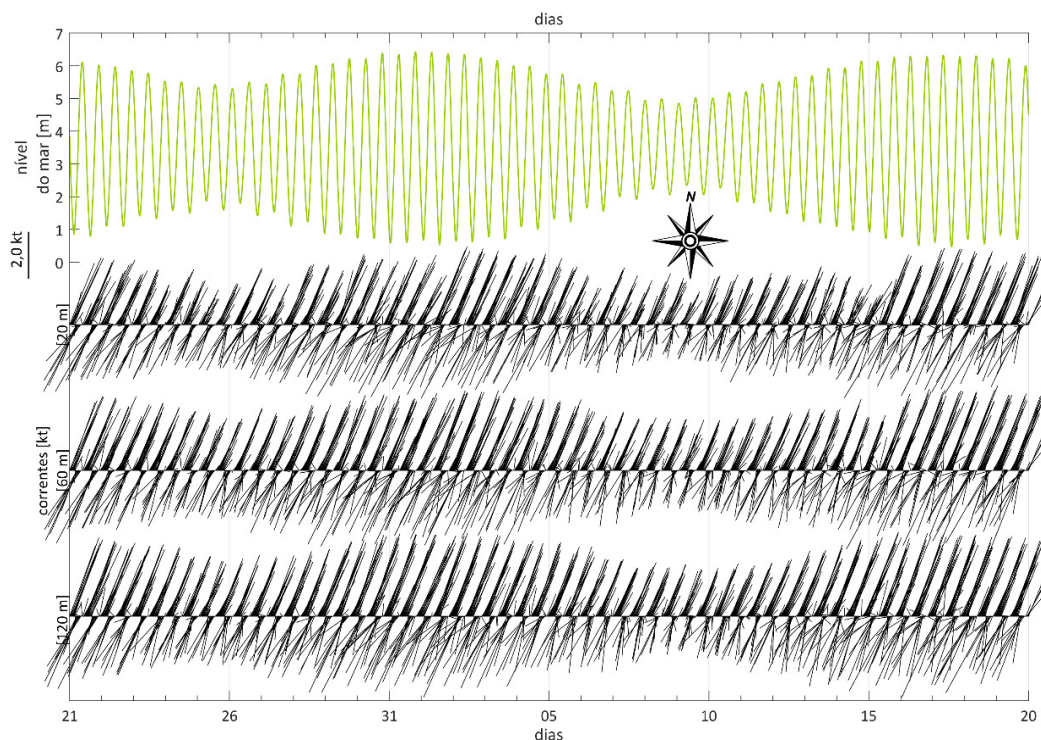


Figura 27. Dados oceanográficos observados no Dólfim 15  
 Fonte: Sismo (2018)

A tabela 5 abaixo apresenta os dados de mínimo, máximo e média, além do desvio padrão e da variância de cada parâmetro avaliado. Analisando os dados capturados pelo ADCP instalado no Dólfim 15, é possível observar que existe pouca variação de intensidade e direção entre os campos mapeados (de 20m a 120m).

Tabela 5 - Valores obtidos no período de referência pelo ADCP, instalado no Dólfim 15.

| Parâmetro         | Mínimo | Médio | Máximo | Desv pad | Var   |
|-------------------|--------|-------|--------|----------|-------|
| Int (20.00) [kt]  | 0.01   | 1.58  | 3.83   | 0.88     | 0.778 |
| Int (40.00) [kt]  | 0.01   | 1.66  | 3.95   | 0.91     | 0.829 |
| Int (60.00) [kt]  | 0.01   | 1.79  | 4.08   | 0.95     | 0.908 |
| Int (80.00) [kt]  | 0.01   | 1.88  | 4.26   | 0.98     | 0.956 |
| Int (100.00) [kt] | 0.03   | 1.89  | 4.27   | 0.99     | 0.971 |
| Int (120.00) [kt] | 0.01   | 1.62  | 4.08   | 0.95     | 0.896 |
| T [°C]            | 28.81  | 29.08 | 29.44  | 0.11     | 0.01  |
| Nível do mar [m]  | 0.46   | 3.53  | 6.43   | 1.64     | 2.68  |

Fonte: Sismo (2018)

A predominância da corrente coletada é medida NE com 25% de incidência com picos em marés de sizígia de até 4 nós para o período amostrado (Figura 28).

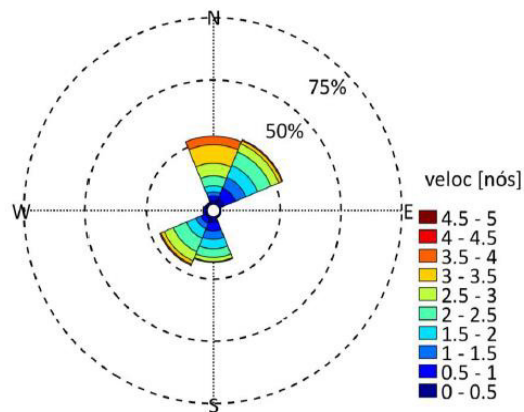


Figura 28. Rosa dos Ventos: incidência de corrente em nós do Dolfim 15.  
Fonte: Sismo (2018)

## 5.2. Identificação da dinâmica de sedimentação

O estudo tem por objetivo analisar e comparar um conjunto de levantamentos batimétricos na área do Píer IV norte e proximidades que subsidiarão o estudo da dinâmica sedimentar no local, permitindo caracterizar a dinâmica do fundo, verificando suas alterações espaço-temporais. Adicionalmente, será analisada a tendência de adição ou perda de cada área ao longo do tempo

Tendo em vista a área do Píer IV ser uma região de intensa movimentação de sedimentos, a área de implantação dos seus berços de atracação está permanentemente sujeita a processos de sedimentação, fazendo necessárias operações de dragagem periódicas de manutenção, com o objetivo de garantir a manutenção das cotas de profundidade estabelecidas em projeto e proporcionar condições seguras no acesso, atracação, desatracação e manobras dos navios, e também, aumentar a disponibilidade dos berços para embarque.

Analisando os resultados, a Baird (2011) identificou que as dinâmicas das correntes exercem uma influência direta no processo de assoreamento da região de atracação do píer, uma vez que a taxa de material trazido pela corrente de maré de vazante apresenta-se superior à taxa do material retirado pela corrente de maré de enchente, concluindo que a região onde estão sendo construídos os berços de atracação está localizada em uma zona de depósito de sedimentos e que tenderá a restabelecer sua profundidade média natural se não houver intervenção. Além disso, o estudo estima que os sedimentos se depositem a uma taxa líquida inicial de cerca de 2.000 m<sup>3</sup> ao dia e que essa taxa diminui gradativamente à medida que as ondas de areia aumentam sua altura.

### 5.2.1. Durante o estágio de construção

Em fevereiro de 2013, antes do início das obras de construção do Píer IV Norte, foi realizada uma campanha de levantamentos batimétricos, voltados a este berço, a fim de conhecer a área após a construção do P4S, sem qualquer influência, e estimar os gastos necessários para a implantação e manutenção das cotas operacionais do píer.

Pode-se perceber, conforme figura 29, isobatimétricas entre 14 e 16 metros de profundidade natural. Esta cota é bastante preocupante para garantir a viabilidade operacional deste berço, em função do custo estimado para tal obra, do custo de manutenção e do impacto operacional de intervenções para remoção do sedimento.

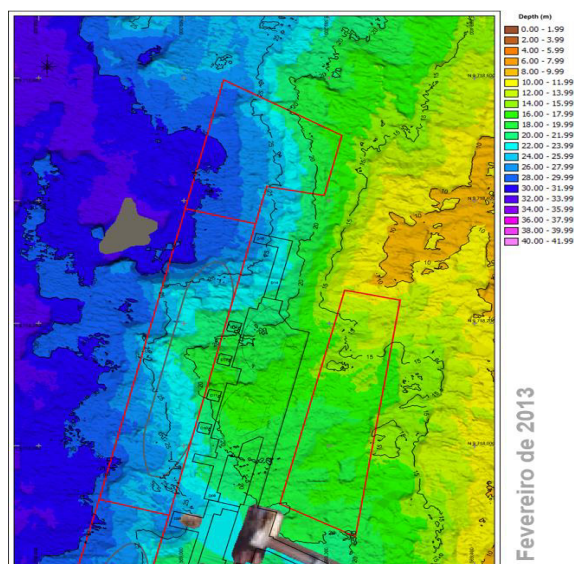


Figura 29. Levantamento batimétrico da área do berço norte antes do início das obras.  
Fonte: Vale S/A (2018)

Observa-se na figura 30 que a construção do cais começou no final de 2013, enquanto que a fase principal, incluindo as plataformas de carga e os dolphins, foram concluídas apenas 2015.



Figura 30. Esquemático com ilustração evolutiva da fase de cravação das estacas.

Com a conclusão progressiva do Píer IV Norte, seus dolphins, em particular, começaram a corroer e aprofundar devido à varredura global em seu entorno, bem como efeitos pontuais, ao redor das estacas, conforme figura 31.

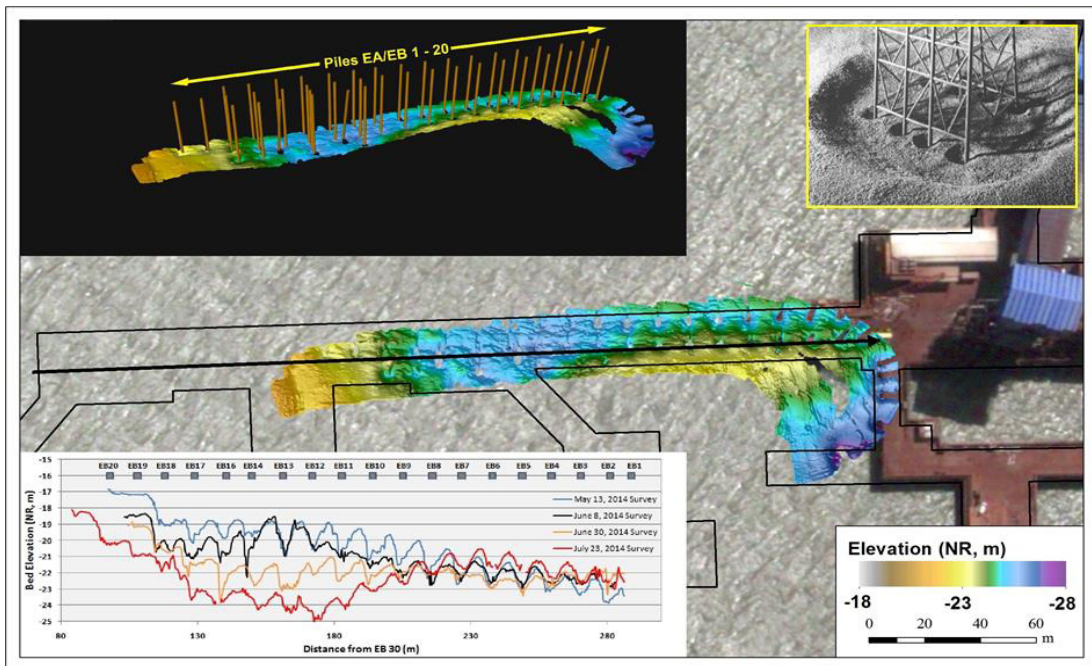


Figura 31. Efeito do estaqueamento ao redor das estacas e dos dolphins.

Fonte: BAIRD (2012)

Em comparação com as primeiras batimetrias da área no berço Norte, havia mais sedimentos devido à construção e subsequente início das operações no berço Sul. O berço Norte erodiu aproximadamente 2,5m, em média, apenas em resposta à construção do píer. A curva de evolução é ilustrada na figura 32.



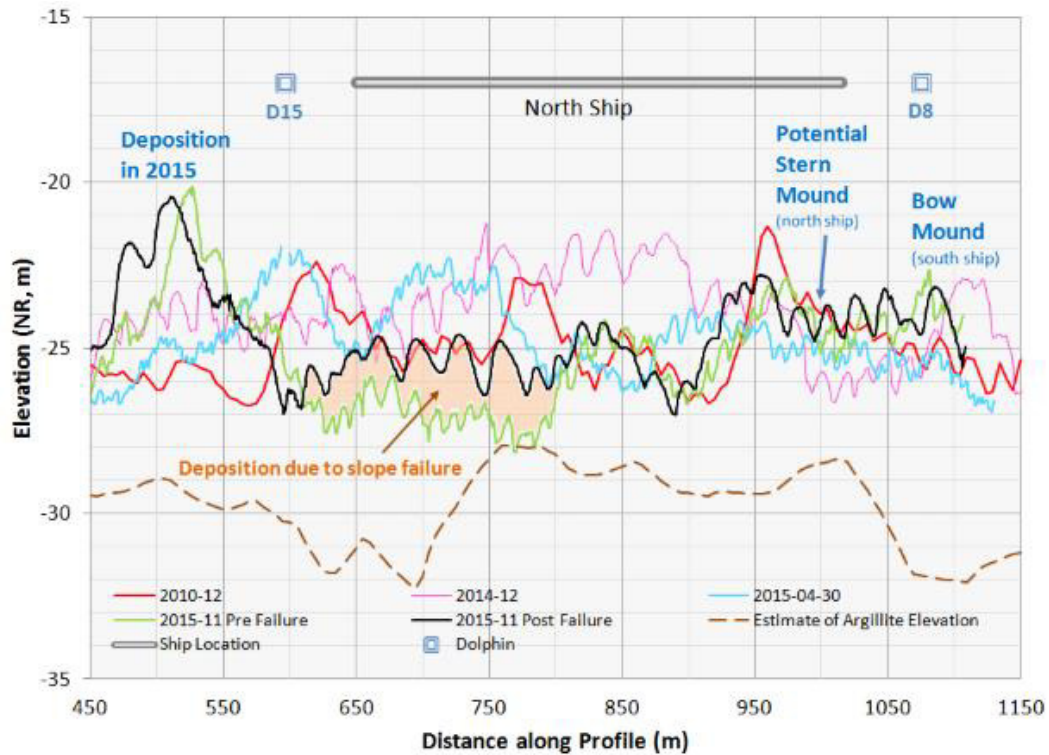


Figura 32. Curva de evolução  
 Fonte: BAIRD (2012)

A matriz do Berço Sul criou uma zona de abrigo permitindo que a deposição de sedimentos invadisse parcialmente a área que agora é o berço do norte. Em novembro de 2015, as elevações do fundo marinho no berço norte variaram entre -23 e -27 m.

**5.2.2. Durante o estágio de comissionamento (atracação e amarração)**

Levantamentos hidrográficos indicaram que o efeito da estrutura do Píer IV Norte na morfodinâmica do leito marinho circundante não é o mesmo que o impacto observado na estrutura do Píer IV Sul. Essas informações foram essenciais para fornecer um plano de gerenciamento de sedimentos antes do comissionamento das operações do cais norte.

A área em torno do Dolphin 8 passou por uma significativa deposição em 2015 como resultado da conclusão da estrutura do píer norte. É provável que a deposição nesta área se intensifique com o início das operações do píer norte, pois a área se tornará a zona de sombra entre os dois navios. É provável que um “monte” seja formado sob a popa do navio atracado no Berço Norte ou o “monte” seja formado sob proa do navio atracado no Berço Sul. Sendo assim, nessa área se juntará para formar uma característica deposicional maior com o potencial de impedir a

atracação do navio norte e também impactam as elevações de cota, exigindo, portanto, manutenção periódica da dragagem.

### **5.2.3. Durante o estágio de *ramp-up* e teste de operação (atracação e carregamento parcial)**

Uma vez que o Píer IV Norte se encontra em estágio operacional, espera-se que a caixa correspondente à área operacional do berço sofra uma redução adicional devido à erosão induzida pelo navio em alguns locais. Este efeito impacta diretamente na necessidade de uma dragagem de capital significativa. Desta forma, uma abordagem adaptativa envolvendo um cronograma de manobras com portes gradativos de embarcações, planejando a chegada, amarração e monitoramento do mesmo até atingir as cotas seguras para habilitar a atracação do navio seguinte (de porte maior) até atingir o navio de projeto (Valemax).

### **5.2.4. Durante o estágio de operação (atracação e carregamento total)**

Esta fase de monitoramento consiste em realizar o mapeamento da caixa de atracação e sua respectiva retro área, antes de cada atracação. E, imediatamente, após a desatracação do navio completamente carregado, realizar um segundo levantamento. Diante dos dados obtidos (pré e pós atracação) é possível realizar a análise comparativa, avaliando apenas a influência do navio atracado, sem qualquer intervenção mecânica.

A figura 33 apresenta as batimetrias realizadas em 19 e 23 de dezembro de 2016, além da análise comparativa entre os dois levantamentos. Neste período foi carregado o MV ORE DONGJIAKOU em plena carga (capacidade de 400kt – VLOC). Manobrou na baixa-mar de 05h32 do dia 20 (período diurno), com altura de 1,27m e amplitude de 3,97m; com término de manobra às 08h02. Sua permanência no berço se estendeu até o dia 23, às 01h16, carregando 389kt, e calado de saída de 23,00m. Tempo total de permanência no píer foi de 65h14.

Percebe-se no gráfico, o campo em vermelho, uma pequena influência do navio sobre o fundo marinho, uniformemente distribuída por todo o comprimento do navio.

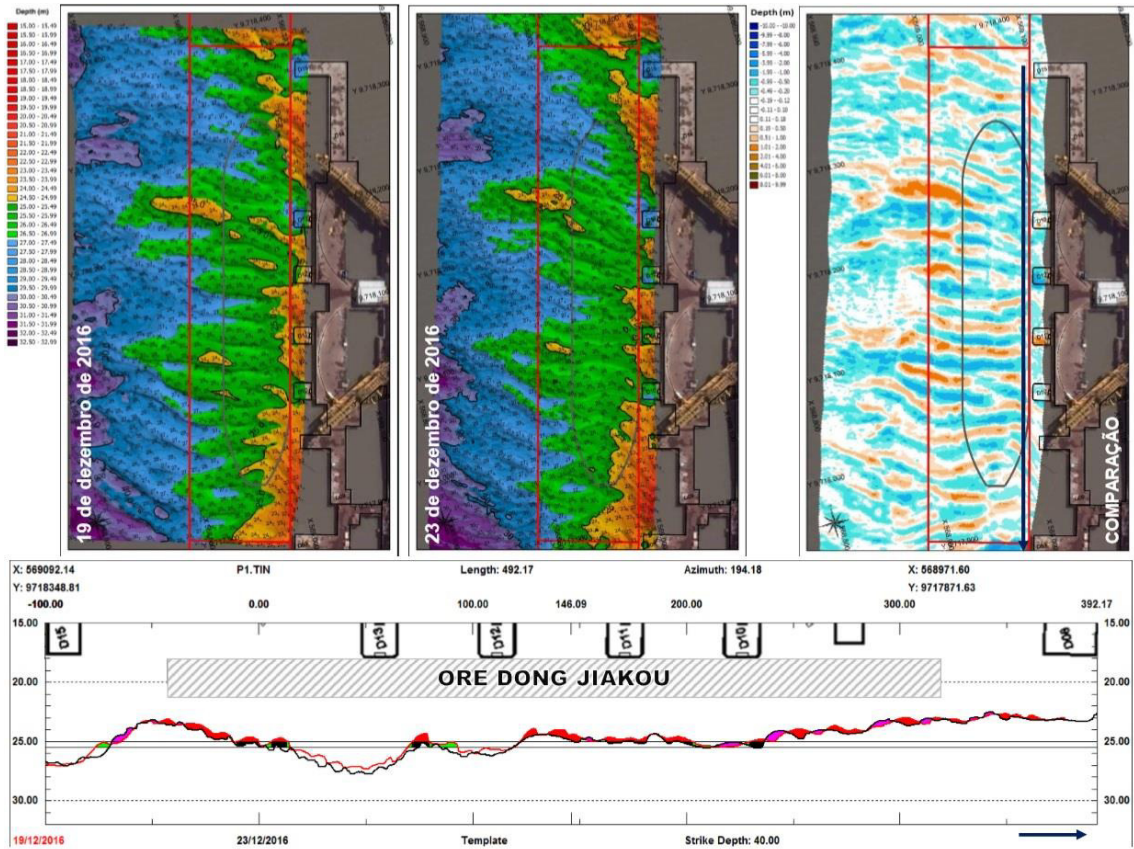


Figura 33. Análise da atracação nº 1 – MV ORE DONG JIAKOU  
 Fonte: Vale S/A (2018)

A figura 34 apresenta as batimetrias realizadas em 23 e 26 de dezembro de 2016, além da análise comparativa entre os dois levantamentos. Neste período foi carregado o MV BERGE JAYA em plena carga (capacidade de 388kt – VLOC). Manobrou na baixa-mar de 08h42 do dia 23 (período diurno), com altura de 1,52m e amplitude de 3,64m; com término de manobra às 11h54. Sua permanência no berço se estendeu até o dia 25, às 23h37, carregando 387kt, e calado de saída de 23,30m. Tempo total de permanência no píer foi de 59h42.

Percebe-se no gráfico, o campo em vermelho, uma pequena influência do navio sobre o fundo marinho, uniformemente distribuída por todo o comprimento do navio, o que caracteriza um pequeno espelhamento ao resultado acumulado do MV ORE DONG JIAKOU.

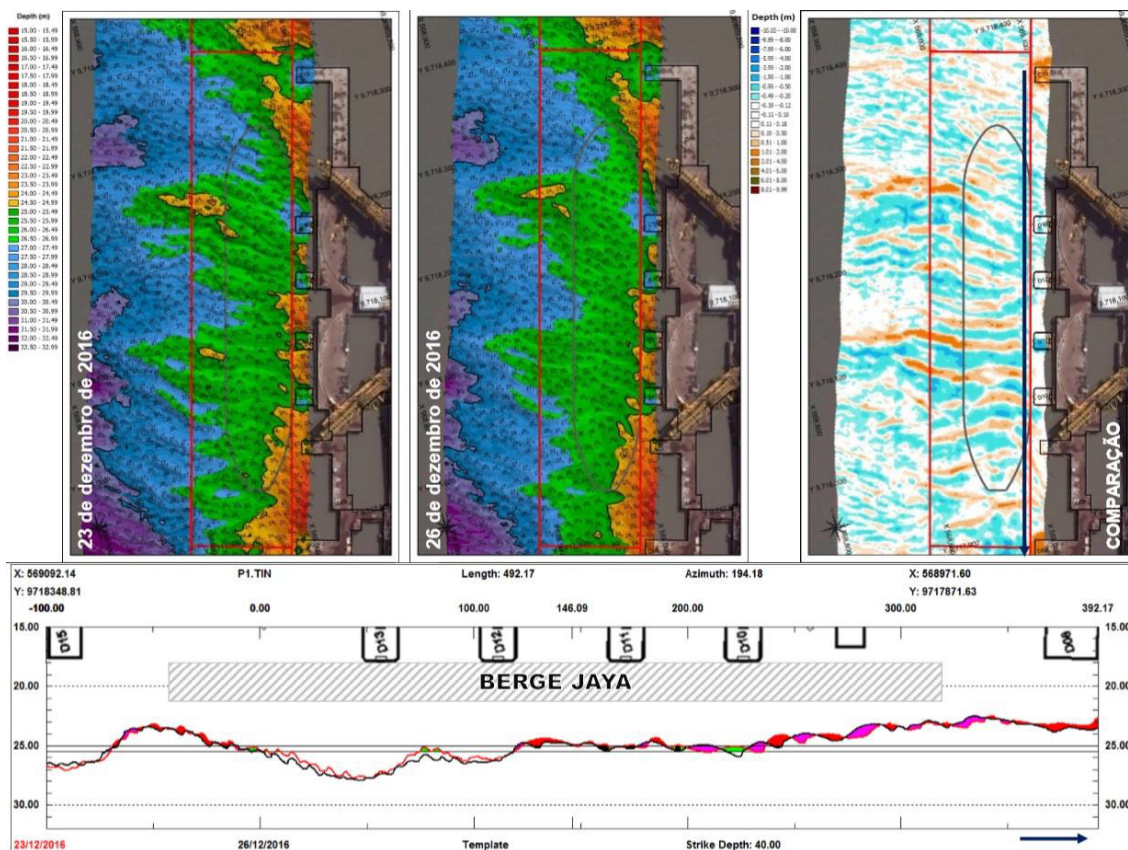


Figura 34. Análise da atracação nº 2 – MV BERGE JAYA  
 Fonte: Vale S/A (2018)

A figura 35 apresenta as batimetrias realizadas em 26 e 28 de dezembro de 2016, além da análise comparativa entre os dois levantamentos. Neste período foi carregado o MV GLOBAL COMMANDER em plena carga (capacidade de 204kt – VLOC). Manobrou na preamar de 17h31 do dia 26 (período diurno), com altura de 5,56m e amplitude de 4,50m; com término de manobra às 17h42. Sua permanência no berço se estendeu até o dia 28, às 13h02, carregando 204kt, e calado de saída de 18,26m. Tempo total de permanência no píer foi de 43h20.

Percebe-se no gráfico (em vermelho), uma pequena influência do navio sobre o fundo marinho, uniformemente distribuída por todo o comprimento do navio, o que caracteriza um pequeno espelhamento do fundo da embarcação ao resultado acumulado do MV GLOBAL COMMANDER.

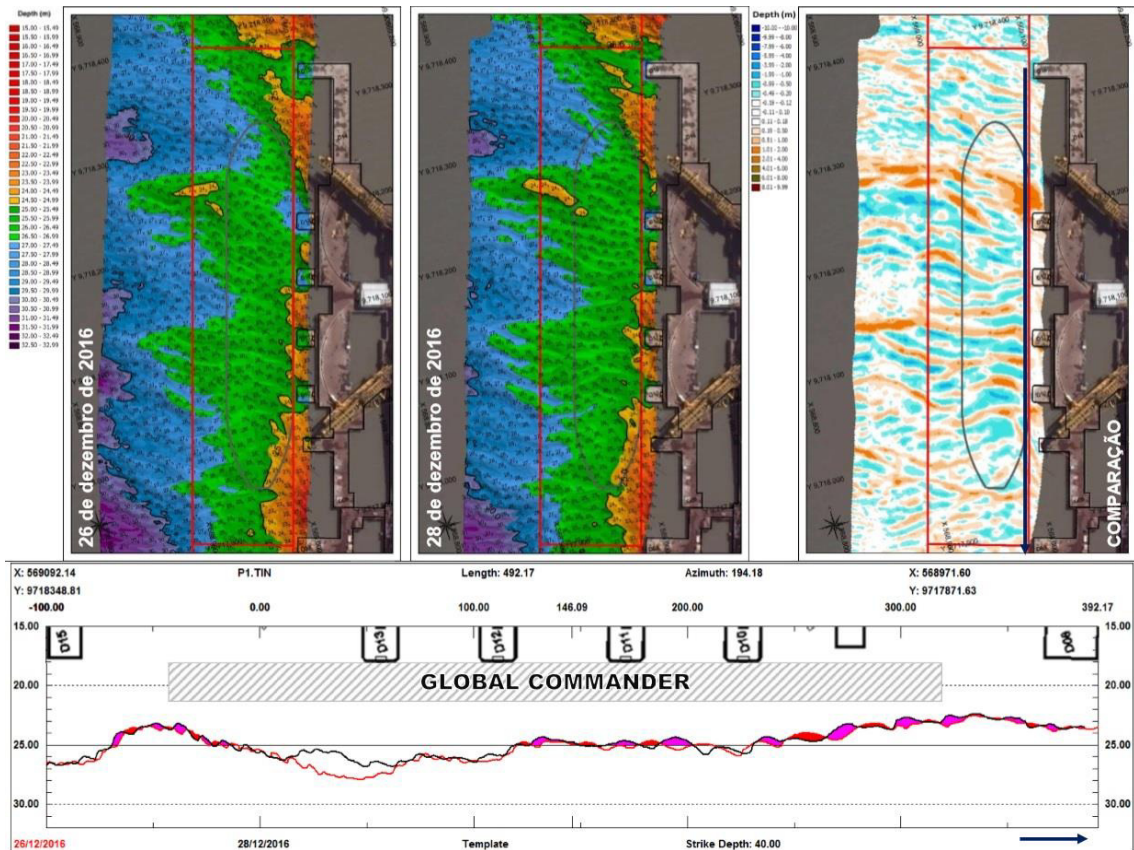


Figura 35. Análise da atracação nº 3 – MV GLOBAL COMMANDER  
 Fonte: Vale S/A (2018)

A figura 36 apresenta as batimetrias realizadas em 17 e 23 de janeiro de 2017, além da análise comparativa entre os dois levantamentos. Neste período foi carregado o MV BAOSTEEL ELABORATION em plena carga (capacidade de 298kt – VLOC). Manobrou na baixa-mar de 16h29 do dia 17 (período diurno), com altura de 1,12m e amplitude de 4,31m, com término de manobra às 18h50. Sua permanência no berço se estendeu até o dia 19, às 10h32, e saiu carregado com 293kt, e calado de saída de 21,55m. Tempo total de permanência no píer foi de 39h42.

Percebe-se no gráfico (em vermelho), uma influência representativa do navio sobre o fundo marinho, o ganho em relação ao resultado acumulado do MV BAOSTEEL ELABORATION quando houve o deslocamento da isobatimétrica para baixo das instalações do píer, aumentando temporariamente a profundidade da área correspondente à caixa do navio de projeto. Ao mesmo tempo, percebe-se deposição de sedimento a oeste da caixa do navio (dentro da caixa de dragagem) o que caracteriza o deslocamento natural do sedimento.

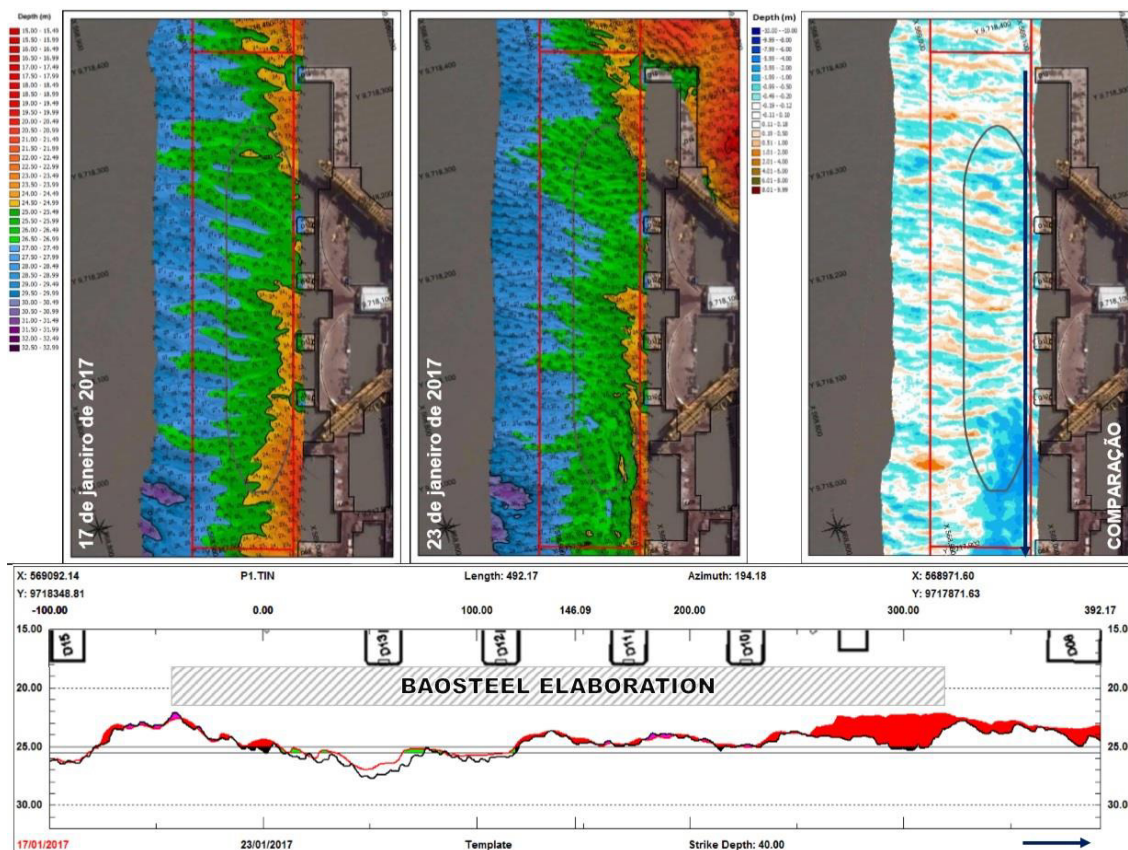


Figura 36. Análise da atracação nº 4 – MV BAOSTEEL ELABORATION  
 Fonte: Vale S/A (2018)

A figura 37 apresenta as batimetrias realizadas em 23 e 27 de janeiro de 2017, além da análise comparativa entre os dois levantamentos. Neste período foi carregado o MV SEA TUBARAO em plena carga (capacidade de 404kt – VLOC). Manobrou na baixa-mar de 09h53 do dia 23 (período diurno), com altura de 1,55m e amplitude de 3,58m; com término de manobra às 13h05. Sua permanência no berço se estendeu até o dia 26, às 01h05, carregando 394kt, e calado de saída de 18,26m. Tempo total de permanência no píer foi de 43h20.

Até o estágio de operação deste navio as atracações aconteciam em caráter experimental, com manobras em fase de adestramento por parta da praticagem e ainda é percebido vários pontos abaixo da margem operacional de segurança, 25 metros.

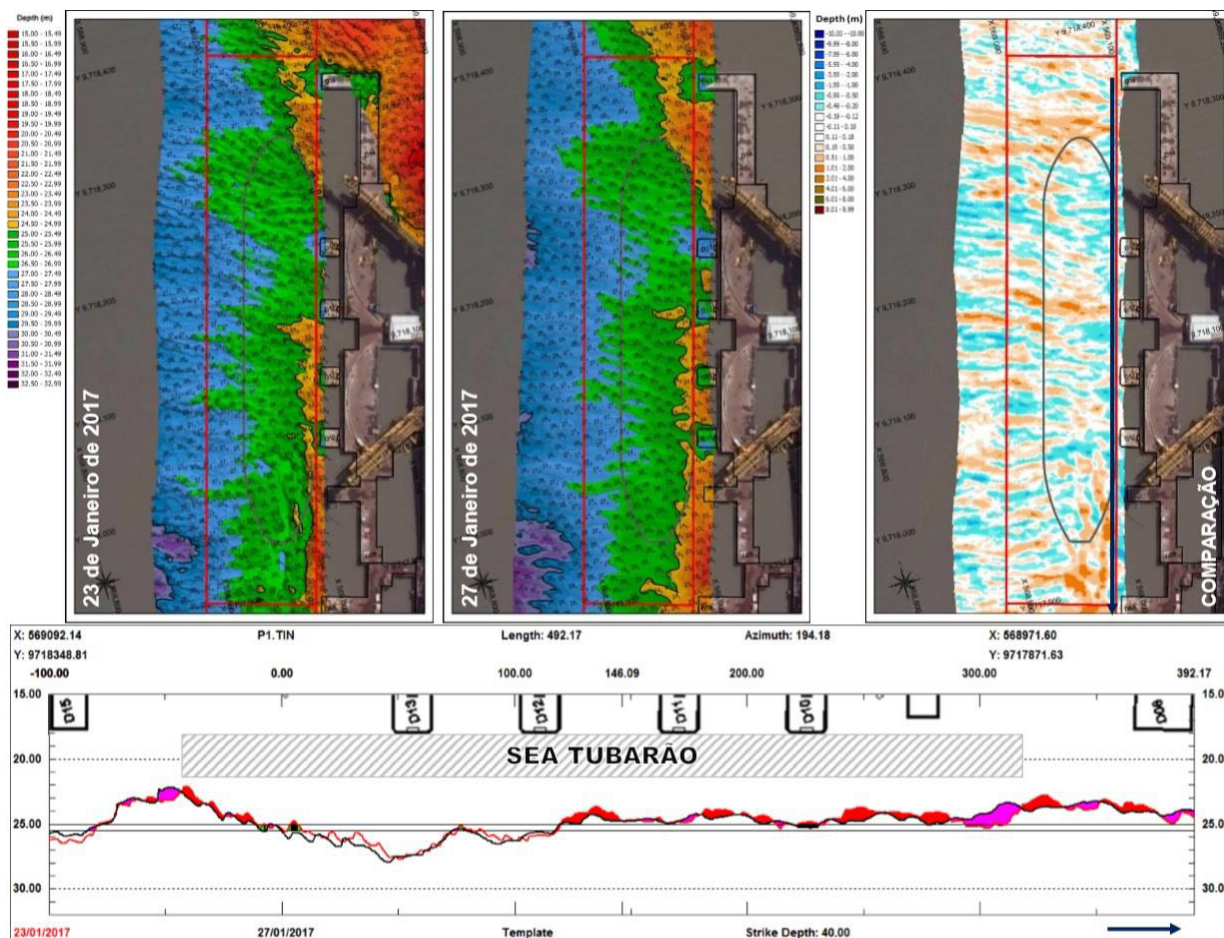


Figura 37. Análise da atracação nº 5 – MV SEA TUBARAO  
 Fonte: Vale S/A (2018)

### 5.3. Definição de profundidades mínimas operacionais para navio de projetado

A Tabela 6 apresenta os dados das profundidades operacionais das áreas do Píer IV. As profundidades operacionais baseiam-se nos calados máximos dos navios (com plena carga) de projeto para cada berço. A cota de gatilho representa a profundidade mínima especificada para cada área de dragagem. Uma vez que essa profundidade seja atingida, será necessária a dragagem da área.

Tabela 6 - Profundidades operacionais dos píeres

| Área TMPM           | Cota operacional (m) | Cota gatilho para intervenção de dragagem (m) |
|---------------------|----------------------|---|
| Píer I              | 25                   | 23  |
| Píer de Rebocadores | 16                   | 14  |
| Píer III            | 23                   | 21  |
| Tardoz Píer III     | 20                   | 18  |
| Píer IV (A)         | 25                   | 23  |
| Píer IV (BSUL)      | 25                   | 23  |
| Píer IV (BNORTE)    | 25                   | 23  |
| Píer IV (C)         | 25                   | 23  |
| Píer IV (Ds)        | 20                   | 18  |
| Bacia de Evolução   | 25                   | 23  |

Fonte: Vale S/A (2018)

#### 5.4. Avaliação da estratégia de dragagem para minimizar possíveis impactos operacionais

A atividade de dragagem baseia-se nos seguintes princípios: posicionamento da embarcação até o local a ser dragado, sucção dos sedimentos, *overflow*, deslocamento até o ponto de descarte do material dragado e descarte do material. As cotas mínimas de operação segura das áreas do Terminal estão apresentadas na tabela 6. Todos os níveis de profundidade são referenciados com o Nível de Redução (NR) da Estação Maregráfica do Terminal Marítimo de Ponta da Madeira descrita na F-41 30149 de 2013 (DHN).

A dragagem nas áreas do TMPM é realizada de forma contínua, em prontidão 24h por dia, por meio de uma embarcação mobilizada e dedicada para atendimento aos berços do terminal da Vale S/A, aproveitando-se as oportunidades de manutenção preventiva de cada berço ou janelas de manobras dos navios, nos casos em que não ocorrem manobras simultâneas, ou seja, manobras de atracação e desatracação de navios no mesmo berço ao mesmo tempo.

##### 5.4.1. Definição de área de controle e área de intervenção para dragagem

Para melhor controle e análise, convencionou-se a divisão da área de dragagem de manutenção do Píer IV em quatro áreas: uma situada ao norte do berço norte (área A); outra à frente da linha de atracação (área B), uma ao sul do berço sul (área C); e outra no tardoz (parte próxima à costa) do berço sul (área DS). As três últimas áreas correspondem às caixas de sedimentação. A Figura 38



apresenta a planta indicativa do posicionamento das áreas de dragagem com o projeto do Píer IV.

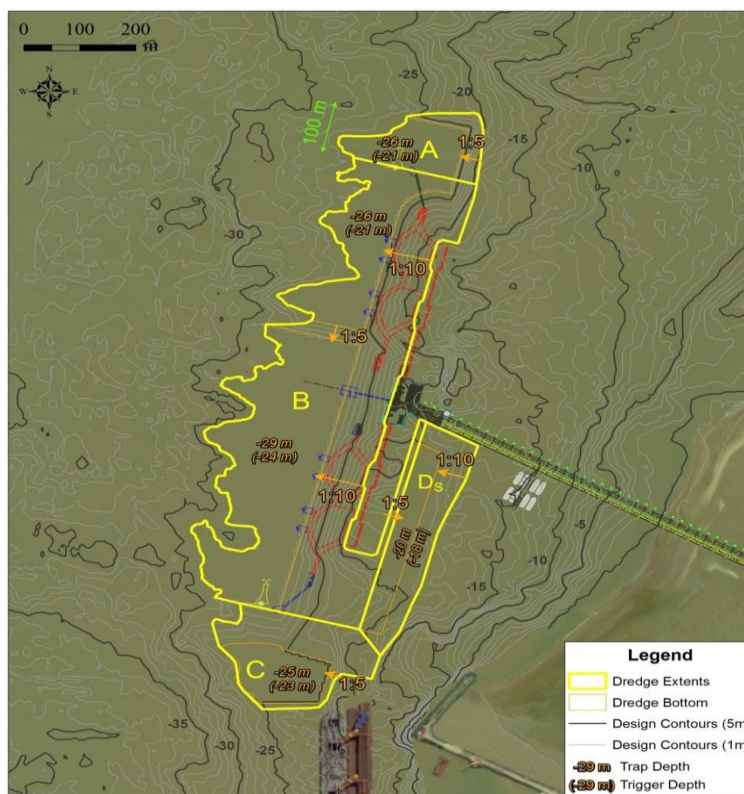


Figura 38. Áreas de dragagem com o Píer IV.  
Fonte: alterado de Baird (2012)

De acordo com o estudo realizado pela Baird (2012), os volumes de dragagem de manutenção do Píer IV foram estimados com base em um modelo numérico morfológico e hidrodinâmico, calibrado com dados de corrente, concentração de sedimentos e levantamentos batimétricos. Esse modelo foi simulado considerando um período de 100 dias.

### 5.5. Elaboração do cronograma de dragagem

Tomado o conhecimento das cotas mínimas operacionais, da dinâmica de sedimentação e da necessidade operacional de embarque de minério de ferro, torna-se vital a elaboração de um planejamento de dragagem, com intervenções preventivas e com iniciativas para eliminar ou reduzir ao máximo o impacto operacional para manutenção de profundidade.

O planejamento da intervenção de dragagem consiste em relacionar intervalos de janelas de marés consecutivas, avaliando a produtividade (navegação e bombeamento) da embarcação mobilizada, com condições operacionais favoráveis (produtividade de dragagem) associadas ao tempo suficiente para eliminar por

completo todo o material sedimentado, de forma a garantir a autonomia até o próximo intervalo de intervenção para dragagem.

Ou seja, considerando a área “B” da tabela 6, foi estimado o volume da intervenção de dragagem de forma a se atingir a cota mínima de operação (25 metros) e acompanhada, por 22 dias, a evolução da sedimentação no intuito de combinar com o intervalo da preventiva do píer.

A figura 39 apresenta um exemplo de programação de intervenção de dragagem na intersecção dos berços Sul e Norte, atuando na oportunidade da preventiva do berço Sul, ocasionando o mínimo de impacto ao berço Norte.

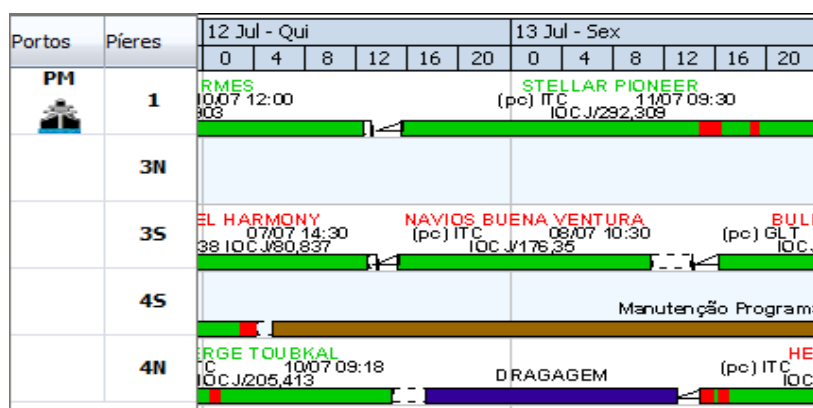


Figura 39. Fila de navios do mês de julho/18 (editada)  
 Fonte: Vale S/A (2018)

### 5.5.1. Frequência de dragagem

A necessidade de se realizar a dragagem de manutenção varia de acordo com a capacidade de armazenamento de sedimentos de cada área de dragagem até a cota de profundidade mínima para uma operação segura de atracação, embarque e desatracação dos navios (cota de gatilho). O indicativo dessas cotas é dado pelo acompanhamento batimétrico nas áreas controladas.

A Tabela 7 apresenta a estimativa de frequência dos eventos de dragagem de manutenção, baseada na simulação realizada pela Baird (2012). Para este foi considerado a taxa de sedimentação e a cota mínima operacional.

Tabela 7 – Estimativa de frequência de dragagem de manutenção do Píer IV Norte

| Área de dragagem | Estimativa de frequência de dragagem de manutenção |
|------------------|--|
| A                | A cada 24 dias                                     |
| BNorte           | A cada 22 dias                                     |
| BSul             | A cada 34 dias                                     |
| C                | A cada 9 dias                                      |
| Ds               | A cada 26 dias                                     |

Fonte: Baird (2012)

### 5.5.2. Volume de dragagem

Os dados de monitoramento permitiram o desenvolvimento de um esquema proativo de dragagem que reduziu os volumes de dragagem e economizou custos em um plano de dragagem adaptável a necessidade operacional.

Já era esperado que a maior parte da manutenção da profundidade com a dragagem fosse no berço Norte. No entanto, com os dados e as incertezas nas condições do leito marinho após a conclusão da construção, ainda eram alarmantes. Ou seja, o volume anual estimado de dragagem de operação/manutenção poderia variar entre 600.000 a 1.200.000 m<sup>3</sup>/ano, volume *in-situ*, e implantação de dragagem de 918.000 m<sup>3</sup>.

### 5.5.3. Impacto operacional da dragagem (janelas de atracação de navios para manutenção de profundidade)

O resultado obtido na simulação indicou um volume total médio de dragagem de manutenção de aproximadamente 177.000 m<sup>3</sup> por mês, porém, em função das condições locais, esse volume pode sofrer variações.

Diante da estimativa de intervenção (tabela 8) e da estimativa de sedimentação (tabela 7) fica mais fácil o planejamento para mitigar os impactos operacionais por conta das janelas na fila de navios que a dragagem exige.

Tabela 8 – Volumes médios mensais de dragagem de manutenção

| Área de dragagem | Cota de projeto (m) | Cota de gatilho para dragagem (m) | Volume médio de dragagem de manutenção (m <sup>3</sup> /mês) |
|------------------|---------------------|-----------------------------------|--|
| A                | 26                  | 21                                | 78.000   |
| BNorte           | 26                  | 21                                | 21.000   |
| BSul             | 29                  | 24                                | 15.000   |

|       |    |    |         |
|-------|----|----|---------|
| C     | 25 | 23 | 24.000  |
| Ds    | 20 | 18 | 39.000  |
| Total |    |    | 177.000 |

Fonte: Vale S/A (2018)

#### 5.5.4. Evolução da profundidade e impactos da dragagem

Com o ganho do calado operacional dos portos, estes podem ter ganhos substanciais na movimentação de cargas ao longo do tempo. Com isso, os operadores portuários podem otimizar e planejar novos investimentos e tornar ainda mais eficiente a carga e descarga dos navios, reduzindo o tempo de atracação das embarcações e aumento o fluxo de mercadorias de um porto.

Além disso, a segurança da navegação está garantida evitando danos e prejuízos nas embarcações, eliminando também atrasos por espera de preamares (maré alta) para a saída dos navios carregados.

A tabela 9 apresenta o cálculo para descobrir a capacidade de transporte de carga dos navios. Obtendo-se a multiplicação dos valores de boca, comprimento, calado e coeficiente de bloco. Neste caso, já é de nosso conhecimento o DWT do navio da classe VMAX, sendo assim, calcula-se o coeficiente de bloco e simula-se o valor para o calado esperado em função das restrições operacionais por profundidade do terminal.

Tabela 9 – Cálculo para descobrir a capacidade de transporte

| Classe do Navio | Boca (m) | Comprimento (m) | Calado (m) | Coeficiente de Bloco (Cb) | DWT      |
|-----------------|----------|-----------------|------------|---------------------------|----------|
| VALEMAX 1       | 65       | 362             | 23         | 0,75                      | 400.000t |
| VALEMAX 2       | 65       | 362             | 22         | 0,75                      | 400.000t |

Fonte: Vale S/A (2018)

Considerando o cálculo para o navio de projeto, pertencente a classe VALEMAX (DWT de 400kt), a cada 1m de restrição operacional que impeça a plena operação (carregamento total), o terminal deixa de embarcar cerca de 12kt de minério de ferro.

Em média, este terminal marítimo, opera por mês, cerca de 10 navios deste porte. Ou seja, a ausência de um monitoramento para estimar a demanda e capturar oportunidades para intervenção na profundidade do berço, impactaria em cerca de 120kt/mês.

## 6. Conclusão

Após a primeira fase de implantação do Píer IV Sul, verificou-se por meios de levantamentos hidrográficos, uma alteração do regime sedimentológico, outrora observado na região, o que impacta diretamente na estratégia operacional, com a programação de alocação de navios, movimentação de minério e dragagem do terminal. Considerando a importância da implantação desta obra para a Vale S.A, surge a necessidade de entender a sedimentação de forma a reduzir as incertezas e otimizar as operações do terminal. Sabendo das condições locais de corrente e variações de maré, faz-se necessário conhecer o máximo possível o ambiente para operar de forma eficiente e segura.

A importância da estruturação da equipe garantiu maior confiabilidade e credibilidade para o processo, principalmente ao investir em mão de obra qualificada e equipamentos próprios de alta tecnologia. Como parte do investimento intelectual, a esta equipe foram promovidos treinamentos no Fundação Centro Tecnológico de Hidráulica (FCTH) um pacote de programas de levantamento e processamento de dados batimétricos e análises sedimentológicas, com o intuito de qualificar e promover a disseminação e replicação deste conhecimento na companhia e nos demais berços do terminal.

Esse legado pode ser considerado como um ganho qualitativo deste trabalho, uma vez que o permitiu a disponibilização dos recursos necessários para o desenvolvimento de um trabalho continuado voltado a levantamentos hidrográficos, que atendem aos requisitos legais exigidos pela NORMAN 25.

O cenário ideal proposto neste estudo para o teste de dragagem natural considerava carregamento ao máximo de navios de grande porte (Valemax, com 390.000 toneladas de DWT) no estofo da baixa por sua maior influência no fundo do costado e permanência da embarcação em período de maré de sizígia com baixa-mar.

Infelizmente, não foi possível a atracação de navios de grande porte no período de *ramp up* para testar a hipótese de dragagem natural pela embarcação durante o tempo de sua permanência no berço por conta de requisitos de segurança operacional, assim como regras da praticagem atuante na Baía de São Marcos, que não permitiu a operação com o carregamento total da capacidade do navio nem sua permanência em períodos críticos de maré.

As manobras de teste em condições extremas foram inviabilizadas por conta dos grandes esforços do sistema de amarração, que ainda não havia sido testado em condições amenas e ainda se encontrava em comissionamento, e, principalmente, pela possível instabilidade do talude. Isto poderia ocasionar uma ocorrência portuária grave, como uma desatracação involuntária, colocando em xeque a segurança não só do terminal, como também dos demais píeres próximos.

Um programa de dragagem foi inicialmente desenvolvido para a infraestrutura marítima Pier IV, em Ponta da Madeira, com os objetivos de maximizar o período das atracções e para minimizar o risco operacional ou impacto operacional. O capital correspondente e os volumes de dragagem de manutenção para suportar o planejamento operacional foi de 1.000.000m<sup>3</sup> e 177.000m<sup>3</sup> por mês, respectivamente. O monitoramento contínuo através da batimetria da área do projeto e a análise dos dados recolhidos resultaram numa melhor compreensão do comportamento morfológico do fundo do mar e da sua interação com a estrutura do cais. Essas informações proporcionaram a oportunidade de criar um esquema de dragagem adaptativa que permitisse à Vale S/A realizar muito menos dragagem do que o esperado em seu plano inicial.

A rotina de batimetria permitiu conhecer a real necessidade de dragagem do Píer IV Norte. A estimativa prevista em projeto para garantir a manutenção dos 25 metros de profundidade do berço era de 39.4 mil metros cúbicos por mês, que exigiria 131 horas de indisponibilidade do píer para sua completa execução. A partir dos testes estruturados e implementados foi possível reduzir a demanda de volume dragado do terminal para 15.6 mil metros cúbicos por mês, a serem executados em 51 horas, recuperando 80 horas, que podem ser revertidas em tempo operado e ganhos operacionais.

Além disso, O domínio das análises dos dados decorrentes das batimetrias de pré e de pós atracção da embarcação, juntamente com a previsão mais assertiva das amplitudes e intervalos das marés, permitiu intervenções em janelas específicas e com condições operacionais mais favoráveis. Foi possível também mapear o ponto de maior criticidade do berço, que se encontra exatamente na intersecção entre o Píer IV Sul e o Píer IV Norte.

A partir de janeiro de 2016, a elevação do fundo do mar no berço norte obteve profundidade suficiente para atracção das maiores mineraleiros. Da mesma forma, após a conclusão da estrutura do píer norte, uma abordagem de manejo



adaptativo usando uma combinação de dragagem, aumento gradual do cronograma de chegada do navio e bastante monitoramento foi usada para influenciar as cotas do berço norte até as cotas necessárias para a atracação e permanência segura dos navios da classe Valemax.

Os custos de dragagem de manutenção são importantes fatores que contribuem para a economia dos projetos de navegação. A aplicação de abordagens de dragagem adaptativa com base no monitoramento e no entendimento dos detalhes dos processos físicos pode proporcionar oportunidades de economias de custo significativas que podem melhorar a rentabilidade de projetos existentes e futuros, além de reduzir os impactos ambientais associados à dragagem de capital e manutenção.

É recomendada ainda a continuação do monitoramento do fundo do mar na área de atuação do Píer IV, isso permitirá que o entendimento dos detalhes comportamentais de características morfológicas ao redor do píer que afetam diretamente as operações do píer.



## 7. Referências bibliográficas

- ALUMAR (Maranhão). Porto. Disponível em: <<http://www.alumar.com.br>>. Acesso em: 13 out. 2016.
- ANTAQ, Agência Nacional de Transportes Aquaviários. Disponível em: <<http://www.anm.gov.br/>>. Acesso em: 13 de março de 2018.
- BAIRD. Modelagem de transporte de sedimentos (arquivo: DisposalSite\_Overview\_Extended\_compressed.wmv). 2012.
- BAIRD. Sediment Trap Design Iron Ore Exporting Terminal – Píer IV. Apresentação Power Point. 2011.
- CLIMA E TEMPO. Disponível em:< <https://www.climatempo.com.br/>>. Acesso em: 23 de março de 2018.
- COHEN, J.C.P, SILVA DIAS, M.A. & NOBRE, C., 1995. Environmental Conditions Associated With Amazonian Squall Lines: A Case Study. American Meteorological Society.
- Departamento Nacional de Produção Mineral. Disponível em: <<http://www.anm.gov.br/>>. Acesso em 13 de março de 2018.
- DILLENBURG, S. R.; HESP, P. A. 2009. **Geology and Geomorphology of Holocene Coastal Barriers of Brazil**. 1. ed. Heidelberg: Springer, 2009. v. 107. 380p.
- EL-ROBINI, M. et al. **Erosão e Progradação do Litoral Brasileiro-Maranhão**. SIGERCOM, Ministério do Meio Ambiente. 2006.
- FEITOSA, A.C., 1989. **Evolução Morfogenética do Litoral Norte da Ilha do Maranhão**. Rio Claro, UNESP: 210p. Dissertação de Mestrado.
- FEMAR. Disponível em: <<https://www.portalmaritimo.com/tag/femar/>>. Acesso em: 15 de março de 2018.
- GOLDER ASSOCIATES BRASIL CONSULTORIA E PROJETOS LTDA. **Estudo de Impacto Ambiental (EIA) da Dragagem de Manutenção do Píer IV do Terminal Portuário Ponta da Madeira (TPPM)**. 2013.
- HAYES, S. P. **The temperature and salinity fine structure of the Mediterranean water in the western Atlantic**. *Deep Sea Research and Oceanographic Abstracts*, v. 22, p. 1–11, 1975.
- KJERFVE, B.; LACERDA, L. DE. **Mangroves of Brazil**. *Latin America Mangrove Ecosystem Technical Report*, v. 2, p. 245–272, 1993.
- KRUEGER, C.P., **Levantamentos Batimétricos**, Revista INFOGEO 39 (MUNDOGEO) setembro 2005, Disponível em





<http://mundogeo.com/blog/2005/09/27/levantamentos-batimetricos>). Acesso em 20/09/2017.

MARANHÃO. Secretaria de Estado da Infraestrutura (SINFRA). Governo do estado do Maranhão. 2011.

MILEN, A.F. et al. **Complexo Portuário da Baía De São Marcos: Contribuições às Análises Geoambientais**. VI Simpósio Nacional de Geomorfologia. Goiânia, 2006

MOLION, L. C. B.; BERNARDO, S. DE O. **Uma revisão da dinâmica das chuvas no Nordeste Brasileiro**. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 17, n. 1, p. 1–10, 2002.

MORAIS, J.O. **O Processo de Sedimentação na Baía de São Marcos. Estado do MARANHÃO**, BRASIL, Arquivo de Ciências do Mar, Fortaleza, 17 (2): 153-164. 1977.

NORMAM 25, **Normas de Auditoria Marítima para Levantamentos Hidrográficos**, Marinha do Brasil, Diretoria de Hidrografia e Navegação, 2ª Revisão. 2017.

PORTOBRÁS, **Parecer Técnico quanto aos Aspectos Hidráulico/Sedimentológicos Referentes às Alternativas de Solução para Implantação do Pier Petrolífero do Porto Comercial do Itaqui**. V.1: 51p. 1988.

SANTOS, J.H.S., et al, **Características Geológicas e Geomorfológicas da Baía de São Marcos**, Golfão Maranhense – MA. 2001.

SISMO – HIDROMARES. **Instalação do Sistema de Monitoramento Oceanográfico em Tempo Real. Relatório Técnico Mensal**. 2018.

SOARES, R. A., 2015. **Modelagem do transporte de ictioplâncton no Complexo Estuarino de São Marcos, Maranhão – Brasil**. Dissertação (Mestrado em Recursos Aquáticos e de Pesca) – UFMA, São Luís.

SOUZA FILHO, P. W. M., 2005. **Costa de manguezais de macromaré da Amazônia: cenários morfológicos, mapeamento e quantificação de áreas usando dados de sensores remotos**. *Revista Brasileira de Geofísica*, v. 23, n. 4, p. 427–435.

VALE S/A. Disponível em: [www.vale.com.br](http://www.vale.com.br). Disponível em: Acesso em: 08 de fevereiro de 2018.

VIANA, J.R., **Estudo da Morfodinâmica da Praia de São Marcos São Luís – MARANHÃO**. Trabalho de Conclusão de Curso. Curso de Geografia. UFMA. 2000.