

# ESTUDO LOCALIZACIONAL DO PÍER IV DO COMPLEXO PORTUÁRIO DO MARANHÃO COM SUPORTE DA MODELAÇÃO NUMÉRICA

*Patrícia Dalsoglio Garcia<sup>1</sup>, Tiago Zenker Gireli<sup>2</sup>, Juliano Philippi Gerent<sup>3</sup> & Paolo Alfredin<sup>4</sup>*

**RESUMO** --- A Área Portuária do Maranhão constitui-se no segundo maior complexo portuário da América Latina e um dos maiores do mundo em termos de movimentação de carga, com mais de 100 milhões de toneladas movimentadas em 2007, isto é mais de 15% da movimentação portuária anual do país. O terminal encontra-se atualmente em expansão com o projeto do Píer IV da VALE, cujo alinhamento foi definido com suporte na modelação numérica e física. Neste sentido, o principal objetivo deste trabalho é apresentar o estudo hidrossedimentológico da área do futuro Píer IV, através de modelação numérica com utilização do software MIKE 21 e a otimização da localização do Píer em conjunto com emprego de ensaios de amarração de navios no modelo físico disponível no LHEPUSP.

Os resultados obtidos no modelo hidrodinâmico combinados com os obtidos no modelo físico demonstraram a importância do uso da modelação numérica como ferramenta para estudos de arranjos de obras portuárias nacionais.

Por fim, ressalta-se a importância de um trabalho como este em âmbito nacional, posto que é singular o acompanhamento detalhado da implantação de um grande complexo portuário, contribuindo para a redução do empirismo adotado nos projetos e operações portuárias.

**ABSTRACT** --- Maranhão Harbour Area is the second biggest port complex in cargo handling of Latin America and one of the greatest of the world, with 100 million tons loading rate in 2007, which is more than 15% of the annual cargo handling of the country.

Currently the terminal is being expanded with the project of Pier IV of VALE whose alignment was defined supported by numerical and physical modeling. Thus, the main objective of this paper is to show the tidal currents circulation study on the future Pier IV area, through numerical simulation using the software MIKE 21 and the optimization of the Pier localization using also the physical model available at LHEPUSP.

The hydrodynamic model results combined with the ones obtained by physical modeling had demonstrated the importance of the use of numerical simulation as a tool for studies of port arrangements.

At last, it is important to emphasize this research in the national context, because is unique such continuous detailed Harbour Complex project improvement, contributing to reduce the simple empirical project and operation procedure.

**PALAVRAS-CHAVE:** Hidráulica Marítima, Obras Portuárias, Modelação Numérica

1) Doutora pela Escola Politécnica da USP, Engenheira da Fundação Centro Tecnológico de Hidráulica e Professora da Universidade Presbiteriana Mackenzie, Av. Prof. Lúcio Martins Rodrigues, 120, 05508-900 São Paulo – SP. E-mail: [dgpatricia@gmail.com](mailto:dgpatricia@gmail.com)

2) Professor Doutor da Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da Universidade Estadual de Campinas – FEC/UNICAMP, Av. Albert Einstein, 951, 13083-852 Campinas - SP. E-mail: [zenker@fec.unicamp.br](mailto:zenker@fec.unicamp.br)

3) Engenheiro da Fundação Centro Tecnológico de Hidráulica, Av. Prof. Lúcio Martins Rodrigues, 120, 05508-900 São Paulo – SP. E-mail: [terenge@yahoo.com](mailto:terenge@yahoo.com)

4) Professor Livre Docente da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo e Engenheiro do Departamento de Águas e Energia Elétrica do Estado de São Paulo, Av. Prof. Lúcio Martins Rodrigues, 120, 05508-900 São Paulo – SP. E-mail: [paolo.alfredini@poli.usp.br](mailto:paolo.alfredini@poli.usp.br)

## 1 INTRODUÇÃO

Atualmente os impactos de ordem ambiental devem ser incorporados aos estudos ligados à gestão de zonas estuarinas. É importante perceber que as ações antrópicas sempre interferem no meio ambiente, porém nem sempre esta interferência é prejudicial. Ou seja, é necessário que as obras estuarinas cumpram o seu papel sem, no entanto, gerar impactos negativos. Para isto é fundamental o conhecimento do comportamento hidráulico das correntes.

Na Área Portuária do Maranhão, em que a maré pode atingir amplitudes de até 6,5 m, com correntes associadas de mais de 6 nós e milhões de m<sup>3</sup> de sedimentos transportados anualmente, é de grande importância a existência de estudos que caracterizem a circulação das correntes de maré e o transporte de sedimentos associado na Baía de São Marcos (MA). Em última análise, é imprescindível que se tenha uma metodologia confiável para a análise da evolução morfológica, uma vez que se pretenda proceder a uma análise de impactos ambientais, tendo em vista a implantação de obras de Engenharia Portuária e de gestão estuarina.

A Área Portuária do Maranhão constitui-se no segundo maior complexo portuário da América Latina e um dos maiores do mundo em termos de movimentação de carga, com mais de 100 milhões de toneladas movimentadas em 2007, isto é mais de 15% da movimentação portuária anual do país. Situada na costa ocidental da Ilha de São Luís, na Baía de São Marcos, esta área portuária abrange o Complexo Portuário de Ponta da Madeira (PDM), da VALE - Companhia Vale do Rio Doce S. A., o Porto de Itaqui, da EMAP – Empresa Maranhense de Administração Portuária e o Porto da ALUMAR. Em termos do potencial logístico do transporte aquaviário brasileiro esta região constituir-se-á em cinco anos no principal pólo portuário da América Latina em movimentação de cargas, em função dos projetos previstos para a área. Constituindo-se em escoadouro natural de ampla região geoeconômica, que é a Amazônia Legal Oriental (veja Figura 1), as principais cargas movimentadas são os minérios de ferro e manganês, provenientes da Província Mineral de Carajás (PA), ferro gusa, alumina e alumínio, resultado do beneficiamento da bauxita provinda do Rio Trombetas (PA), grãos e granéis líquidos.

O Laboratório de Hidráulica da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – LHEPUSP – tem uma longa história de 31 anos de parceria tecnológica com a Companhia Vale do Rio Doce S. A. no estudo em modelo físico do Complexo Portuário de Ponta da Madeira, bem como dos Portos de Itaqui e ALUMAR. O acervo técnico do laboratório é o mais completo da área e abrange levantamentos hidrográficos de sondagens batimétricas, correntometrias e de trajetórias de derivadores, sedimentologia e dados de dragagens efetuadas na área nos últimos trinta anos, acompanhando a implantação dos projetos portuários de Ponta da Madeira, Itaqui e ALUMAR. Este acervo constitui-se em preciosa base de dados, que fundamentou este trabalho.

Deve ser ressaltado que no Brasil estudos como este são singulares posto que há uma carência de bases de dados confiáveis. Além disso, o acompanhamento sistemático da implantação de um grande complexo portuário é único, contribuindo para redução do empirismo nas medidas adotadas nos projetos e operação.

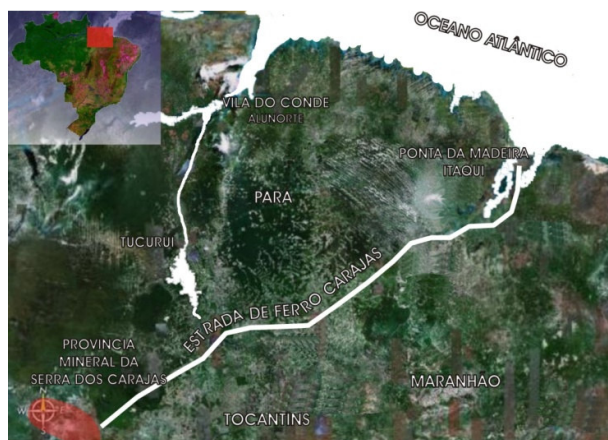


Figura 1 - Localização da área de estudo

## 2 OBJETIVO

Constitui objeto do presente trabalho o desenvolvimento do estudo de caracterização da circulação das correntes de maré e das evoluções morfológicas associadas, naturais ou induzidas por obras portuárias, ocorridas na Área Portuária do Maranhão, com apoio na modelação numérica, enfocando os resultados que, juntamente com a modelação física, subsidiaram a otimização da localização do futuro Píer IV da VALE.

## 3 DESCRIÇÃO DO MODELO NÚMÉRICO

O programa utilizado para a modelação numérica foi o MIKE 21, adquirido pela VALE para fins comerciais, e que se encontra em utilização na FCTH sob autorização da VALE desde 2003. Este programa é de autoria do DHI (Danish Hydraulic Institute), o internacionalmente renomado instituto de hidráulica dinamarquês que executa projetos e estudos nas áreas de Hidráulica Marítima, Fluvial e de Qualidade da Água em várias partes do mundo. Os módulos utilizados serão PP (Pre and Post Processing Module) e NHD (Nested Hydrodynamic Module).

*O módulo PP* é utilizado para preparar as bases de dados para o processamento no programa e para a visualização das saídas gráficas e animações dos resultados. Neste caso foram feitas as previsões e análises de marés, a criação e edição da grade batimétrica e a criação das condições de contorno das marés.

*O módulo NHD* é um sistema de modelagem numérica para a simulação das variações do nível e fluxo d'água em estuários, baías e áreas costeiras em geral. Ele simula fluxos variáveis em duas dimensões e verticalmente integrado (DHI). Portanto, é este módulo que efetivamente faz os

cálculos hidrodinâmicos. As equações utilizadas para descrever as variações do fluxo e do nível d'água são a equação da conservação de massa e as equações do momentum integradas na vertical.

Este módulo possibilita a simulação de grades batimétricas de diferentes resoluções, aninhadas, de forma que nas regiões onde se deseja maior refinamento os resultados são mais precisos, sem que haja necessidade de modelar com alta resolução toda a área, o que requer grande recurso computacional.

O arquivo de grade batimétrica é formado a partir de uma matriz, cujos valores dos elementos são as cotas dos pontos da superfície de fundo. Estes pontos têm um espaçamento definido de acordo com o tamanho da área a ser modelada e da precisão que se deseja. Em resumo, esta matriz representa a superfície de nível.

No modelo hidrodinâmico o espaçamento na direção x deve ser igual ao espaçamento na direção y. Além disso, quando o recurso de aninhamento das grades é utilizado, o valor da área menor deve ser até 3 vezes menor do que o da área maior.

Por fim, com os dados de entrada prontos, as simulações podem ser feitas. Elas fornecem como resultados vários parâmetros hidrodinâmicos importantes, tais como os níveis de maré, velocidades e direção das correntes em toda a área de simulação.

Ressalta-se ainda que, além da batimetria e das condições de contorno, podem ser colocados como dados de entrada no modelo a ação de ondas e ventos para determinar as correntes resultantes. Neste trabalho estes dados não foram colocados por terem uma reduzida importância frente à maré, que é o principal agente hidrodinâmico local

#### **4 O MODELO HIDRODINÂMICO**

As etapas que envolveram a modelação hidrodinâmica foram:

- Preparação da base de dados (batimetria, maré, correntes, trajetórias);
- Escolha dos períodos de simulação;
- Calibração a partir de inúmeras simulações realizadas;
- Validação.

Para preparar a batimetria, primeiramente é necessário dispôr dos dados batimétricos. O acervo do Laboratório de Hidráulica da EPUSP conta com arquivos batimétricos digitalizados da área, além de cartas náuticas e mapas que foram digitalizados para preencher os locais onde não havia batimetrias digitais disponíveis.

A área definida para modelação foi escolhida tendo como limitantes as condições de contorno de marés que devem ser inseridas nas bordas do modelo. Como se tem uma escassez de dados de maré na região optou-se por modelar toda a Baía de São Marcos.

A princípio o contorno aberto localizava-se entre os marégrafos de Alcântara e São Luís (GARCIA,2007). As inúmeras tentativas de ajustar os resultados em modelo com àqueles obtidos no real mostraram-se pouco eficientes na área próxima ao Canal do Boqueirão, região de grande interesse para estudos de novos Píeres para a Companhia Vale do Rio Doce – VALE. Uma análise mais detalhada mostrou que a escolha deste contorno influenciou os resultados deficitários, principalmente nas marés de enchente. Na Figura 2 é apresentado um detalhe deste contorno, utilizado para a modelação até o final de 2006.

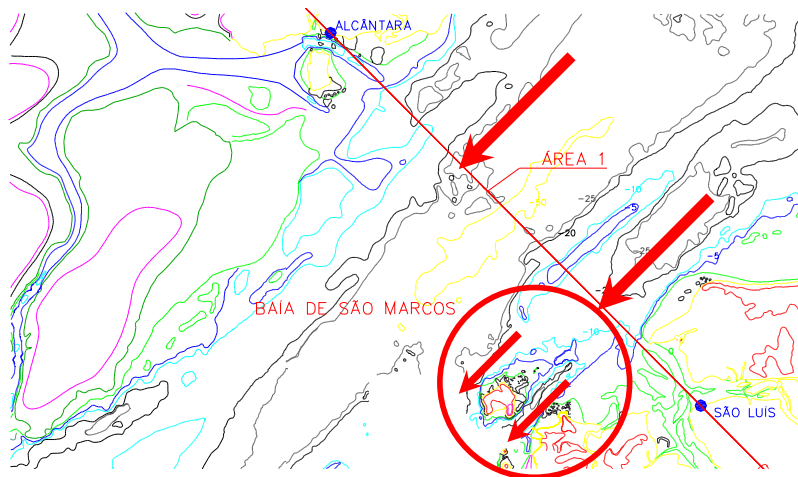


Figura 2 - Detalhe do contorno aberto da grade modelada

Nesta borda existem dois canais preferenciais de entrada de água, caracterizados com os números 1 e 2 na Figura 60. No canal 1 o caminhamento segue com profundidades acima de 10m, representando fielmente a inércia do fluxo d'água. Já no canal 2 as profundidades são bem menores a partir da borda, principalmente por causa da Ilha do Medo que produz uma bifurcação do fluxo em 3 e 4. Isto faz com que a inércia do movimento d'água não seja bem representada. Além disso, o fluxo em 4 é o mais prejudicado devido às baixas profundidades no canal, não representando o real fluxo que ocorre nesta área, cujo histórico mostra grandes velocidades de correntes.

Sendo assim, a partir de 2007 foram estudados novos contornos, mais afastados desta área de interesse, permitindo uma acomodação do fluxo e, conseqüentemente, melhores resultados no tocante as velocidades das correntes. Optou-se por um contorno entre os marégrafos de Pericaúá e Ilha de Santana. Na Figura 3 é apresentada à comparação entre o contorno antigo e o novo. Já na Figura 4 é apresentada em detalhes a nova área modelada.

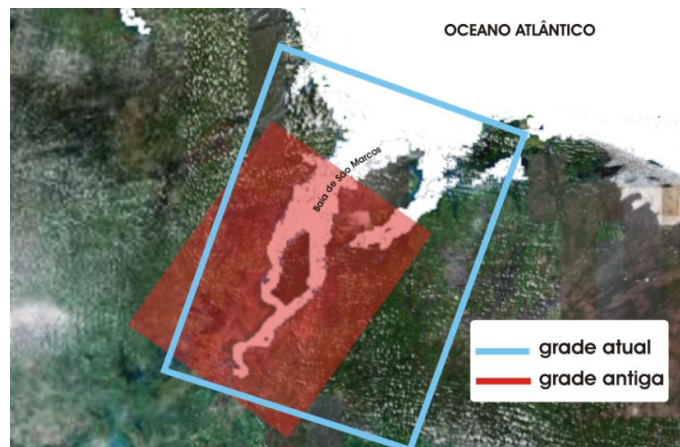


Figura 3 - Comparação entre a área modelada até 2006 e a área atual

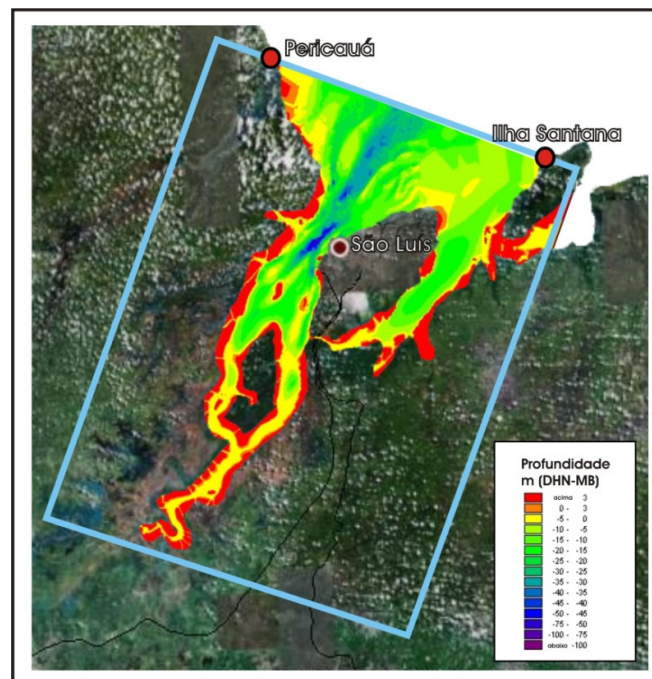


Figura 4 - Nova área modelada – grade de espaçamento de 270m

Para que a área de interesse pudesse ser estudada com maior precisão foram feitas malhas secundárias, com resoluções diferentes. Na Figura 5 estão representadas as malhas utilizadas.

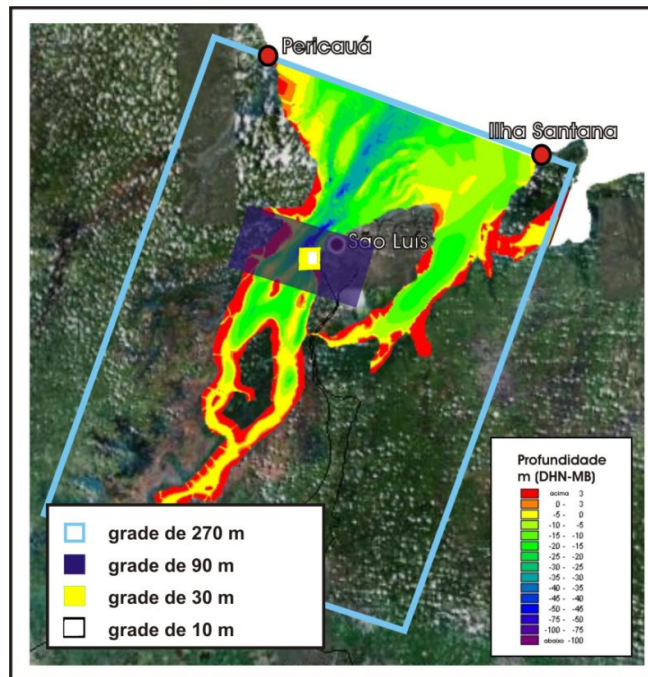


Figura 5 - Delimitação das malhas batimétricas Com as grades batimétricas definidas os arquivos são gerados no módulo PP

A condição de contorno básica utilizada foi a de variação do nível d'água nos contornos abertos. Isso pode ser obtido facilmente através de registros maregráficos. Para a área 1 (mais externa) há apenas um único contorno aberto e em cada extremo deste contorno situa-se um marégrafo: Pericaúá e Ilha de Santana, que logicamente foram utilizados para descrevê-lo. Com estes marégrafos encontravam-se muito distantes, foram utilizados também os marégrafos JP15 e Ponta da Madeira (PDM) para estabelecer a interpolação.

Para construção dos arquivos de maré no formato do programa, as principais etapas realizadas foram:

- preparo do arquivo com os dados das componentes harmônicas para os marégrafos utilizados (Pericaúá, Ilha de Santana, Ponta da Madeira e JP15);
- definição das datas em que as marés seriam geradas a partir da escolha dos pontos de calibração;
- criação dos arquivos de maré para as bordas.

As previsões de maré para os pontos citados foram feitas pelo programa PP. As componentes harmônicas utilizadas na previsão foram obtidas através da FEMAR – Fundação de Estudos do Mar.

As previsões de Pericaúá e Ilha de Santana foram o ponto de partida para a montagem do arquivo de bordas. De forma similar à batimetria, o arquivo de maré também é apresentado na forma de matriz. A linha representa a variação do nível d'água ao longo da bordas (apenas os pontos da grade batimétrica que podem ter entrada de água) em um determinado tempo. Ao longo

das colunas da matriz há a variação do tempo. No caso foi feita uma variação de 15 em 15 minutos, tempo suficiente para registrar a variação da maré de forma satisfatória.

Percebe-se, porém, que com os dados de Pericaúá e Ilha de Santana somente preenchem a primeira e a última coluna da matriz. Para completar os dados foi feita uma distribuição linear, em cada linha da matriz, utilizando-se o programa @Microsoft Excel. Para melhorar esta interpolação foi inserido na coluna localizada na interseção da linha que une os marégrafos de Pericaúá e Ilha de Santana com a linha dos marégrafos JP15 e PDM (Figura 6) valores de maré obtidos da interpolação de JP15 e PDM. O resultado desta distribuição foi colocado no formato do programa. Assim os dados de maré finalmente estão prontos para a simulação.



Figura 6 - Marégrafos utilizados para elaboração do arquivo de dados de maré para o contorno aberto da área 1 (grade 270m)

A escolha dos períodos de simulação foi feita a partir da definição dos pontos de medição de velocidade e direção de correntes que seriam utilizados para calibração do modelo. Havia um grande número de medições realizadas em diferentes pontos, condições de maré e datas. Para fins de calibração optou-se por se estudar apenas as condições de maré de sizígia, nas quais as velocidades são maiores, sendo mais importantes para os estudos da região portuária. As medições em quadratura seriam utilizadas para validação do modelo, juntamente com as trajetórias de derivadores. O critério de seleção privilegiou também os pontos que se encontravam em zonas de importância portuária.

A partir dos pontos selecionados foram estimados os períodos de simulação, respeitando os seguintes critérios:

- Período de cada simulação foi sempre iniciado 12 horas antes do primeiro registro de correntes da série, período este considerado ideal para a estabilização do programa;
- Final da simulação correspondia ao final do registro da série.



A calibração do modelo consiste em um processo recursivo semelhante ao apresentado na Figura 7.

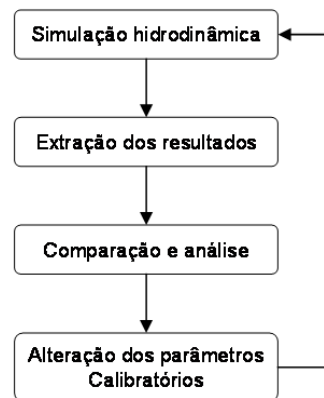


Figura 7 - Processo de calibração do modelo hidrodinâmico

A princípio foram feitas, simultaneamente, a simulação de todos os períodos selecionados previamente e a extração dos valores de velocidade e direção das correntes dos pontos onde se desejava comparar os dados com os valores medidos no real. A seguir os resultados foram comparados aos valores reais. A partir da análise comparativa foram estimados os novos valores para os parâmetros calibratórios.

Os parâmetros de calibração alterados ao longo desta etapa foram:

- Resistência do fundo através do número de Manning (M);
- Eventuais ajustes na batimetria corrigindo eventuais erros de interpolação que comprometem a entrada de fluxo d'água nos canais menores.

Utilizando-se como base os resultados já obtidos em modelações anteriores (GARCIA,2007) foram utilizados como parâmetros de Manning os valores de  $32 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$  e  $29 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ . Os resultados mais expressivos foram obtidos com o valor de  $32 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ . Após vários ajustes os resultados obtidos estão apresentados a seguir para o período de junho de 2004, período este com os dados de medição de correntes no real mais recentes e próximas a área do novo Píer IV, em fase final de projeto.

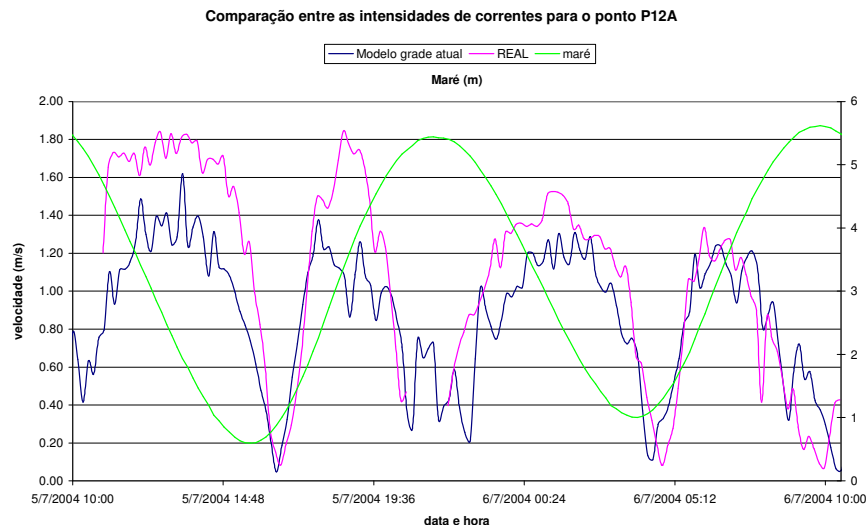


Figura 8 - Comparação entre as intensidades de correntes do real e do modelo para o ponto P12A

Constatou-se que o modelo representa em termos gerais as características circulatórias da região e com intensidades e direções de correntes na mesma ordem de grandeza dos valores obtidos na natureza, estando, portanto, calibrado.

Para etapa de validação do modelo foram utilizados os dados de trajetórias disponíveis. As trajetórias foram digitalizadas com as respectivas datas de lançamento, maregramas, velocidades em cada trecho, horários de lançamento, intermediários e chegada dos derivadores.

No modelo numérico as trajetórias são obtidas a partir da saída da simulação hidrodinâmica. Portanto, para se obter a trajetória foi necessário simular o período em que o derivador real foi lançado. Foram simulados dois períodos: dezembro de 1973 e maio de 1985. A partir das simulações foi utilizado o módulo para extrair as saídas de trajetória de derivadores.

Os dados de entrada necessários para se obter esta saída foram:

- Saída hidrodinâmica do período em estudo;
- Data, hora de lançamento do derivador;
- Posição de lançamento do derivador com relação à grade batimétrica.

Neste tipo de saída não é possível se obter a velocidade em cada trecho do deslocamento do derivador, tal como é feito no real. Além disso, esta trajetória de saída do programa está referida a uma velocidade média do fluxo d'água (em relação à coluna d'água) e não a uma velocidade de superfície, típica do derivador, que é maior. Portanto, a comparação entre a trajetória real e a obtida em modelo apresentará alterações com relação à velocidade, tempo e espaço percorrido: as trajetórias em modelo terão um atraso em relação à real, pois suas velocidades são menores. Como o objetivo desta comparação de trajetórias é de apenas validar o modelo, procurou-se dar atenção maior à direção das trajetórias, e não à velocidade (e conseqüentemente à distância percorrida).

Mesmo as velocidades não sendo o objetivo principal desta etapa de calibração, foram extraídas da simulação as velocidades nos trechos das trajetórias, a partir dos intervalos de tempo das trajetórias reais. Esta extração foi feita através do módulo PP, de maneira similar ao que foi feito para a obtenção das velocidades dos pontos de correntometria (etapa de calibração). Na Figura 9 está apresentada a comparação entre a trajetória real e a obtida no modelo numérico.

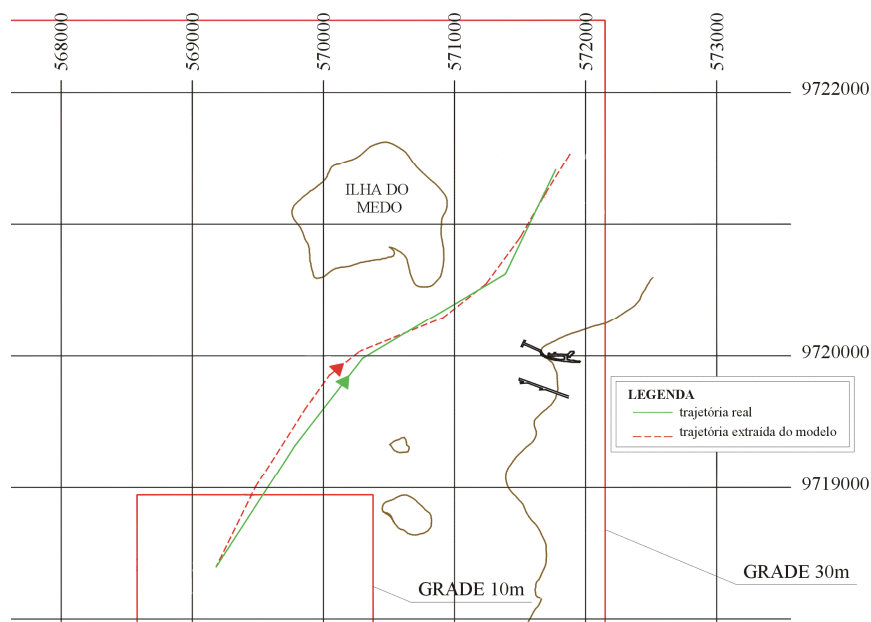


Figura 9 - Comparação entre a trajetória real e a obtida em modelo – dezembro de 1973

## 5 ESTUDO DE POSICIONAMENTO DO PÍER IV

Com o modelo calibrado, teve início o estudo de posicionamento e alinhamento do novo píer a ser implantado na região de estudo: o Píer IV. As análises partiram de estudos anteriores realizados em modelo físico (FCTH, 2006).

Para este estudo, além dos dados de entrada do modelo hidrodinâmico apresentados no item anterior, foi inserido, um arquivo contendo o estaqueamento do píer proposto para cada uma das alternativas ensaiadas. A seguir é feita uma breve descrição da preparação deste arquivo de entrada.

### 5.1 Conceituação Teórica

Normalmente as dimensões das estacas que compõe o píer são muito menores que o espaçamento usual das grades e, portanto, sua influência não é calculada diretamente pela grade computacional. Para que o efeito do estaqueamento possa ser sentido é necessário modelá-lo em uma subgrade de escala técnica. Sendo assim, ele é inserido no modelo hidrodinâmico como um arquivo de dados de resistência ao escoamento. Portanto, na saída gráfica não se visualiza o píer, mas sim o efeito do estaqueamento no escoamento d'água.

A resistência do fluxo provocada pela passagem d'água pelas estacas é modelada calculando a corrente induzida pela força de atrito em cada estaca e igualando-a a contribuição de tensão de cisalhamento compatível a formulação de momento do MIKE 21. Em outras palavras:

$$\tau_p \cdot \Delta x \cdot \Delta y = n \cdot F \quad [01]$$

onde:  $\tau_p$ : tensão de cisalhamento equivalente;

$\Delta x, \Delta y$ : espaçamento da grade;

$n$ : número de estacas localizadas em um ponto da grade (densidade de estacas);

$F$ : força de atrito (resistência ao escoamento) em uma estaca

A força de atrito  $F$  é obtida a partir de:

$$F = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_D \cdot B_e \cdot H_e \cdot v^2 \quad [02]$$

onde:  $C_D$ : coeficiente de atrito;

$\rho$ : densidade da água;

$B_e$ : largura efetiva da estaca;

$H_e$ : altura da estaca exposta a corrente;

$v$ : velocidade da corrente.

O arquivo do estaqueamento é preparado no módulo PP. Observando a Figura 10, que representa o formato do arquivo de estaqueamento, percebe-se que as linhas representam as várias estacas que compõe o píer enquanto as colunas, as características gerais das estacas.

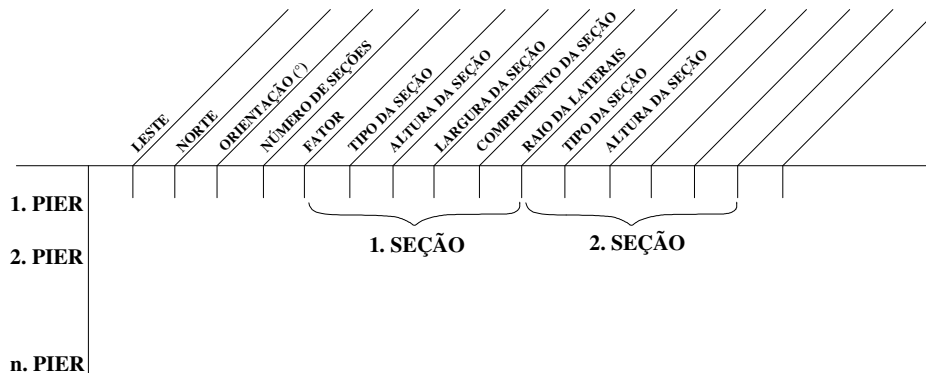


Figura 10 - Formato do arquivo de estaqueamento do Píer

Os parâmetros gerais colocados para caracterização das estacas são:

- posição da estaca (coordenadas norte e leste em UTM);
- ângulo da estaca em relação ao alinhamento norte – sul (orientação);
- número de seções geométricas da estaca (se a estaca apresentar variação de seção ao longo do comprimento);

- coeficiente de segurança que é multiplicado a resultante da força de atrito F total para aumentar a velocidade de corrente devido ao efeito provocado pelo de grupo das estacas. O valor usual é de 1,02;
- Tipo da seção da estaca: circular (tipo 0), retangular (tipo 1), elíptica (tipo 2);
- Altura, largura (ou apenas raio) da seção da estaca;
- Comprimento da estaca que está em contato com a corrente de água;
- Raios dos cantos das estacas (se estaca for retangular e apresentar arredondamento nos cantos).

## 5.2 Alternativas de Posicionamento do Píer

Em função do grande volume de sedimentos que transita pela região, já na fase conceitual do projeto, foi descartada a construção de novas obras de abrigo para o futuro píer, em virtude da constatação de que uma nova obra rígida, certamente impactaria os píeres existentes. Restou então, a opção de um píer desabrigado, mesmo com as fortes correntes que reinam na região.

Para viabilizar este píer, seria necessário que ele fosse disposto o mais alinhado possível com relação às correntes para minimizar os efeitos destas em relação à amarração do navio.

Outras questões tratadas, diziam respeito à distância do píer à costa, pois, quanto mais distante, menor a necessidade de dragagem e a influência da densidade de estacas nas correntes e consequentemente nos esforços de amarração.

Neste sentido, foram realizados ensaios de otimização, tanto da posição quanto da angulação do Píer IV, a partir de um arranjo provisório, para o qual foi adotado um Píer com as mesmas características do Píer III (dimensões e densidade de estacas) posicionado entre Espigão Norte e a Ilha do Medo) em dois locais diferentes, conforme apresentado na Figura 11.

Já na etapa de avaliação da posição, foi verificada a impossibilidade de adotar a alternativa localizada mais ao largo, pois as velocidades das correntes naquela posição se mostraram proibitivas.

Sendo assim, foram ensaiadas as alternativas de orientação de 10°, 12°, 15° e 17° apenas para a posição FCTH-2006, também denominada CVRD INTERNA, que foi a alternativa considerada no arranjo final.

Para analisar as alternativas propostas foram extraídas as intensidades e direções das correntes de 6 pontos localizados nas extremidades e no ponto médio longitudinal de duas embarcações atracadas simultaneamente no píer, conforme ilustrado na Figura 12.

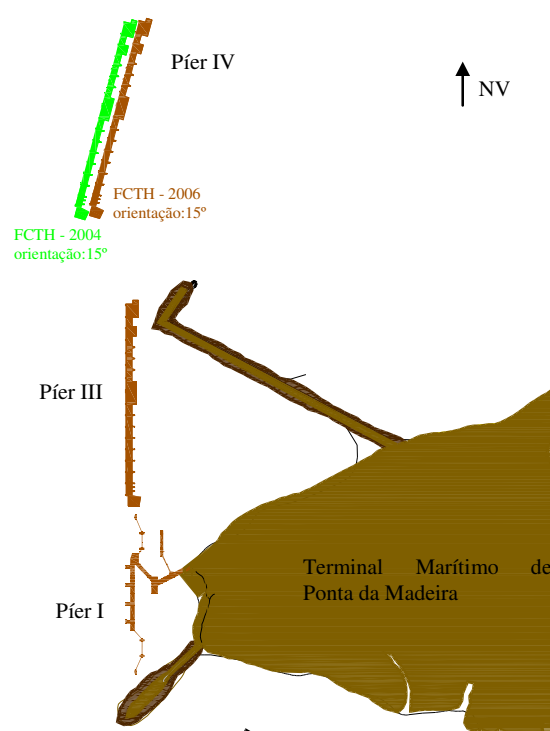


Figura 11 – Alternativas de localização do Píer IV

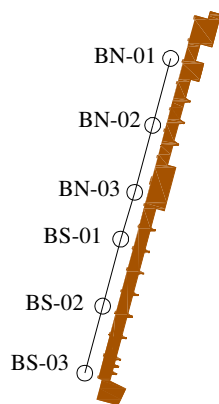


Figura 12 – Localização dos pontos de medição de velocidade

A nomenclatura dos pontos foi definida por:

BN1 – Extremidade Norte do Navio Atracado no Berço Norte

BN2 – Meio do Navio Atracado no Berço Norte

BN3 – Extremidade Sul do Navio Atracado no Berço Norte

BS1 – Extremidade Norte do Navio Atracado no Berço Sul

BS2 – Meio do Navio Atracado no Berço Sul

BS3 – Extremidade Sul do Navio Atracado no Berço Sul

A partir das simulações foram elaborados gráficos de intensidade e direção das correntes de maré em cada um dos pontos de análise. Além disso, foram avaliadas as variações da direção das

correntes em relação ao alinhamento do cais em torno das meias marés de enchente e vazante. A Figura 13 ilustra um dos resultados obtidos com todas as alternativas propostas.

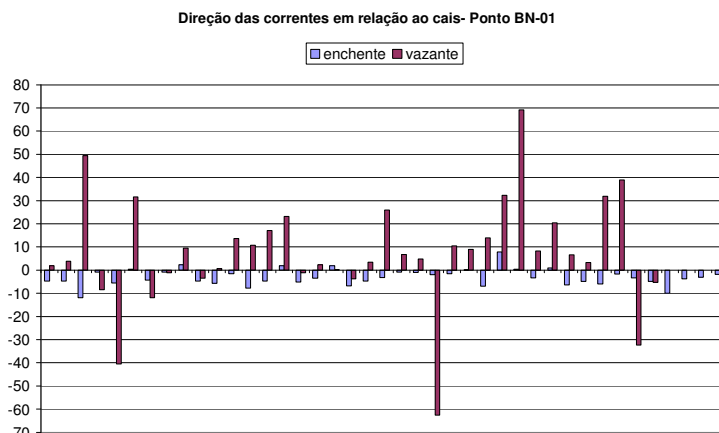


Figura 13 - Diferença de direção das correntes em relação ao cais - ponto BN-01 – alternativa FCTH 2006 – orientação 15°

A partir da análise de todos os gráficos obtidos para todas as alternativas estudadas foi possível concluir que a alternativa que apresentou melhores resultados, com as menores diferenças entre a direção do cais e a das correntes, foi a alternativa FCTH-2006 – orientação 15 graus.

Após a conclusão desta etapa do estudo a empresa encarregada de definir a geometria do Píer para a VALE forneceu o arranjo final, com novas dimensões e densidade de estaqueamento. Foi necessário fazer uma reavaliação dos resultados. Entretanto os resultados desta nova simulação apontaram para a mesma orientação como sendo a mais alinhada às correntes.

Finda a análise numérica, o píer foi confeccionado na escala do modelo (1:170), implantado com a orientação recomendada pelo estudo numérico e procede-se o estudo dos esforços nas amarrações para os navios atracados tanto no berço sul quanto norte do Píer (Figura 14).

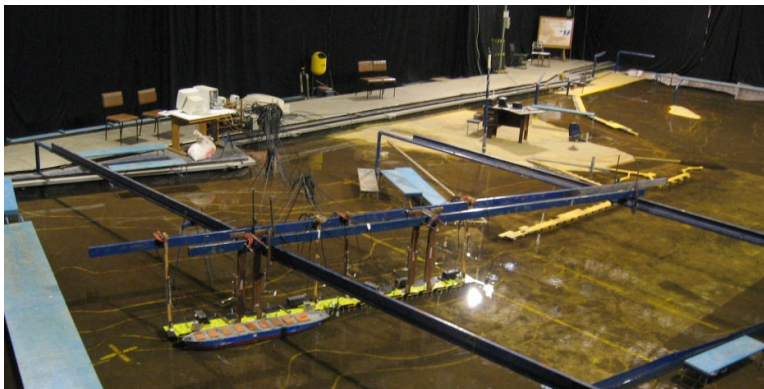


Figura 14 - Fotografia do ensaio de amarração feito no Píer IV

Os resultados dos estudos de esforços nos cabos de amarração dos navios, feitos no modelo físico comprovaram o bom alinhamento das correntes com o cais. Entretanto, este fato produziu um efeito indesejado de aumento dos esforços longitudinais nos cabos chamados “springs”, sendo que

os cabos que resistem ao movimento transversal da embarcação, os chamados “traveses” apresentavam solicitação bem abaixo das suportadas, principalmente no berço norte do píer.

Para corrigir este problema foram novamente feitos ensaios em modelo matemático e físico com o intuito de avaliar pequenas alterações de angulação do berço norte do píer poderiam levar a uma melhor distribuição nos esforços dos cabos de amarração sem aumentar significativamente o impacto da inserção do píer nas correntes locais.

Foram realizados novos ensaios no modelo físico variando de grau em grau o ângulo do berço norte entre 13° e 17° que estão apresentados na Tabela 1 e Figura 15.

Tabela 1. – Esforços máximos e médio nos cabos de amarração para as diferentes orientações do Píer IV – spring de vante

Ângulo (°)	Esforço Máximo (tf/cabo)	Esforço médio (tf/cabo)
13	80	78
14	74	73
15	90	85
16	87	77
17	98	81

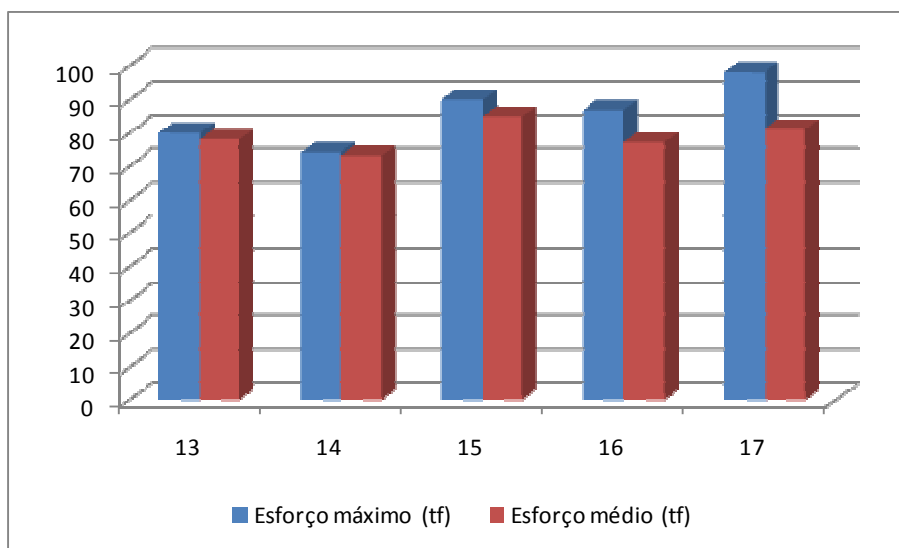


Figura 15 – Gráfico comparativo entre os esforços máximos e médios obtidos nos ensaios de amarração com diferentes orientações do Píer IV – spring de vante

Comparando-se os resultados verificou-se que o ângulo de 14° conseguiu-se reduzir a assimetria de esforços máximos entre enchente e vazante, fazendo, com que as amarrações de springs e traveses trabalhassem de forma mais efetiva, em termos de aproveitamento de restrição de movimento.

A partir deste resultado foi feita a simulação hidrodinâmica utilizando o modelo MIKE 21 – módulo HD – para validar o alinhamento definitivo do Píer IV, de maneira análoga à anteriormente apresentada. Na Figura 16 são apresentados os resultados em gráficos polares.



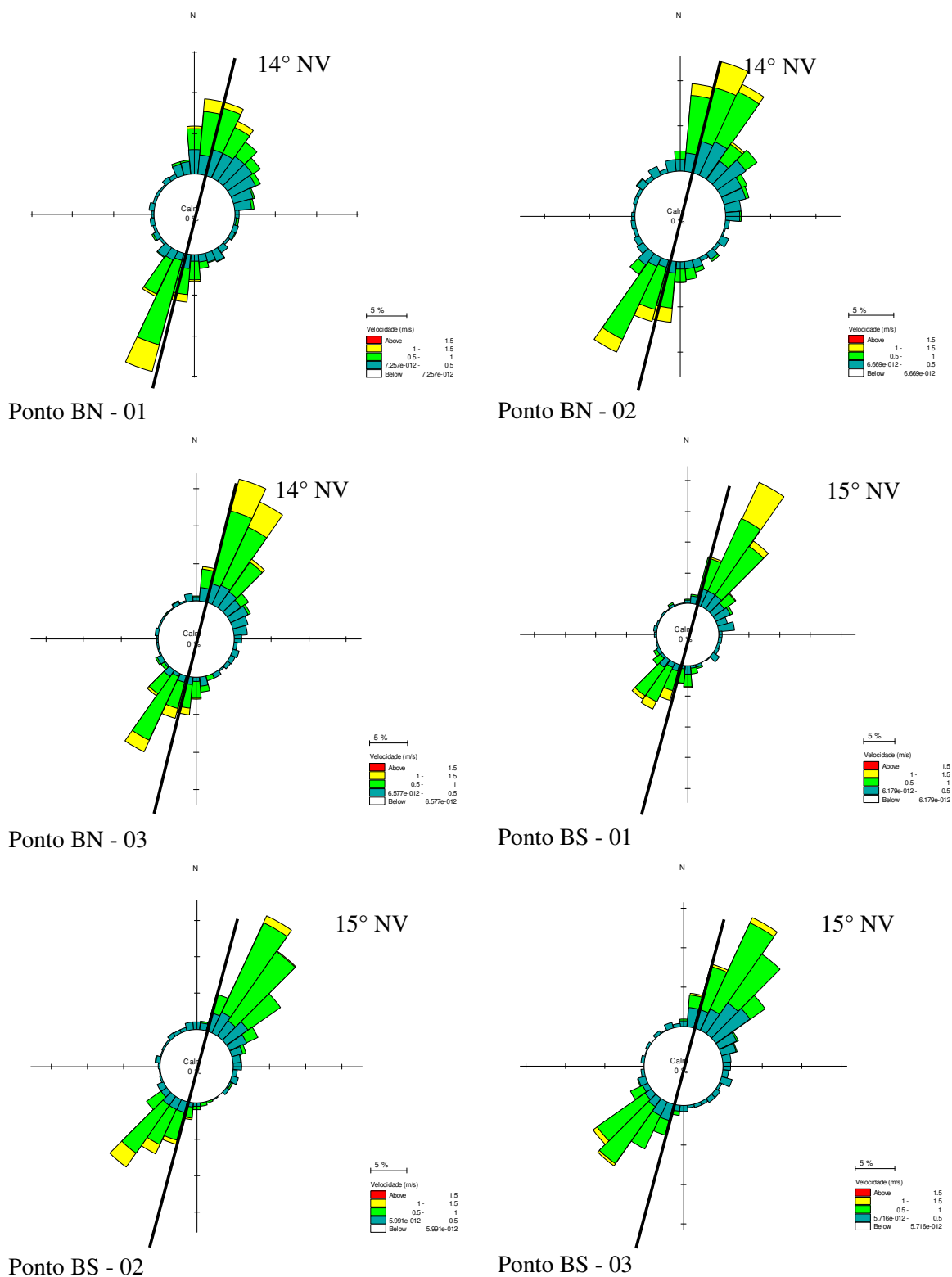


Figura 16 - Direções das correntes no alinhamento do Píer representadas em formato polar

A partir da análise de todos os gráficos foi possível concluir que a alternativa proposta apresenta valores médios de diferenças de direção das correntes em relação ao cais, tal como foram

observados em modelo físico. Porém, não se detectou grandes diferenças entre os valores obtidos com esta alternativa e aqueles relativos ao caso dos dois berços alinhados em 15° em relação ao NV.

Para avaliar a interferência do Píer IV na hidrodinâmica local foram extraídos cenários críticos onde as velocidades são mais expressivas, ou seja, nos instantes de meia-maré de enchente e vazante. Nas Figuras 17 e 18 são apresentados estes resultados.

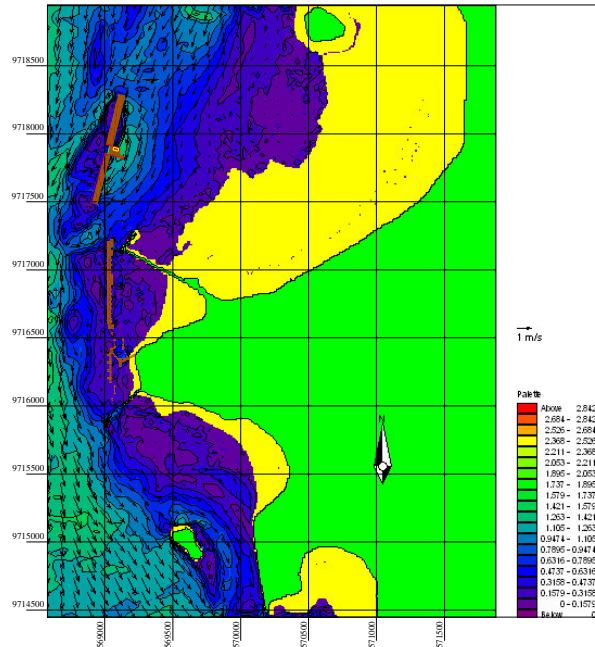


Figura 17 - Cenário hidrodinâmico para meia-maré de enchente de 5,6m de amplitude

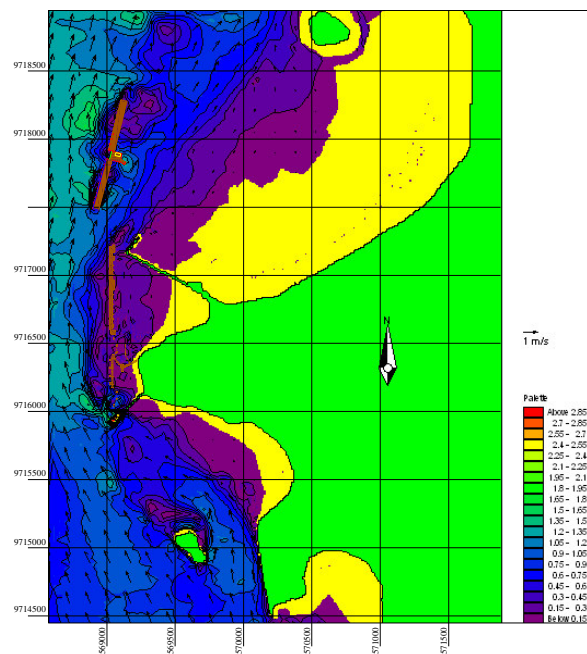


Figura 18 – Cenário para meia maré de vazante de 5,6m de amplitude

## 6 CONCLUSÃO

Os modelos numéricos são uma ferramenta importante para diagnóstico e solução de problemas de Engenharia, porém a falta de uma base de dados consistente dificulta a elaboração de um estudo mais detalhado. Desta forma, a escolha de região de estudo com um extenso registro de dados é primordial.

Por outro lado, a Área Portuária do Maranhão apresenta uma vasta base de dados decorrente de parceria de mais 30 anos entre o LHEPUSP e a VALE, tendo, portanto, as condições necessárias para um estudo em modelo numérico. Por conseguinte, ressalta-se que a análise detalhada das alterações sofridas na área ao longo do tempo, bem como a seleção e preparação da base de dados desta extensa série histórica foi fundamental para a evolução do trabalho.

Os resultados obtidos no modelo hidrodinâmico permitiram verificar a eficiência do modelo em representar as características recirculatórias na área do PDM. A análise dos estudos de calibração e validação do modelo hidrodinâmico realizadas até 2006 mostraram que a escolha do contorno da grade batimétrica mais externa (270m) potencializou a entrada de água por um veio principal, que se encontrava em posição perpendicular a linha de borda. Já o fluxo de água para o veio localizado inclinado à borda da grade, e que abastece a região do Canal do Boqueirão, foi subestimado. Este problema ocorria porque ambos os canais encontravam-se próximos à borda na qual o fluxo adentrava sempre na direção perpendicular. Isto justifica as maiores disparidades em relação ao real dos resultados obtidos nos pontos próximos à região e as maiores diferenças obtidas entre os valores de intensidade de correntes nas marés de enchente em relação à vazante.

A mudança do posicionamento do contorno aberto da grade de 270m promoveu significativas mudanças na circulação de correntes, tornando o modelo hidrodinâmico mais fiel à realidade observada na Baía de São Marcos. Com isso os valores de intensidades de correntes deficitários, principalmente em maré de enchente, foram corrigidos e a calibração foi concluída. A validação do modelo foi à constatação da eficiência do mesmo em caracterizar as direções das correntes, incluindo as formações dos vórtices nas proximidades do PDM.

A partir do modelo calibrado foi iniciado o estudo do posicionamento do Píer IV. Os resultados apontaram inicialmente que o alinhamento da linha de atracação do Píer IV que minimiza a obliquidade das correntes de maré com o mesmo, nas condições de enchente e vazante, é de 15° NV. Com a nova configuração do Píer proposta pela projetista, na qual os berços e a densidade do estaqueamento foram ampliados, os ensaios em modelo físico e numérico apontaram para correções no ângulo do Berço Norte do Píer IV, visando minimizar os esforços longitudinais produzidos pelo navio nos cabos de amarração. Sendo assim, foi sugerida a configuração do Píer IV com ângulo de 15° no Berço Sul e 14° no Berço Norte (em relação ao NV). Esta alternativa apresentou menores

valores de diferenças das correntes em relação ao cais, tanto em modelo físico como numérico e produziu menores esforços nos cabos de amarração.

Quanto à análise da influência do Píer IV na área aponta para alterações significativas das correntes locais com a introdução do mesmo, o que certamente influenciará tanto o Píer III quanto os futuros Píeres em estudo. Entretanto, não foram verificadas variações mensuráveis entre os impactos causados pela implantação do Píer IV com as orientações de 15° e 14° para o berço norte.

Por fim, este trabalho permitiu demonstrar como o emprego combinado da modelação numérica e física pode se constituir em uma ferramenta importante na otimização de arranjos de obras portuárias, reduzindo-se o empirismo nos projetos e operações dos portos nacionais.

## 7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

**Danish Hydraulic Institute Softwares** - *Módulos do software MIKE 21*.

**FCTH – Fundação Centro Tecnológico de Hidráulica** (2007). “*Estudos de Modelação Numérica Hidrodinâmica e Sedimentológica do Complexo Portuário do Maranhão*”. Relatório Final RF-02-1005-07. São Paulo.

\_- (2008). “*Estudo das condições de amarração do navio Berge Stahl no Berço Norte do Píer IV, com alinhamento de 13° NV, 14° NV, 15° NV, 16° NV e 17° NV na alternativa VALE INTERNA / PROMON A1-2007*”. Relatório Parcial RF-08-994-08. São Paulo.

**Garcia, P.D.** (2007). “*Caracterização Hidrossedimentológica das Correntes de Maré e do Transporte de Sedimentos associado à Área Portuária do Maranhão*”. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.

**Universidade de São Paulo – Laboratório de Hidráulica da Escola Politécnica** (1972-2007)– *Levantamentos hidrográficos referentes aos estudos da Área Portuária do Maranhão*. São Paulo.