



**Tanque de  
Provas Numérico**  
*Universidade de São Paulo*  
**TPN-USP**

Projeto

# Avaliação Náutica da Operação de Navios de Cruzeiros em Vitória/ES

RT3 –Estudo de Fundeio e Movimentos para Navios de Passageiros



GOVERNO DO ESTADO  
DO ESPÍRITO SANTO  
*Secretaria de Turismo*

Fevereiro 2024





Escola Politécnica da Universidade de São Paulo



Universidade de São Paulo



**Tanque de Provas Numérico**  
Universidade de São Paulo  
TPN-USP

PROJETO						
Estudo de Fundeio e Movimentos para Navios de Passageiros Ancorados no Porto de Vitória/ES						
	CÓDIGO DO RELATÓRIO		TÍTULO DO RELATÓRIO			
	RT3		RT3 – Avaliação de Fundeio e Disponibilidade			
CLIENTE	COORDENADOR CLIENTE		COORDENADOR TPN			
 GOVERNO DO ESTADO DO ESPÍRITO SANTO Secretaria de Turismo			Prof. Dr. Eduardo Aoun Tannuri			
	EQUIPE					
Prof. Dr. Daniel Vieira						
	ORIGINAL	REVISÃO A	REVISÃO B	REVISÃO C	REVISÃO D	REVISÃO E
DATA	16/01/2024	09/02/2024				
EXECUÇÃO	DPV	DPV				
VERIFICAÇÃO	EAT	EAT				
APROVAÇÃO	EAT					

## Sumário

1	Introdução .....	4
2	Condições ambientais .....	5
2.1	Vento.....	5
2.2	Corrente.....	6
2.3	Onda.....	6
3	Embarcações Adotadas no Estudo .....	7
4	Metodologia .....	8
4.1	Forças ambientais .....	8
4.1.1	Vento .....	8
4.1.2	Corrente.....	9
4.1.3	Deriva média de ondas.....	9
4.2	Ângulo de Aproamento.....	10
4.3	Avaliação da operação de transbordo.....	11
4.4	Critérios Adotados .....	14
5	Resultados .....	15
5.1	Costa Diadema .....	15
5.2	MSC Fantasia.....	17
6	Conclusão .....	19
7	Bibliografia .....	20
8	Anexo – Avaliação de Folga Sob A Quilha .....	21
8.1	Modelo Conceitual.....	21
8.2	Modelo Detalhado .....	22

# 1 Introdução

O presente estudo tem por objetivo a verificação da disponibilidade das operações de fundeio e de transbordo de passageiros de navios de cruzeiro ancorados na área de fundeio do Porto de Vitória / ES (Figura 1).



Figura 1 – Área de fundeio para transbordo de passageiro – Vitória/ES

O estudo compreende a avaliação de dois navios de passageiros um com 306 metros de comprimento e capacidade de transportar 4950 passageiros e outro com comprimento de 333m e capacidade de transportar 4360 passageiros.

Na condição de fundeio, serão avaliados os ângulos de aproamento resultantes da incidência simultânea de vento, corrente e onda. Nesta posição, denominada “weathervane”, é verificado se existe no bordo favorável uma sombra de onda em que seja possível realizar o transbordo de passageiros do navio para tenders ou escunas (Figura 11).

Caso a elevação de onda seja maior que o limite estipulado, verifica-se se existe um aproamento que forneça a sombra necessária de modo que os navios buscassem esse ângulo utilizando o sistema de posicionamento dinâmico.

Os casos em que não existe um aproamento que satisfaça as condições de sombra são definidos como *Downtime*.

## 2 Condições ambientais

Para a presente análise foram considerados 1 ano de condições ambientais simultâneas, considerando vento, corrente e onda medidas de hora em hora. Neste capítulo é apresentada a base de dados adotadas considerando as modelagens apresentadas em [1] e [2].

### 2.1 Vento

A Figura 1 apresenta o histograma direcional de intensidades de vento (médios de 1h) na localidade do estudo. Nota-se que os ventos no local são provenientes principalmente das direções Norte e Nordeste. Também são observados vetos de grande intensidade vindos da direção sudoeste. O maior vento médio de 1h observado na série é de 27 nós, sendo a maior rajada de 30s de 37nós. A Figura 3 mostra a série temporal de vento médio e rajada na localidade.

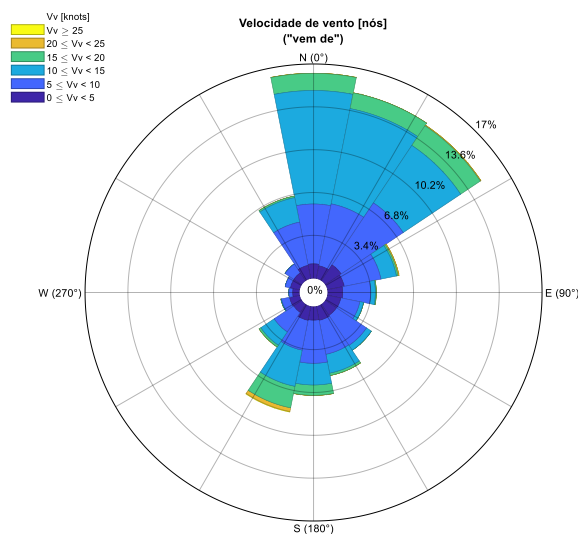


Figura 2 - Histograma direcional de intensidade de ventos.

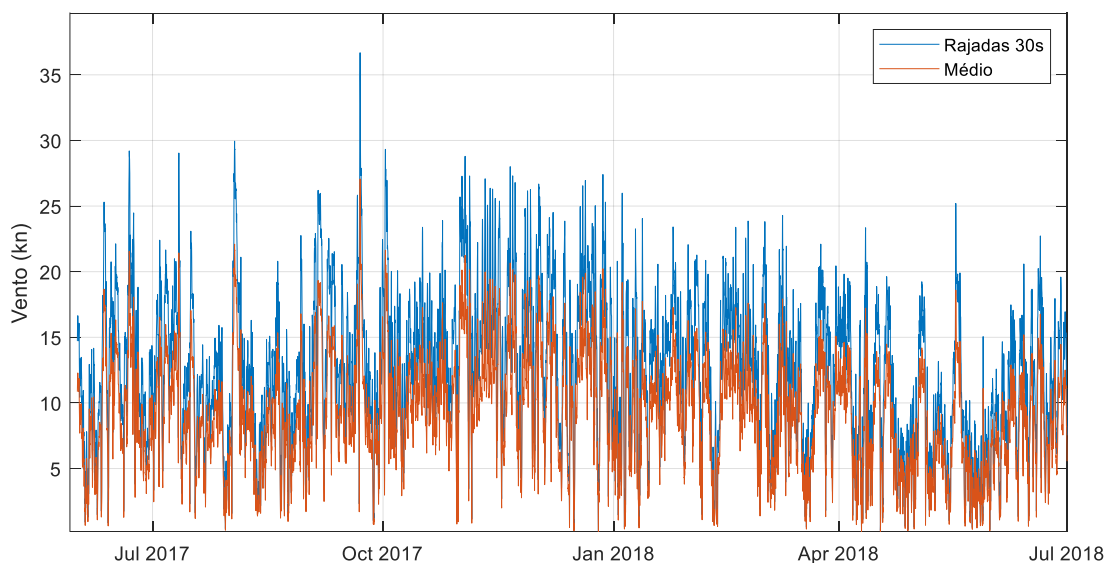


Figura 3 – Vento no ano considerado (médio e rajada de 30s).

## 2.2 Corrente

A figura a seguir apresenta o histograma direcional de intensidades de corrente na localidade do estudo. As correntes preferenciais na região são de vazante indo para Sudeste com intensidades bem baixas. A corrente média no local é de 0,15 nós e corrente máxima é de 0,7 nós.

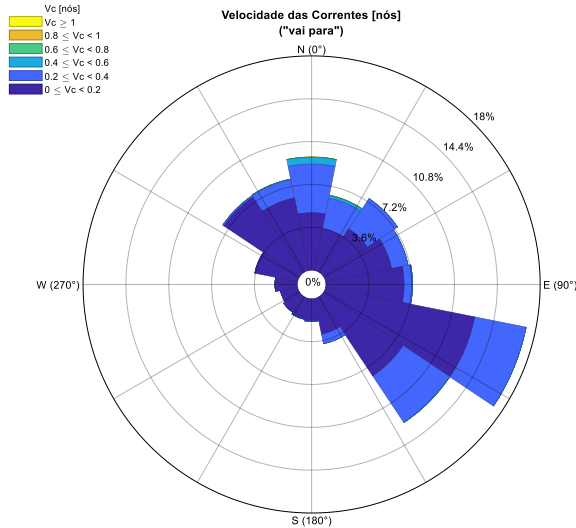


Figura 4 - Histograma direcional de intensidade de corrente.

## 2.3 Onda

A figura a seguir apresenta o histograma direcional de altura significativa de onda o período de pico de onda na região. São observadas ondas vindas principalmente das direções leste e sudeste. A altura significativa média é de 1,1 metros e o valor máximo observado foi de 2,2 m. O período de pico médio é de 9,7 segundos.

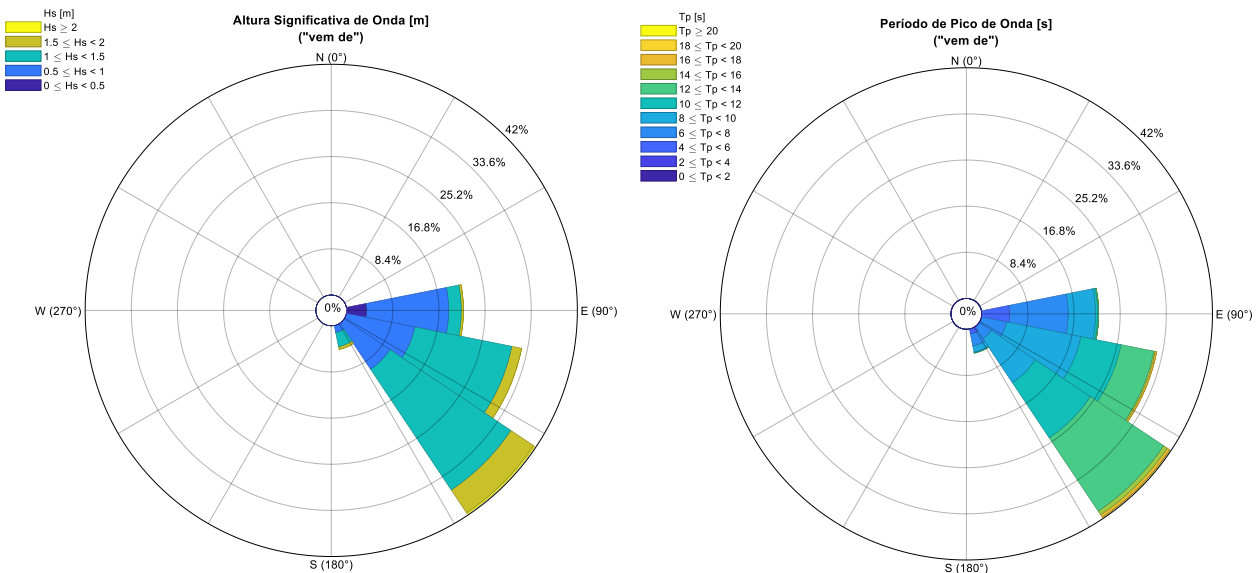


Figura 5 - Histograma direcional de altura significativa de onda (esq.) e período de pico (dir.)

### 3 Embarcações Adotadas no Estudo

No presente estudo foram adotados dois navios de passageiros, cujas propriedades necessárias para a modelagem do presente estudo estão apresentadas na Tabela 1. Na Figura 6 e na Figura 7 estão apresentadas imagens das embarcações estudadas.

Tabela 1 - Propriedades das embarcações consideradas no presente estudo.

# Modelo	1	2
Nome	Costa Diadema	MSC Fantasia
LOA [m]	305.7	333.0
LPP [m]	269.1	296.0
B [m]	37.20	38.00
D [m]	19.80	22.00
T [m]	8.50	8.45
M [t]	66847	72135
Ixx [t.m <sup>2</sup> ]	1.13E+07	1.28E+07
Iyy [t.m <sup>2</sup> ]	3.90E+08	5.00E+08
Izz [t.m <sup>2</sup> ]	4.02E+08	5.13E+08
KG [m]	15.0	15.00
GMt [m]	5.4	5.80
GMI [m]	872.10	956.20
A. vél. Frontal [m <sup>2</sup> ]	2202	2262
A. vél. Lateral [m <sup>2</sup> ]	11937	14345



Figura 6 - Navio #1 (Costa Diadema).



Figura 7 - Navio #2 (MSC Fantasia).

## 4 Metodologia

### 4.1 Forças ambientais

A seguir, são apresentadas as formulações adotadas para a avaliação das forças ambientais que agem no sistema. Para a presente análise foram consideradas forças de vento, correnteza e deriva de ondas. É importante salientar que para este estudo os ângulos de direção de vento, correnteza e onda foram adotadas conforme a Figura 8.

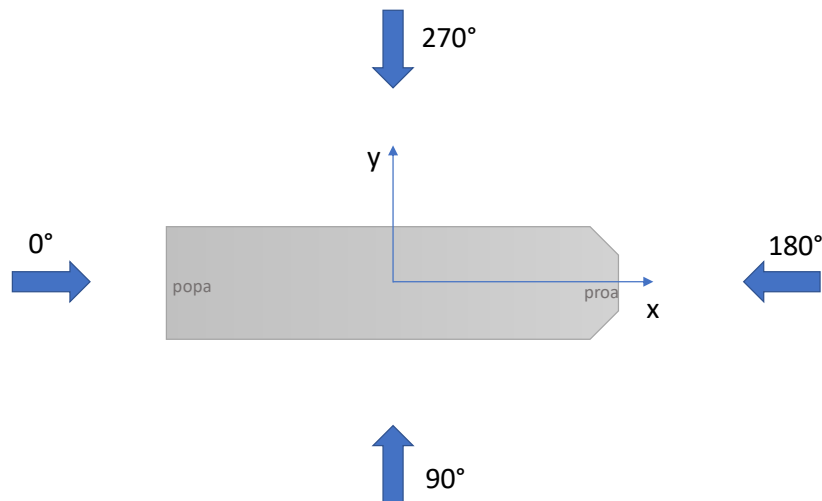


Figura 8 – Definição dos ângulos de incidência de vento, onda e corrente.

#### 4.1.1 Vento

As forças e momentos de vento foram calculadas de acordo com o recomendado pela OCIMF [3], as formulações adotadas foram:

$$Fv_x = 0,5 \cdot \rho_{ar} \cdot Af \cdot Cv_x \cdot U^2 \quad \text{Eq. 4.1}$$

$$Fv_y = 0,5 \cdot \rho_{ar} \cdot Al \cdot Cv_y \cdot U^2 \quad \text{Eq. 4.2}$$

$$Mv_z = 0,5 \cdot \rho_{ar} \cdot Al \cdot L \cdot Cv_{xy} \cdot U^2 \quad \text{Eq. 4.3}$$

Onde  $Fv_x$  e  $Fv_y$  são as forças de vento longitudinais e transversais, respectivamente, e  $Mv_z$  é o momento de vento em relação ao eixo z (vertical). As áreas frontais ( $Af$ ) e laterais ( $Al$ ) são apresentadas na seção 2 e a densidade do ar foi adotada como  $\rho_{ar} = 1,23 \text{ kg/m}^3$ .  $U$  é a velocidade do vento em m/s.

Os coeficientes  $Cv_x$ ,  $Cv_y$  e  $Cv_{xy}$  são obtidos a partir das curvas fornecidas pela OCIMF [3] para navios-tanque.



### 4.1.2 Corrente

A forças e momentos de corrente foram calculadas de acordo com o recomendado pela OCIMF [3], as formulações adotadas foram:

$$Fc_x = 0,5 \cdot \rho \cdot L \cdot T \cdot Cd_x \cdot U^2 \quad \text{Eq. 4.4}$$

$$Fc_y = 0,5 \cdot \rho \cdot L \cdot T \cdot Cd_y \cdot U^2 \quad \text{Eq. 4.5}$$

$$Mc_z = 0,5 \cdot \rho \cdot L^2 \cdot T \cdot Cd_{xy} \cdot U^2 \quad \text{Eq. 4.6}$$

Onde  $Fc_x$  e  $Fc_y$  são as forças de vento longitudinais e transversais, respectivamente, e  $Mc_z$  é o momento de vento em relação ao eixo z (vertical).  $L$  e  $T$  são o comprimento entre perpendiculares e o calado, em metros respectivamente. A densidade da água salgada foi adotada como  $\rho = 1025 \text{ kg/m}^3$ .  $U$  é a velocidade da corrente em m/s.

Os coeficientes  $Cd_x$ ,  $Cd_y$  e  $Cd_{xy}$  são obtidos a partir das curvas apresentada sugeridas pela OCIMF [3].

### 4.1.3 Deriva média de ondas

As forças e momentos de deriva média para um determinado espectro de onda são dados por:

$$\begin{bmatrix} F_{DM} \\ M_{DM} \end{bmatrix} = 2 \int_0^{\infty} S(\omega) D_o(\omega, \alpha_0) d\omega \quad \text{Eq. 4.7}$$

Onde:

- $S(\omega)$  representa o espectro<sup>1</sup> de energia das ondas,
- $D_o(\omega, \alpha_0)$  representa as forças de deriva média e coeficientes dos momentos definidos pela função de transferência quadrática.

Os coeficientes de  $D_o$  são calculados numericamente utilizando o *software* WAMIT [4] que adota a teoria linear potencial de ondas [5].

Para o modelo numérico do WAMIT são necessários:

- Malha da superfície molhada de cada navio a ser avaliado
- Matriz de massa e inércia
- Vetor de períodos de onda a ser avaliado
- Vetor de ângulos de incidência de onda a ser avaliado

<sup>1</sup> Para a presente análise, foi considerado o espectro TMA [Erro! Fonte de referência não encontrada.], que representa b em as ondas em profundidades rasas.

A Figura 9 apresenta as malhas das superfícies molhadas das embarcações adotadas para a avaliação das forças de deriva.

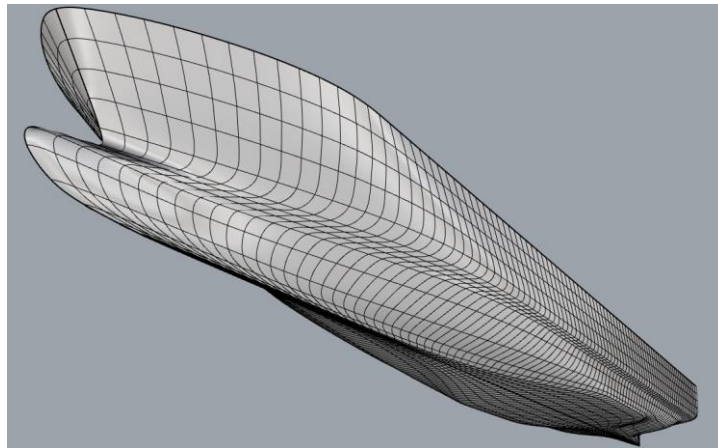


Figura 9 – Exemplo de malha utilizada para avaliação dos coeficientes de deriva do modelo.

## 4.2 Ângulo de Aproamento

A Figura 10 apresenta a nomenclatura adotada na formulação de cálculo do ângulo de aproamento. Os parâmetros apresentados nessa figura são:

- $F_x$  – Força resultante ambiental na direção x da embarcação
- $F_y$  – Força resultante ambiental na direção y da embarcação
- $M_z$  – Momento resultante ambiental na direção z da embarcação
- $P$  – Ponto de conexão da amarra com a embarcação
- $\theta_h$  – Ângulo do plano da amarra em relação ao eixo x local da embarcação
- $F_{amarra}$  – Força horizontal na amarra

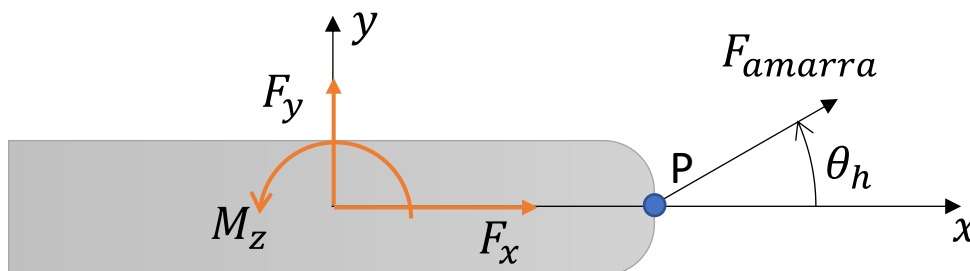


Figura 10 – Nomenclatura adotada na formulação para cálculo da força na amarra.

As forças ambientais (vento, corrente, onda) são calculadas para uma volta completa (0 a 360°) nas embarcações. Para encontrar o ângulo de equilíbrio é preciso atender a duas condições de equilíbrio:

- **Condição de Equilíbrio 1:**

Somatório dos momentos em relação ao ponto P deve ser igual a zero:

$$\sum M_P = 0 \quad \text{Eq. 4.8}$$

$$M_z - \frac{L}{2} F_y = 0 \quad \text{Eq. 4.9}$$

- **Condição de Equilíbrio 2:**

Como a força na amarra tem uma componente obrigatória na direção de x positivo, para garantir o equilíbrio é necessário que o somatório das forças ambientais na direção x seja negativo:

$$F_x < 0 \quad \text{Eq. 4.10}$$

Garantindo as duas condições acima, a força na amarra é calculada por:

$$F_h = \sqrt{F_x^2 + F_y^2} \quad \text{Eq. 4.11}$$

E o ângulo do plano da amarra com o eixo x da embarcação é dado por:

$$\theta_h = \arctan\left(\frac{F_y}{F_x}\right) \quad \text{Eq. 4.12}$$

O ângulo de aproamento do navio é testado iterativamente até encontrar um ou mais valores em que as condições de equilíbrio sejam satisfeitas.

### 4.3 Avaliação da operação de transbordo

Na presente análise, o desembarque de passageiros no porto de Vitória é realizado através de embarcações menores como tenders ou escuna. Essas embarcações aproximam-se da lateral do navio de cruzeiro pelo bordo protegido das ondas e ficam próximas às portas de acesso.



Figura 11 - Exemplo de operação de transferência de passageiros utilizando tenders.

O campo de ondas é modificado pela presença do corpo flutuante através de dois fenômenos: a difração e a radiação. A difração é a modificação do campo devido a presença do corpo como se ele estivesse fixo naquele ponto e a radiação é a onda gerada pelo movimento da embarcação nos seis graus de liberdade.

A Figura 12 apresenta um exemplo de avaliação do campo de ondas modificado pela presença de um navio. Chamamos de bordo desprotegido o lado pelo qual a onda incide na embarcação e chamamos de bordo protegido o lado oposto. Geralmente no bordo desprotegido temos um efeito de acúmulo da onda e as

elevações são maiores que a elevação ao longe. Já no bordo protegido temos uma região de “sombra” em que as elevações são bem menores que as medidas ao longe.

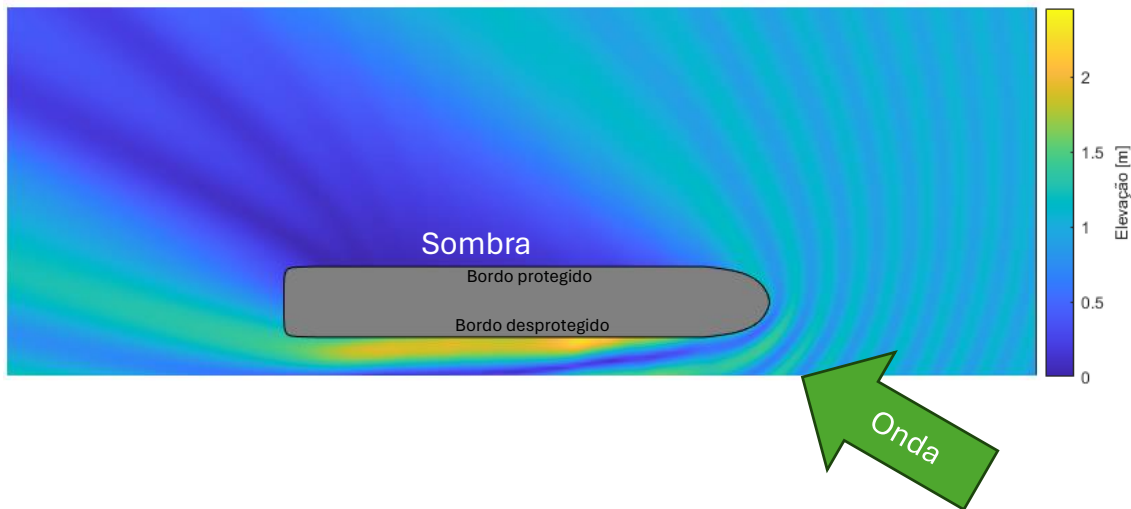


Figura 12 – Exemplo de avaliação do campo modificado de elevações da superfície livre devido a presença do navio para uma onda de 1m de altura.

Existem geralmente duas portas de embarque em cada bordo, uma localizada a vante e outra a ré. Utilizou-se um modelo numérico no software WAMIT [4] para avaliar a elevação da onda na região de embarque e desembarque dos *tenders* definida por alguns pontos conforme apresentado na Figura 13.

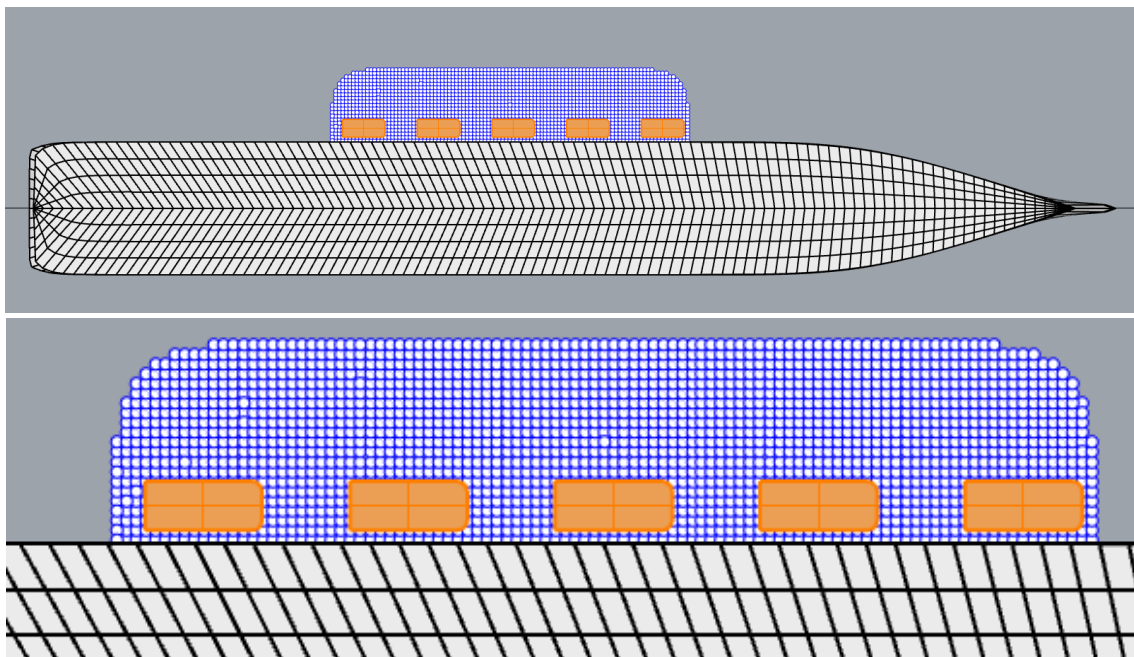


Figura 13 – Pontos de avaliação da elevação de onda na região de operação dos tenders.

Após a avaliação da elevação média nesses pontos chegou-se a um setor apresentado na Figura 14 em que a sombra na região de operação dos tenders é maximizada para diversos períodos de onda<sup>2</sup>.

<sup>2</sup> Nota-se que o setor “ótimo” não compreende ondas incidindo de través, pois mesmo ocorrendo difração máxima, existe um movimento elevado do navio, principalmente em *roll*, o que resulta em ondas geradas pelo movimento (ondas irradiadas).

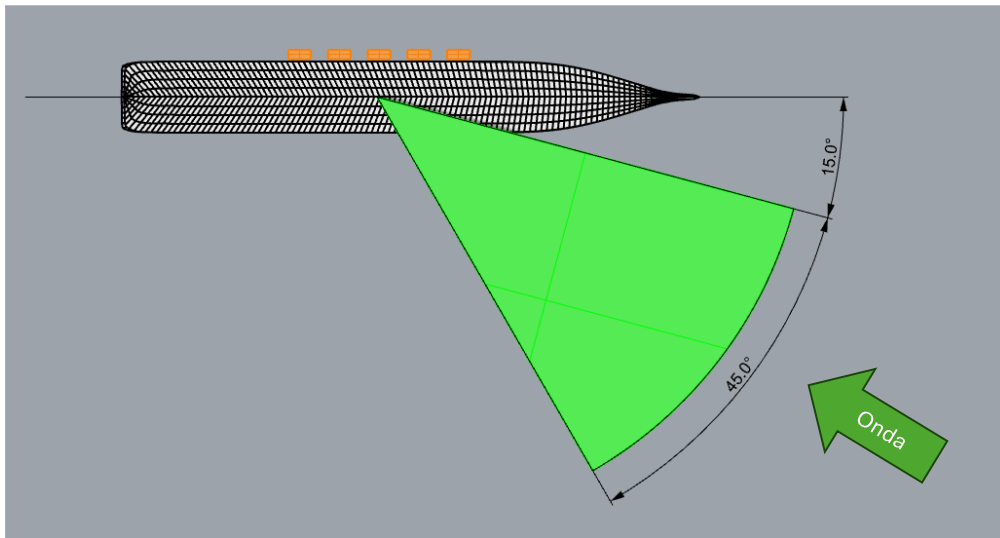


Figura 14 - Setor de incidência de onda que otimiza a região de sombra para operação com os tenders.

Para os casos em que a onda no bordo protegido é maior do que o limite aceitável propõe-se a utilização dos *thrusters* do navio de forma a girar a embarcação e encontrar um aproamento para o qual a onda incida pelo setor ótimo, reduzindo assim as elevações na área de operação do tender.

Na figura abaixo temos um exemplo em que a onda está incidindo por boreste, porém em um ângulo desfavorável. Ao rotacionar a embarcação em 37° a onda incide pelo setor definido e a elevação na região de operação do tender fica abaixo do limite estipulado.

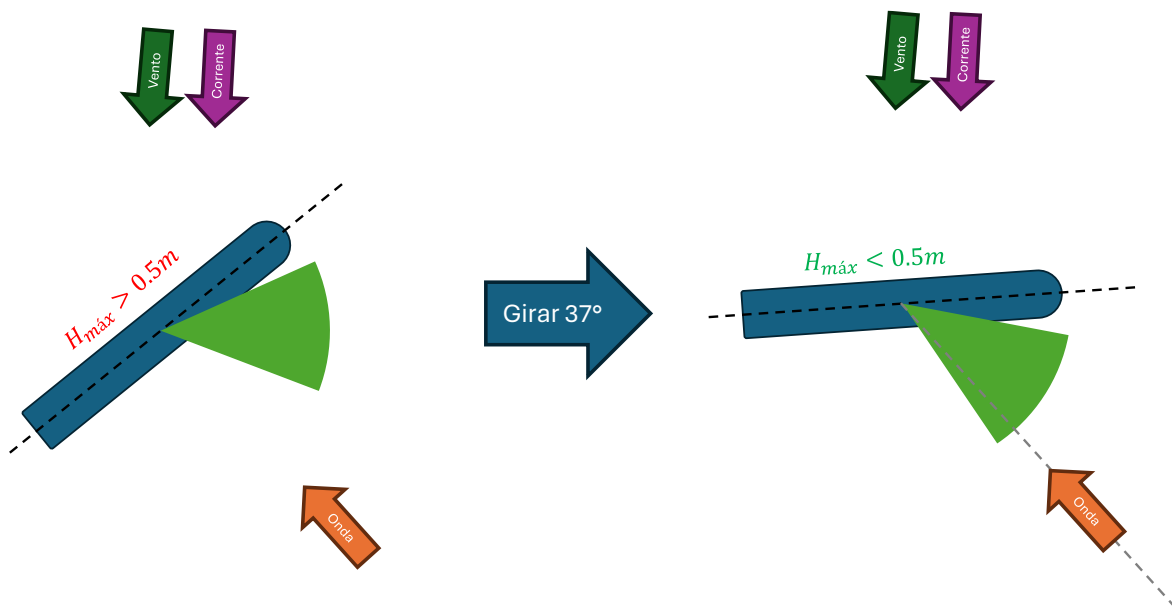


Figura 15 - Exemplo de operação com *thruster* para ajustar o aproamento à região de sombra que atende ao limite da operação.

#### 4.4 Critérios Adotados

Os critérios adotados apresentados nessa seção foram compilados a partir de questionamentos com os capitães

- Operação com tender
  - Elevação máxima de onda de 0,5m na área de operação do tender
  - Operação com *thruster*
    - Vento máximo 26 nós (Rajada de 30s)
    - Giro máximo da embarcação  $\pm 45^\circ$
- Operação de fundeio
  - Altura significativa de onda menor que 2,0 m
  - Vento máximo de rajada de 26 nós (Rajada de 30s)

## 5 Resultados

Nesta seção são apresentados os resultados referentes a simulação dos navios de Cruzeiro sobe incidência às condições ambientais apresentadas. Para cada navio serão apresentados os resultados de ângulo de aproamento, ângulo relativo que o *thruster* deve prover para gerar a sombra necessária e a disponibilidade mensal para a operação de transbordo de passageiros utilizando os *tenders*.

### 5.1 Costa Diadema

A Figura 16 apresenta o histograma direcional de aproamentos “weathervane” obtidos a partir da simulação do navio Costa Diadema. Observa-se que a embarcação na maioria das vezes fica aproada entre as direções Nordeste, Leste e Sudeste.

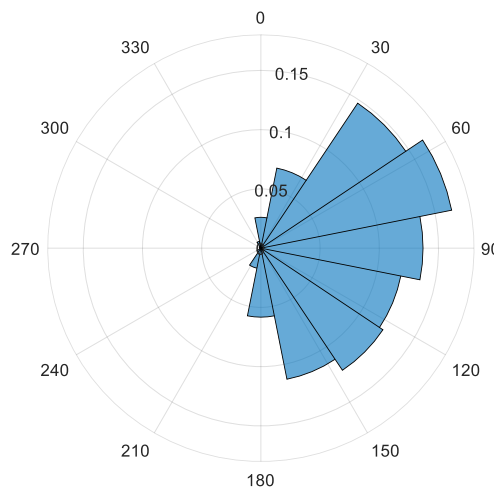


Figura 16 - Resultados de aproamento "Weathervane" – Costa Diadema.

A Figura 17 apresenta a distribuição dos ângulos de correção do aproamento para os casos em que foi necessário a utilização dos thrusters. As linhas vermelhas demarcam o limite adotado de  $\pm 45^\circ$ . Para os casos em que é necessário rotacionar a embarcação mais do que  $45^\circ$  define-se que não é possível prover a sombra necessária.

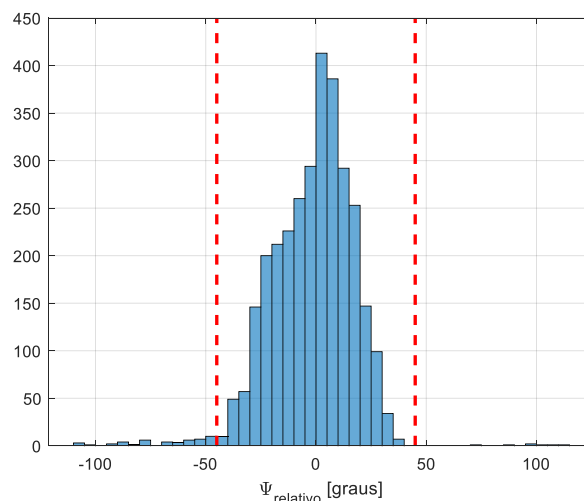


Figura 17 - Distribuição do ângulo relativo que o navio deve girar para ajustar a incidência de onda – Costa Diadema.

A partir dos limites definidos na Seção 4.4, foi possível definir as disponibilidades mensais para o desembarque de passageiros utilizando os *tenders*/escunas conforme apresentado na Figura 18. Os valores em azul correspondem àqueles em que é possível realizar a operação diretamente no aproamento resultante das condições ambientais (*weathervane*). Os valores em vermelho correspondem a porcentagem de condições ambientais para as quais é necessário a utilização dos *thrusters* para rotacionar a embarcação e prover a sombra de onda adequada.

**Considerado todo o período do dia:** A maior disponibilidade ocorre no mês de março nos quais é possível realizar o desembarque ou embarque em 97,2% do tempo. Já o mês de maio é o mês com menor disponibilidade para o qual só é possível realizar a operação em 42,2% do tempo. Considerando o ano inteiro, a operação possui uma disponibilidade de 79,0%. Já para os meses da temporada (outubro a maio) a disponibilidade da operação é 81,9%.

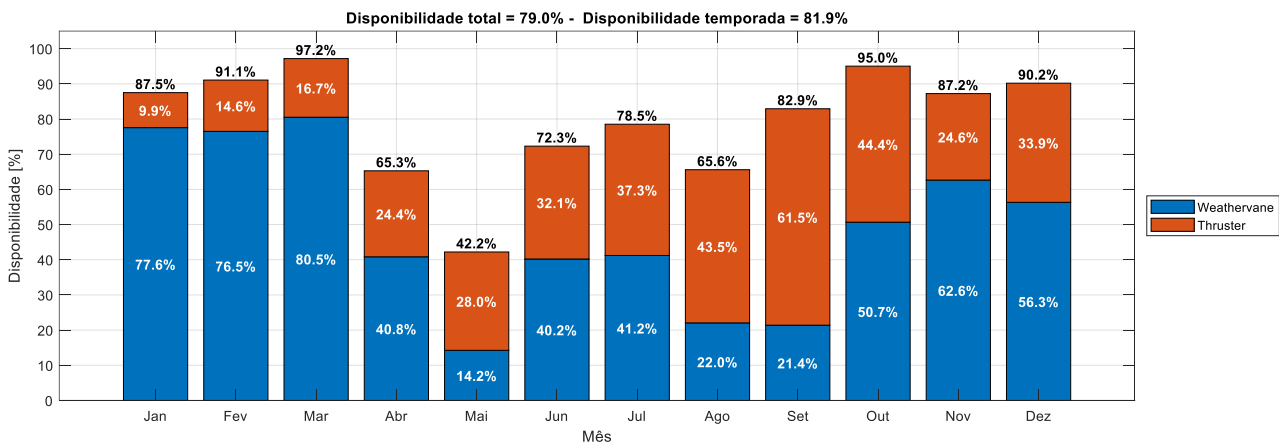


Figura 18 - Resultados de Disponibilidade Mensal para operação do Costa Diadema (dia inteiro).

**Considerando apenas o período diurno (das 6h às 18h):** A maior disponibilidade ocorre no mês de março nos quais é possível realizar o desembarque ou embarque em 98,0% do tempo. Já o mês de maio é o mês com menor disponibilidade para o qual só é possível realizar a operação em 42,2% do tempo. Considerando o ano inteiro, a operação possui uma disponibilidade de 78,8%. Já para os meses da temporada (outubro a maio) a disponibilidade da operação é 81,0%.

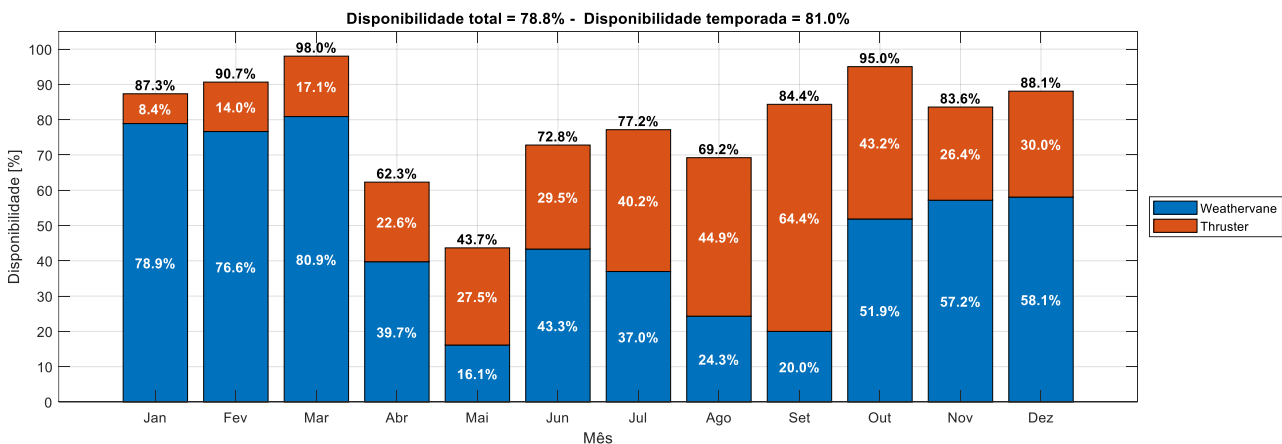


Figura 19 - Resultados de Disponibilidade Mensal para operação do Costa Diadema (apenas período diurno).



## 5.2 MSC Fantasia

A Figura 20 apresenta o histograma direcional de aproamentos “weathervane” obtidos a partir da simulação do navio MSC Fantasia. Observa-se que a embarcação na maioria das vezes fica aproada entre as direções Nordeste, Leste e Sudeste. Os resultados foram muito parecidos com o navio menor, conforme o esperado.

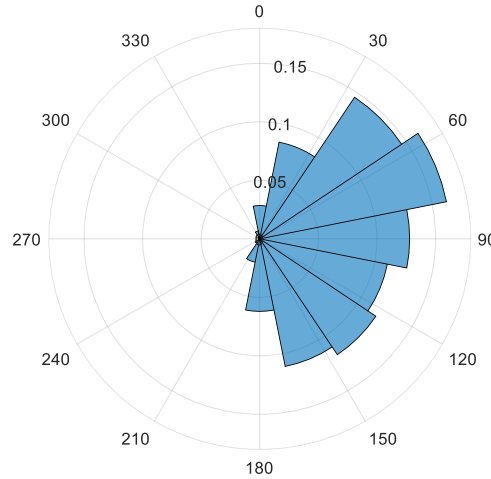


Figura 20 - Resultados de aproamento "Weathervane" – MSC Fantasia.

A Figura 21 apresenta a distribuição dos ângulos de correção do aproamento para os casos em que foi necessário a utilização dos *thrusters*. As linhas vermelhas demarcam o limite adotado de  $\pm 45^\circ$ . Para os casos em que é necessário rotacionar a embarcação mais do que  $45^\circ$  define-se que não é possível prover a sombra necessária.

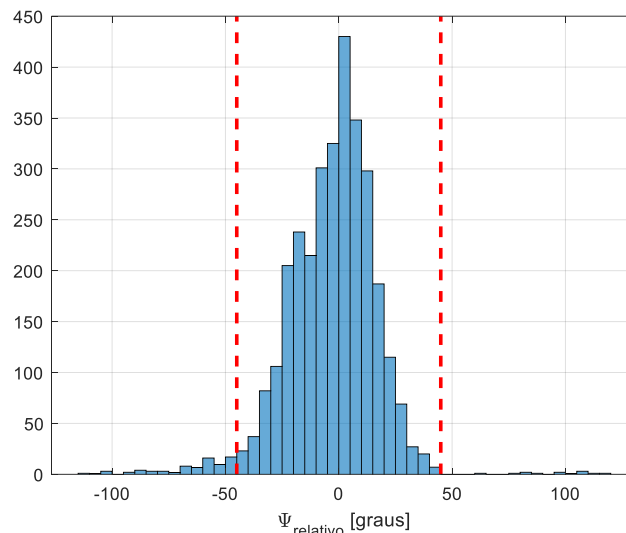


Figura 21 - Distribuição do ângulo relativo que o navio deve girar para ajustar a incidência de onda – MSC Fantasia.

A partir dos limites definidos na Seção 0, foi possível definir as disponibilidades mensais para o desembarque de passageiros utilizando os *tenders*/escunas conforme apresentado na Figura 20. Os valores em azul correspondem àqueles em que é possível realizar a operação diretamente no aproamento resultante das condições ambientais (*weathervane*). Os valores em vermelho correspondem a porcentagem de condições ambientais para as quais é necessário a utilização dos *thrusters* para rotacionar a embarcação e prover a sombra de onda adequada.

**Considerado todo o período do dia:** A maior disponibilidade ocorre no mês de março para o qual é possível realizar o desembarque ou embarque em 98,1% do tempo. Já o mês de maio é o mês com menor disponibilidade para o qual só é possível realizar a operação em 52,4% do tempo. Considerando o ano inteiro, a operação possui uma disponibilidade de 82,1%. Já para os meses da temporada (outubro a maio) a disponibilidade da operação é 84,4%.

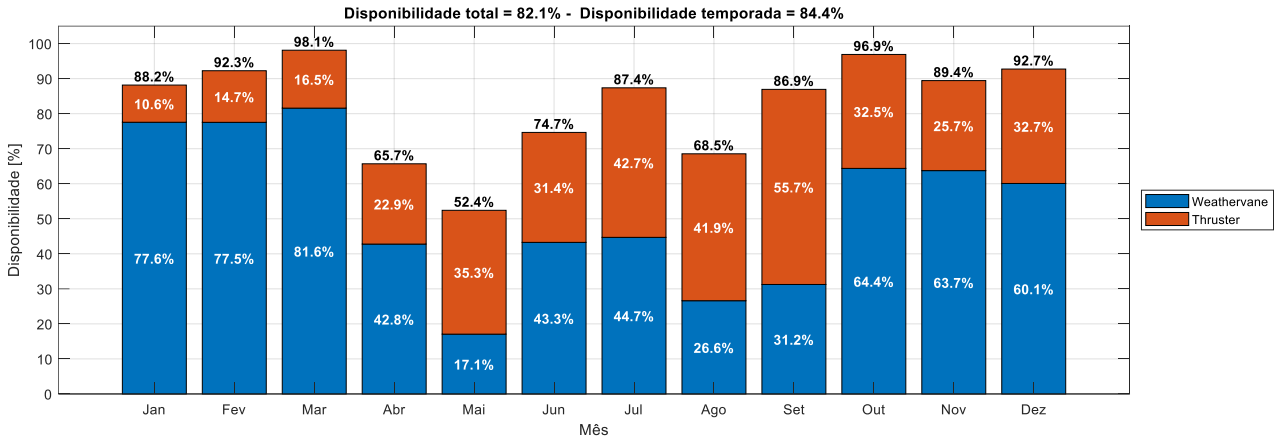


Figura 22 - Resultados de Disponibilidade Mensal para operação do MSC Fantasia.

**Considerando apenas o período diurno (das 6h às 18h):** A maior disponibilidade ocorre no mês de março para o qual é possível realizar o desembarque ou embarque em 98,3% do tempo. Já o mês de maio é o mês com menor disponibilidade para o qual só é possível realizar a operação em 52,6% do tempo. Considerando o ano inteiro, a operação possui uma disponibilidade de 81,8%. Já para os meses da temporada (outubro a maio) a disponibilidade da operação é 83,6%.

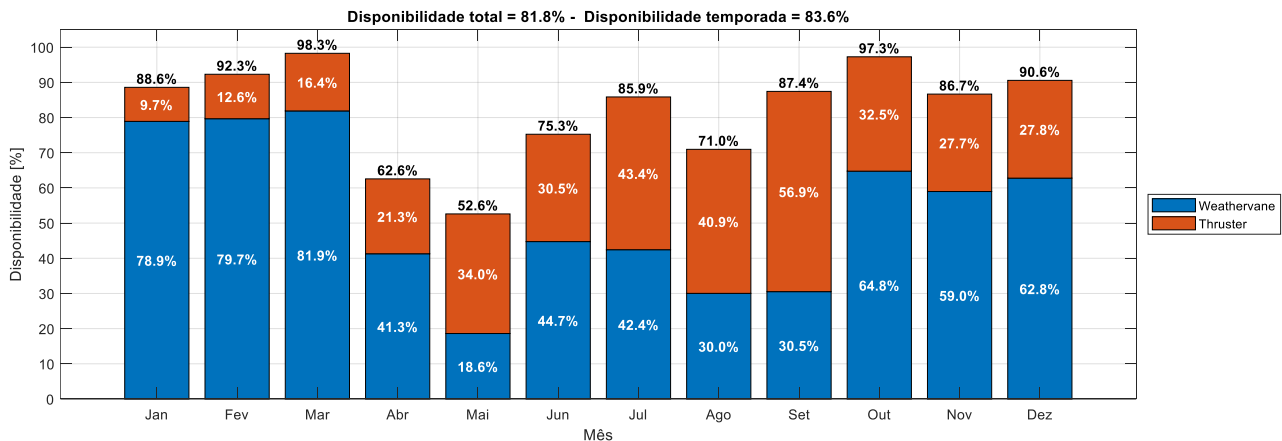


Figura 23 - Resultados de Disponibilidade Mensal para operação do MSC Fantasia.

## 6 Conclusão

Neste relatório foi apresentada uma modelagem numérica para avaliação da disponibilidade de operação de transbordo de passageiros usando *tenders*/escunas a partir de navios ancorados na área de fundeio do Porto de Vitória/ES.

Foram considerados 1 ano de condições ambientais simultâneas de vento, corrente e onda. Foi avaliado o aproamento resultante da incidência das condições ambientais e verificada a necessidade de ajuste do ângulo de incidência das ondas utilizando o sistema de posicionamento dinâmico (*thrusters*).

A Tabela 2 apresenta as disponibilidades para cada uma das embarcações avaliadas considerando o ano inteiro das condições avaliadas. Já a Tabela 3 apresenta os valores de disponibilidade considerando apenas os meses da temporada de cruzeiros (outubro a maio).

**Tabela 2 - Disponibilidade anual para operação de transbordo com tender/escuna para as embarcações analisadas (I: considerando dia inteiro; D: considerando apenas período diurno)**

	<b>Costa Diadema</b>	<b>MSC Fantasia</b>
Disponibilidade <i>weathervane</i>	I: 47,9% ; D: 48,1%	I: 51,7% ; D: 52,1%
Disponibilidade <i>Thruster</i>	I: 31,1% ; D: 30,7%	I: 30,4% ; D: 29,6%
<b>Disponibilidade Total</b>	<b>I: 79,0% ; D: 78,8%</b>	<b>I: 82,1% ; D: 81,8%</b>

**Tabela 3 - Disponibilidade dos meses de temporada para operação de transbordo com tender/escuna para as embarcações analisadas. (I: considerando dia inteiro; D: considerando apenas período diurno)**

	<b>Costa Diadema</b>	<b>MSC Fantasia</b>
Disponibilidade <i>weathervane</i>	I: 57,2% ; D: 57,3%	I: 60,5% ; D: 60,7%
Disponibilidade <i>Thruster</i>	I: 24,7% ; D: 23,8%	I: 24,0% ; D: 22,9%
<b>Disponibilidade Total</b>	<b>I: 81,9% ; D: 81,0%</b>	<b>I: 84,4% ; D: 83,6%</b>

**Considerado todo o período do dia:** para a operação de fundeio, tem-se que a disponibilidade é cerca de 97,6% para o ano inteiro e 98,4% para os meses da temporada, considerando ondas com Hs < 2,0m e ventos (rajada de 30s) menores que 26 nós.

**Considerando apenas o período diurno (das 6h às 18h):** para a operação de fundeio, tem-se que a disponibilidade é cerca de 97,7% para o ano inteiro e 98,4% para os meses da temporada, considerando ondas com Hs < 2,0m e ventos (rajada de 30s) menores que 26 nós.

Além disso, no Capítulo 8 em anexo foi avaliada a profundidade mínima necessária para o fundeio seguro das embarcações a partir de dois modelos propostos pela PIANC [6].

O modelo conceitual resultou em uma profundidade de 12,5m e o modelo detalhado resultou em uma profundidade de 11,2m. Por se tratar de um modelo mais completo e que leva em consideração a hidrodinâmica das embarcações recomenda-se adotar o valor de 11,2 m obtido pelo modelo detalhado.

## 7 Bibliografia

- [1] Tetrattech, *Modelagem de ondas e hidrodinâmica para suporte aos estudos de manobra no canal de acesso ao Porto de Vitória - ES*, 2018.
- [2] Oceano Digital, *Parâmetros de Ondas para o Estudo de Amarração de Navios na Baía de Vitória e Baía do Espírito Santo (ES)*, 2023.
- [3] OCIMF, *Mooring Equipment Guidelines 4th Edition (MEG4)*, 2018.
- [4] WAMIT Inc., “WAMIT User Manual v7.0,” 2011.
- [5] J. N. Newman, *Marine Hydrodynamics (40th anniversary edition)*, The MIT Press, 2017.
- [6] PIANC, *Harbour Approach Channels Design Guidelines*, 2014.

## 8 Anexo – Avaliação de Folga Sob A Quilha

Existem duas formas de avaliar a profundidade mínima necessária para que não ocorra eventos de toque no fundo durante o período de fundeio dos navios de passageiros na entrada do Porto de Vitória/ES: O modelo conceitual e o modelo detalhado, ambos propostos pela PIANC [6].

No modelo conceitual são utilizados dados tabelados que em geral fornecem resultados conservadores para abranger uma diversidade de tipos de embarcações. Já o modelo detalhado, os navios em operação são modelados numericamente para avaliação precisa do movimento vertical em ondas de cada embarcação.

Nesta seção serão apresentadas as duas avaliações para definição da profundidade mínima necessária.

### 8.1 Modelo Conceitual

A Tabela 4 apresenta os valores adotados pela PIANC [6], para definição da profundidade mínima de forma a garantir uma folga sob a quilha segura para que não ocorra toque do casco no leito oceânico.

Tabela 4 - Avaliação do Modelo Conceitual proposto pela PIANC.

Description	Vessel Speed	Wave Conditions	Channel Bottom	Inner Channel	Outer Channel
<b>Ship Related Factors <math>F_s</math></b>					
Depth $h$	$\leq 10$ kts	None		1.10 $T$	
	10 - 15 kts			1.12 $T$	
	$> 15$ kts			1.15 $T$	
	All	Low swell ( $H_s < 1$ m)			1.15 $T$ to 1.2 $T$
		Moderate swell ( $1$ m $< H_s < 2$ m)			1.2 $T$ to 1.3 $T$
		Heavy swell ( $H_s > 2$ m)			1.3 $T$ to 1.4 $T$
	<b>Add for Channel Bottom Type</b>				
All			Mud	None	None
		All	Sand/clay	0.4 m	0.5 m
			Rock/coral	0.6 m	1.0 m
<b>Air Draught Clearance (ADC)</b>					
ADC	All	All		0.05 $H_{st}$	0.05 $H_{st}$ + 0.4 $T$
Notes:					
1. For Ship Related Factors: Assumes $T > 10$ m. If $T < 10$ m, use value for $T = 10$ m					
2. Swell means waves with peak periods $T_p$ greater than 10 s					
3. For Outer Channel swell values, use lower value for smaller swell wave periods and higher value for larger swell periods					
4. Value of significant wave height $H_s$ is dependent on required operation, design ship type, level of accessibility, wave period and relative wave direction					
5. $H_{st}$ is the distance from the sea surface to the top of the ship					
6. Seawater density assumed for $T$ . Additional adjustments required if fresh water.					

Table 2.2: Channel depth components and air draught estimates for Concept Design (CD)

Nota-se que as embarcações analisadas possuem calado de 8,5m e que, de acordo com a avaliação conceitual, é necessário adotar nos cálculos  $T = 10$  m. Dessa forma, temos que:

$$h = 1,2 \cdot T + 0,5 = 1,2 \cdot 10 + 0,5 = 12,5 \text{ m}$$

Eq. 1

## 8.2 Modelo Detalhado

O cálculo da amplitude máxima de movimento dos pontos pertencentes à quilha foi realizado a partir dos RAOs (*Response Amplitude Operators*) de movimento das embarcações obtidos numericamente através do programa WAMIT [4]. O WAMIT é um programa desenvolvido para o cálculo das propriedades hidrodinâmicas de sistemas flutuantes sujeitos à incidência de ondas, através do qual são calculadas, por exemplo, as curvas de massa adicional, amortecimento potencial, restaurações hidrostáticas e forças de onda. A partir dessas propriedades é possível a obtenção dos RAOs de movimento em todos os graus de liberdade do movimento. Todos os cálculos são realizados no domínio da frequência.

Entre outros parâmetros, para o desenvolvimento do modelo numérico do WAMIT são necessários, principalmente:

- a malha da superfície molhada do navio a ser avaliado (Figura 9);
- a matriz de massa e inércia do sistema;
- um vetor com os períodos de onda a serem avaliados;
- um vetor com os ângulos de incidência de onda a serem avaliados.

O RAO do movimento vertical de um ponto  $P(x, y, z)$  pertencente ao navio analisado é calculado como:

$$RAO_z^P = RAO_3 - x \cdot RAO_5 + y \cdot RAO_4 \quad \text{Eq. 2}$$

Sendo  $RAO_3$ ,  $RAO_4$  e  $RAO_5$  os RAOs de *heave*, *roll* e *pitch* da embarcação, respectivamente.

Uma vez de posse do RAO no ponto desejado, a amplitude máxima do movimento vertical é calculada por:

$$z_{onda} = FR \cdot \frac{H_{sz}}{2} \quad \text{Eq. 3}$$

Onde  $FR$  é o fator de Rayleigh, calculado segundo

$$FR = \sqrt{\frac{\ln\left(\frac{t}{T_z}\right)}{2}} \quad \text{Eq. 4}$$

Onde  $t$  é o tempo de exposição às ondas que neste estudo é 3600 s e  $T_z$  é o período entre zeros ascendentes do movimento. Já altura significativa é calculada por:

$$H_{sz} = 4 \cdot \sqrt{\int_0^{\infty} S_z^P(\omega) d\omega} \quad \text{Eq. 5}$$

Na qual  $S_z^P(\omega)$  é o espectro de movimento vertical no ponto dado pelo cruzamento espectral do espectro de mar  $S(\omega)$  com o RAO do ponto:

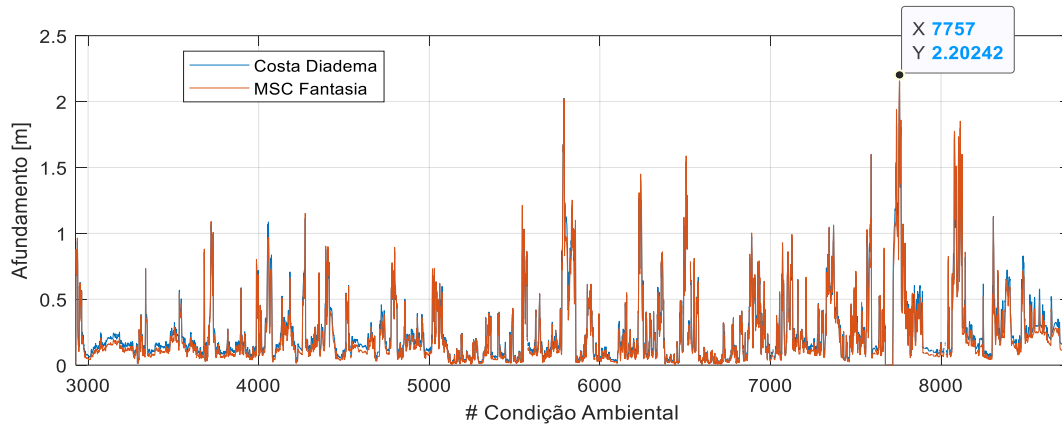
$$S_z^P(\omega) = [RAO_z^P(\omega)]^2 \cdot S(\omega) \quad \text{Eq. 6}$$

Para a presente análise foi adotado o espectro TMA, que possui uma distribuição de energia adequada para ondas observadas em águas rasas.

A partir dos aproamentos obtidos na avaliação da operação de fundeio, é possível avaliar o movimento vertical dos pontos pertencentes a quilha das embarcações. Considerando que o fundo do local é arenoso,

pode se considerar as recomendações da PIANC [6] adotando uma folga líquida sob a quilha de 0,5 m. Ou seja, mesmo avaliando o afundamento máximo devido às ondas é necessária uma sobra de meio metro entre o fundo e a quilha da embarcação.

A Figura 24 apresenta a série de afundamento máximo da quilha das embarcações para as condições ambientais avaliadas. Considerando os valores obtidos têm-se que o afundamento máximo foi de 2,2m ( $z_{onda} = 2,2m$ ), conforme denotado na figura.



**Figura 24 – Avaliação do afundamento máximo da quilha para as embarcações avaliadas.**

Dessa forma, considerando o calado das embarcações  $T = 8,5m$  e a folga líquida de 0,5m temos que a profundidade mínima no local deve ser de:

$$h = T + z_{onda} + 0,5 = 8,5 + 2,2 + 0,5 = 11,2 \text{ m}$$

Eq. 7



#### INFORMAÇÕES DO DOCUMENTO

Documento capturado em 30/04/2024 10:36:20 (HORÁRIO DE BRASÍLIA - UTC-3)  
por DILSON HENRIQUE DIAS (ANALISTA DO EXECUTIVO - GEINFRA - SETUR - GOVES)  
Valor Legal: CÓPIA SIMPLES | Natureza: DOCUMENTO NATO-DIGITAL

A disponibilidade do documento pode ser conferida pelo link: <https://e-docs.es.gov.br/d/2024-W3JLFH>