



IMPACTO DE MODELOS ALTERNATIVOS DE USO DE REBOCADORES
PORTUÁRIOS NO AUMENTO DA CAPACIDADE DE NAVIOS

Leonardo Sousa Soares

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Oceânica, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Oceânica.

Orientador: Floriano Carlos Martins Pires
Junior

Rio de Janeiro
Maio de 2017

IMPACTO DE MODELOS ALTERNATIVOS DE USO DE REBOCADORES
PORTUÁRIOS NO AUMENTO DA CAPACIDADE DE NAVIOS

Leonardo Sousa Soares

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA (COPPE) DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA OCEÂNICA.

Examinada por:

Prof. Floriano Carlos Martins Pires Junior,
D.Sc.

Prof. Sérgio Hamilton Sphaier, Dr – Ing.

Prof. Lino Guimarães Marujo, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

MAIO DE 2017

Soares, Leonardo Sousa

Impacto de modelos alternativos de uso de rebocadores portuários no aumento da capacidade de navios./ Leonardo Sousa Soares. - Rio de Janeiro: UFRJ / COPPE, 2017.

XIII, 92 p.: il.; 29,7cm

Orientador: Floriano Carlos Martins Pires Junior

Dissertação (Mestrado) – UFRJ / COPPE / Programa de Engenharia Oceânica, 2017

Referências Bibliográficas: p.88-92

1. Folga abaixo da quilha. 2. Utilização de rebocadores nos portos. 3. Aumento de capacidade de navios. I. Pires Junior, Floriano Carlos Martins. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Oceânica. III. Título

*Dedico este trabalho
ao meu pai, José Ferreira
Soares (in memoriam), pelo
amor, carinho e pela certeza
de estar sempre comigo e ser
um eterno exemplo de vida
para mim.*

MEUS MAIS SINCEROS AGRADECIMENTOS:

A Deus, por estar sempre iluminando meus caminhos, por ter me proporcionado saúde e confiança suficientes para superar os percalços e dificuldades da vida, impedindo que estes se sobreponham aos novos desafios.

A minha mãe Maria Helena e minha irmã, Eng. Luciana S. Soares pelo incentivo de sempre na conclusão de mais este desafio na minha vida. A minha esposa Cinthia: muito obrigado amor pela paciência e abdicção de alguns momentos juntos, em prol da conclusão do mestrado, tão importante para mim.

Ao Instituto BZ e seus diretores, pela permissão de uso do simulador de manobras, ferramenta deveras útil nas análises e contribuições deste trabalho.

Aos amigos CLC Plinio Calenzo e OSM Tárik Darian, por apresentar-me a ciência da rebocagem, e pela oportunidade de ter me ensinado tanto sobre este assunto em vários estudos e trabalhos junto ao Instituto Brasileiro de Rebocagem.

Aos amigos da FHM – Jefferson Carvalho e Mário Calixto - pelas ideias e críticas ao longo do trabalho. Aos diretores desta instituição e ao professor Dr. Sérgio Sphaier, pelo incentivo no início do curso deste mestrado, alguns anos atrás.

Aos professores Dr. Luis Felipe Assis e Dr. Edson Mesquita, pelo auxílio com dados cruciais à realização da análise final contida neste estudo.

Um agradecimento muito especial ao meu orientador Prof. Dr. Floriano C. Pires Jr, por ter acolhido com muito agrado este projeto, abdicando de seus momentos particulares para melhor orientar-me neste trabalho. Faço votos que este trabalho e a troca de experiências tenham contribuído de alguma forma para aumentar o seu cabedal de conhecimento na área de rebocadores portuários, sua vida e carreira profissional.

Agradeço também o apoio das funcionárias da COPPE / UFRJ, em especial: D. Lucianita Barbosa, Eloísa Moreira e Andrea Xavier, e a todos os meus professores da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), local que me orgulho sobremaneira ter ocupado os bancos escolares. Vocês que fazem diariamente o nome desta brilhante universidade permanecer como ícone de excelência mundial de ensino.

Finalmente, a todos os amigos e amigas que tenho na Indústria Naval: este trabalho acima de tudo visa a reduzir certos gargalos inerentes aos nossos portos e terminais e melhorar as suas operações.

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M. Sc).

IMPACTO DE MODELOS ALTERNATIVOS DE USO DE REBOCADORES PORTUÁRIOS NO AUMENTO DA CAPACIDADE DE NAVIOS

Leonardo Sousa Soares

Maio /2017

Orientador: Floriano Carlos Martins Pires Júnior

Programa: Engenharia Oceânica

A presente dissertação tem por finalidade apresentar uma metodologia alternativa e inovadora de utilização de rebocadores portuários em assistência na manobra de navios, com a finalidade precípua de reduzir a velocidade de trânsito de navios no canal de acesso aos portos e terminais. Esta redução de velocidade apresenta, por consequência, um efeito de redução no afundamento da embarcação pela ação de ondas e devido ao efeito Squat, aumentando-se o parâmetro de navegação denominado folga abaixo da quilha.

Finalmente, o propósito final do trabalho é converter este incremento de folga abaixo da quilha em aumento de calado, proporcionando ao armador do navio um aumento de carga a ser transportada e, em alguns casos, aumento de receita, dependendo do valor de frete pactuado (dentro de um contrato de afretamento) entre armador e afretador, e valores de afretamento dos rebocadores.

O método proposto poderá ser utilizado como instrumento de apoio à tomada de decisão por diretores e gestores da área comercial de uma empresa de navegação ou, uma empresa administradora de um porto ou terminal, que pretendam eliminar limitações portuárias utilizando-se de rebocadores portuários.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc).

IMPACT OF ALTERNATIVE MODELS OF USE OF HARBOUR AND ESCORT TUGS
ON
INCREASE OF SHIP'S CAPACITY

Leonardo Sousa Soares

May/ 2017

Advisor: Floriano Carlos Martins Pires Júnior

Department: Ocean Engineering

This work aims to present an innovating and alternative methodology of use of harbour tugs in assisting the ships' maneuvers in ports, with the primary purpose of reducing the ship's transit speed in the access channels to ports and terminals. This reduction of ship's speed has the consequence of minimizing ship's sinkage due to waves and squat effect as well. Moreover, such reduction in the ship's sinkage is converted in an increase of the navigation parameter know as underkeel clearance value.

Finally, the final purpose of the work is convert this increase of underkeel clearance in increase of ship's draft, providing the ship's owner an increase of cargo to be shipped and, in some cases, an increase of incomes, according to charter rates settled within a contract of affreightment, and tug's charter prices.

The proposed methodology can be used as a tool (in the decision-making process) by commercial directors or managers of ship's companies, as well as port's companies, which intends to remove port's restrictions, by using harbour tugs in assisting ship's maneuvers.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO E CONTEXTUALIZAÇÃO	1
1.1. Revisão Bibliográfica	3
1.2. A motivação: adequar as novas construções de navios aos portos brasileiros e gerar aumento de capacidade ao armador, a partir de um método alternativo de uso de rebocadores portuários.	5
2. FATORES DE INFLUÊNCIA DO PARÂMETRO “FOLGA ABAIXO DA QUILHA”	9
2.1. Efeito Squat	12
2.1.1. Fatores que influenciam o Efeito Squat	14
2.2. Afundamento do navio em ondas	18
2.3. Inclinação dinâmica: afundamento do navio ao fazer curvas	20
3. BREVES CONSIDERAÇÕES SOBRE REBOCADORES PORTUÁRIOS.	23
3.1. Conceito de Tonelagem de Tração Estática (“Bollard Pull”)	25
3.2. Principais tipos de rebocadores encontrados no Brasil	26
3.2.1. Rebocadores tratores	27
3.2.2. Rebocadores convencionais	29
3.2.3. Rebocadores com propulsão azimutal de popa (ASD’s)	30
3.3. Métodos de assistência utilizados nas manobras	32
4. METODOLOGIA E APLICAÇÃO: Análise do potencial aumento de folga abaixo da quilha de um uso alternativo de rebocadores portuários nas manobras de navios.	35
4.1. Cenário da análise.	35
4.2. Ferramenta utilizada na análise: simulador de manobras em modelo matemático	39
4.2.1. Modelagem do navio-tipo	39
4.2.2. Modelagem das forças de vento	42
4.2.3. Modelagem das forças de corrente	42
4.2.4. Modelagem das forças das ondas	43
4.2.5. Modelagem das interações com fundo, bancos e navio-navio.	43
4.3. Modelos de navio-tipo e de rebocador utilizados	44
4.4. Condições ambientais utilizadas para análise	45
4.4.1. Regime de marés	45
4.4.2. Correntes de maré	47
4.4.3. Regime de ventos	50

4.4.4. Ondas	50
4.4.5 Mapa das condições ambientais analisadas para obtenção dos valores de folga abaixo da quilha	51
4.5. Simulações e Resultados	52
4.5.1. Valores de folga abaixo da quilha nas manobras com 2 rebocadores, e velocidades médias de 6 nós.	53
4.5.2. Valores de folga abaixo da quilha nas manobras com 5 rebocadores, e velocidades médias de 3 a 4 nós.	61
5. ANÁLISE ECONÔMICA DA OPERAÇÃO	69
5.1. Cálculo da quantidade de carga a ser embarcada	69
5.2. Obtenção dos valores médios de frete para carga a granel	76
5.3. Obtenção do custo representativo pela utilização de 3 rebocadores adicionais por manobra portuária	80
5.4. Aumento de receita para o armador do navio.	81
6. CONCLUSÕES E CONTRIBUIÇÃO ESPERADA	86
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	88

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Trecho da NPCP-RJ que trata da velocidade máxima permitida dos navios nos canais do Porto do Rio de Janeiro.	6
Figura 2: Trecho da NPCP-SP que trata da velocidade máxima permitida aos navios nos canais de acesso ao Porto de Santos.	6
Figura 3: Trecho da NPCP-AO que trata da velocidade máxima permitida aos navios nos canais de acesso ao Porto de Belém.	7
Figura 4: Fluxograma representando a proposta do trabalho. Fonte: Autor	8
Figura 5: Fatores verticais relacionados a profundidade de um canal de acesso.....	11
Figura 6: Ilustração do efeito Squat em um navio navegando em velocidade.	12
Figura 7: Exemplificação das formulações do afundamento para Efeito Squat devido a dependência do C_B	15
Figura 8: Ilustração do fator de bloqueio.....	16
Figura 9: Apresentação dos 6 graus de liberdade de uma embarcação.	18
Figura 10: Exemplos de afundamento devido a ondas de proa, de diferentes períodos de incidência. Fonte: GOURLAY [16].	20
Figura 11: Inclinação que um navio adquire em curvas, e conseqüente aumento do seu calado.	21
Figura 12: Rebocadores auxiliando os navios na passagem por eclusas e pontes, no porto de Antuérpia, Bélgica.	24
Figura 13: Rebocadores prestando assistência a navio-tanque no terminal de Sullon Voe, na Escócia.....	25
Figura 14: Exemplo de rebocador trator com propulsão cicloidal.....	28
Figura 15: Exemplo de rebocador convencional com dois eixos.	29
Figura 16 : Exemplos de rebocadores ASD. Modelos RAport 2400 (direita) e RAport 3000W (esquerda).....	31
Figura 17: Rebocador ASD rebocando navio porta-contêineres na operação proa-com-proa.	32

Figura 18: Rebocadores do tipo convencional em manobra de assistência a um navio porta-contêineres, no porto de Los Angeles.....	33
Figura 19: Rebocadores convencionais operando no método europeu, na proa do navio assistido.	34
Figura 20: Vista aérea do Porto do Rio de Janeiro com a divisão dos terminais e dos canais de acesso ao terminal de contêineres e ao porto comercial.	36
Figura 21: Trecho da carta náutica DHN 1512 com destaque para o canal de acesso ao Porto Comercial, com profundidades parametrizadas para 11 metros.	38
Figura 22: Condição de altura de marés inseridas nas simulações.....	47
Figura 23: Imagem representando as direções predominantes das medições de corrente, durante a campanha de medição de correntes de maré.....	49
Figura 24: Valores de velocidade e direção de corrente de maré representada nas simulações.....	49
Figura 25: Variação dos valores de folga abaixo da quilha e velocidade do navio no domínio do tempo, de acordo com os valores obtidos na manobra com 2 rebocadores na condição “2.14”. Fonte: Transas Marine / Instituto BZ.	56
Figura 26: Trajetória percorrida pelo navio-tipo durante a manobra com 2 rebocadores na condição “2.14”. Fonte: Transas Marine / Instituto BZ.....	57
Figura 27: Variação dos valores de folga abaixo da quilha e velocidade do navio no domínio do tempo, de acordo com os valores obtidos na manobra com 2 rebocadores na condição “8.15”. Fonte: Transas Marine / Instituto BZ.....	59
Figura 28: Trecho da planilha de dados (Excel) mostrando os valores obtidos de folga abaixo da quilha e velocidade do navio, no domínio do tempo: manobra com 2 rebocadores, na condição “8.15”. Fonte: Transas Marine / Instituto BZ.....	59
Figura 29: Trajetória percorrida pelo navio durante a manobra com 2 rebocadores, na condição “8.15”.Fonte: Transas Marine / Instituto BZ.	60
Figura 30: Imagem aérea da manobra com 5 rebocadores, na condição “3.10”. Fonte: Transas Marine / Instituto BZ.	62
Figura 31: Variação dos valores de folga abaixo da quilha e velocidade do navio no domínio do tempo, de acordo com os valores obtidos na manobra com 5 rebocadores na condição “1.5”. Fonte: Transas Marine / Instituto BZ.....	65
Figura 32: Trajetória percorrida pelo navio-tipo durante a manobra com 5 rebocadores, na condição “1.5”, com a representação da direção e intensidade do vento e ondas. Fonte: Transas Marine / Instituto BZ.....	66

Figura 33 : Variação dos valores de folga abaixo da quilha e velocidade do navio no domínio do tempo, de acordo com os valores obtidos na manobra com 5 rebocadores na condição “1.14”. Fonte: Transas Marine / Instituto BZ.....	67
Figure 34: Capa do manual de estabilidade e tabela de dados hidrostáticos do navio classe “Panamax” “DOCEALFA”. Fonte: VEROLME [30].	74
Figura 35: Queda nos valores de receita, entre os anos 2013 e 2015, para os diferentes tipos de navios graneleiros.	77
Figura 36: Dados de frete (U\$D / t) em 2 rotas diferentes.	78
Figura 37: Apresentação dos 2 cenários de receita de acordo com o valor de frete e condição ambiental da análise.....	84

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Lista de manobras obrigatórias realizadas durante a validação de dados do navio-tipo.	40
Tabela 2: Características do navio-tipo usado nas simulações	44
Tabela 3: Características do rebocador usado nas simulações.....	45
Tabela 4: Características de marés analisadas nas simulações.....	46
Tabela 5: Valores de altura de onda (em metros) na região da Baía de Guanabara, e indicação de valores médios.	51
Tabela 6: Quadro-resumo das condições ambientais utilizado na análise.	51
Tabela 7: Valores mínimos (em metros) encontrados de folga abaixo da quilha nas simulações com 2 rebocadores.....	54
Tabela 8: Valores mínimos (em metros) encontrados de folga abaixo da quilha nas simulações com 5 rebocadores.....	63
Tabela 9: Diferenças entre os valores mínimos (em metros) de folga abaixo da quilha entre as análises com 5 e com 2 rebocadores.	69
Tabela 10: Dados reais de navio graneleiro da classe “Panamax”	73
Tabela 11: Cálculo da tonelage a ser embarcada, para diferentes condições ambientais da análise.....	75

1. INTRODUÇÃO E CONTEXTUALIZAÇÃO

Nos últimos anos, engenheiros e arquitetos navais apresentaram ao mundo os maiores e mais potentes navios já construídos. Embarcações de granel sólido de 400.000 TPB¹ com seus 23 metros de calado, os chamados “CHINAMAX” tornaram-se uma realidade em portos nacionais, europeus e asiáticos. No que tange o transporte de carga em contêineres, os navios “Post-Panamax” e “New-Panamax”, com respectivamente 8500 TEU²s e 12500 TEUs também se tornaram uma realidade nos principais “hub” portos mundiais.

Adicionalmente ao aumento das principais dimensões (comprimento total, boca e calado), os navios passaram a ter maior potência nas suas máquinas, apresentando velocidades mínimas de operação superiores aos valores máximos admissíveis para manutenção da segurança da navegação em muitos portos mundiais. E este aumento de velocidade inicial é um fator indesejável à navegação e manobra do navio em áreas portuárias, pois exige maior habilidade de controle do seu curso e aproamento por parte dos agentes envolvidos na manobra, quais sejam estes: comandante do navio, práctico, rebocadores, entre outros. Além disso, uma alta velocidade inicial gera um maior afundamento do navio em ondas e afundamento maior devido ao efeito Squat.

Trazendo para o caso nacional o fato dos navios mais modernos possuírem uma maior velocidade inicial, verifica-se que a grande parte dos portos brasileiros permaneceu, ao longo dos anos, enclausurada pelas cidades no seu entorno, e, em vista disso, não

¹ TPB (Tonelagem de Porte Bruto): Diferença entre o peso do navio com o máximo de carga autorizado e o peso do navio leve. Tal diferença que pode ser expressa em toneladas métricas. Corresponde ao peso da carga, passageiros e sua bagagem, combustível e lubrificantes, aguada e víveres. Fonte: ABNT [1].

² “TEU” significa “twenty-foot equivalent unit”, e simboliza um contêiner de 20 (vinte) pés de comprimento. Fonte: ABNT [1].

É a unidade mais utilizada no mundo como referência de medição de quantidade de carga transportada em navios porta-contêineres.

sofreu significativas mudanças de traçado, largura, profundidade. Com isso, percebe-se que muitos dos nossos portos não estão adequados para receber a próxima geração de grandes navios. Em vista disso, é necessário o emprego de novas técnicas nas manobras de navios, com o objetivo de fazer com que os portos brasileiros estejam preparados para receber esta próxima frota de grandes e mais potentes embarcações. Ademais, ao tornar viável a manobra destas embarcações em portos nacionais, contribui-se para a redução dos custos do transporte internacional pelo emprego de maiores navios (maior economia de escala), eliminando-se também alguns gargalos logísticos que ainda permanecem como um dos maiores entraves ao desenvolvimento nacional.

Novas técnicas de utilização de rebocadores já são usadas em alguns portos europeus (ex: Rotterdam – Holanda) e asiáticos (ex: Cingapura), com o desiderato específico de redução dos valores de velocidade de trânsito dos navios nos canais de acesso (sobretudo aqueles que estejam procedendo para atracação e precisam estar com velocidades próximas de zero na bacia de evolução). Por exemplo, a utilização de rebocadores no método indireto de reboque (para gerar forças de frenagem ao navio), método este que, ainda não é amplamente utilizado no Brasil, pode ser uma destas alternativas.

Em contrapartida aos métodos usuais de utilização de rebocadores nas manobras, este trabalho apresenta uma metodologia alternativa de usar tal ferramenta de auxílio de manobra de navios e, também, de mitigação das restrições existentes nas áreas portuárias. A metodologia proposta possui finalidade precípua de utilizar rebocadores para se reduzir a velocidade de trânsito dos navios nos canais de acesso, reduzindo também os valores de afundamento devido a ondas e efeito Squat.

Diante dessa hipótese, foi utilizado um simulador de manobras de navios para analisar um exemplo quantitativo do aumento de folga abaixo da quilha a partir da redução de velocidade de trânsito dos navios, sob a égide da metodologia alternativa de uso de

rebocadores. Para haver consonância com as manobras no caso real, escolheu-se um porto cujo canal de acesso possui restrições de velocidade de trânsito dos navios, em conjunto com parâmetros de condições ambientais que limitam algumas manobras no porto escolhido.

Os resultados de aumento de folga abaixo da quilha foram significativos, em algumas das condições ambientais analisadas, o que levou uma solução alternativa aos métodos comumente empregados para se manter uma adequada folga abaixo da quilha: reduzir o calado do navio ou optar por dragagem dos canais de acesso.

Ademais, a partir dos dados e do aumento nos valores de folga abaixo da quilha, obteve-se uma solução alternativa para aumentar-se a capacidade dos navios, transformando o aumento de calado multiplicado pelo valor do TPC³ do navio em quantidade de carga a ser embarcada.

Finalmente, ao fazer uma análise de custo-benefício (*trade-off*) entre o aumento de receita (dado pelo aumento da capacidade de carga), de acordo com valores diferentes de frete (USD / ton), pelo aumento de custo em virtude do aumento do número de rebocadores, segundo o método alternativo empregado de uso de rebocadores, obteve-se algumas situações que o aumento de receita foi bastante significativo, o que compensaria em demasia o emprego desta metodologia no propósito de se reduzir custos e maximizar receitas para vários agentes (armador, autoridade portuária, dono da carga, etc).

1.1. Revisão Bibliográfica

Durante a realização desta pesquisa, foi constatada uma escassez de referências bibliográficas existentes sobre rebocadores portuários, sobretudo aquelas relacionadas com

³ TPC: Esta sigla significa Toneladas por centímetro de imersão: significa o peso que deve ser adicionado ou retirado do navio a fim de aumentar ou diminuir o seu calado em um centímetro.

o uso de rebocadores para gerar forças adicionais de frenagem nos navios. No Brasil, na presente data deste trabalho, está em fase de publicação pela Autoridade Marítima Brasileira (Marinha do Brasil) um livro técnico que passará a nortear os projetos de novas construções de rebocadores e aumentará o nível de conhecimento sobre manobras com rebocadores nos portos brasileiros. Este livro, tradução da publicação “Tug Use in Ports”, terá chancela da Autoridade Marítima Brasileira, através da Diretoria Geral de Navegação, proverá conhecimento técnico neste assunto tão pouco explorado no Brasil, mas de suma importância para as operações portuárias do cotidiano.

A principal referência bibliográfica sobre o assunto rebocadores portuários é o livro “Tug Use in Ports” [2], de autoria do comandante e prático Henk Hensen. Por sua vez, sobre o tema planejamento portuário e aspectos náuticos, as principais referencias nacionais e internacionais são a norma ABNT NBR 13246 [1] e o Relatório Técnico 121/2014 da PIANC [3], respectivamente. Entretanto, quando se trata de ter uma referência que lide com uso de rebocadores para controle e redução da velocidade do navio, o artigo que mais se aproxima foi publicado por TEJADA [4], na Conferência MARSIM, no Panamá, em 2009.

Diante do exposto em epígrafe e cristalina escassez de trabalhos acadêmicos que lidem com o uso de rebocadores portuários para reduzir a velocidade de navios, adequando esta à realidade dos portos nacionais e, por óbvio, preservando a segurança da navegação, este trabalho objetiva trazer uma metodologia inovadora que trate da utilização de rebocadores para redução da velocidade dos grandes navios nos portos brasileiros, viabilizando seu trânsito nos referidos canais de acesso.

1.2. A motivação: adequar as novas construções de navios aos portos brasileiros e gerar aumento de capacidade ao armador, a partir de um método alternativo de uso de rebocadores portuários.

Conforme visto nas seções acima, todos os três fatores de maior influência no afundamento do navio possuem em comum o mesmo parâmetro: velocidade do navio. É exatamente ao reduzir-se a velocidade do navio que se poderá minimizar o afundamento do navio devido aos fatores mencionados.

Entretanto, com o aumento do tamanho e capacidade dos navios mercantes construídos nos últimos anos (independente da sua classe - contêineres, graneleiros, passageiros, etc), houve um aumento de potência das suas máquinas; e este aumento de potência vem sendo consubstanciado em um maior valor da velocidade mínima inicial dos navios – conhecida como “muito devagar avante” (do inglês “*dead slow ahead engine speed*”).

Navios que possuem propulsão de passo controlável ou aqueles que possuem propulsão azimutal, seu regime de máquinas pode ser alterado de uma forma gradual e em etapas, através do comando da sua propulsão dentro dos seus passadiços. Nestes navios, a velocidade mínima inicial pode atingir valores pequenos, em torno de 4 (quatro) nós de velocidade, e os problemas de afundamento decorrentes da velocidade inicial são minimizados.

Contudo, em navios que possuem propulsão de passo fixo, as velocidades do navio acompanham o número de rotação por minuto do propulsor, e são estabelecidas após a construção do navio. Ocorre que alguns navios mais modernos tem sido construídos com uma potência mais alta que navios mais antigos, elevando suas velocidades iniciais mínimas, antes em torno de 6 (seis) nós, para valores da ordem de 8 a 8,5 nós, valores superiores a velocidade de trânsito limite em muitos portos brasileiros.

Citam-se abaixo as figuras 1, 2 e 3, que mostram alguns trechos de regras da Autoridade Marítima Brasileira (Normas e Procedimentos da Capitania dos Portos – NPCP’s) com relação à velocidade máxima dos navios nos portos. Estas regras demonstram que alguns portos brasileiros não estão adequados as novas construções de navios, pois, em sua maioria, limitam a velocidade máxima de trânsito dos navios nos canais de acesso aos portos a valores de 6 a 8 nós.

Trecho (Qualquer Sentido)	Velocidade Máxima
Boca da Barra – Ilha de Boa Viagem	10 nós
Boa Viagem – Ponte Presidente Costa e Silva	7 nós
Canal São Lourenço	6 nós
Canal de Acesso do Porto do Rio de Janeiro	7 nós
Sob a Ponte Presidente Costa e Silva	7 nós
Norte da Ponte Presidente Costa e Silva	8 nós

Figura 1: Trecho da NPCP-RJ que trata da velocidade máxima permitida dos navios nos canais do Porto do Rio de Janeiro.

Fonte: MARINHA DO BRASIL [5]

<p>0403 - RESTRIÇÕES DE VELOCIDADE, CRUZAMENTO E ULTRAPASSAGEM</p> <p>1) Em Santos:</p> <p>a) a velocidade máxima permitida no canal de Santos é de 8 nós;</p> <p>b) a velocidade máxima permitida no Canal de Piaçaguera (acesso à Cosipa) é de 6 nós;</p>
--

Figura 2: Trecho da NPCP-SP que trata da velocidade máxima permitida aos navios nos canais de acesso ao Porto de Santos.

Fonte: MARINHA DO BRASIL [6]

b) Restrições de Velocidade

Observar o contido nos itens 0105 e subitem 0601.5 destas Normas e Procedimentos, para cada porto/trecho a ser navegado.

Considerando os possíveis danos que podem ser causados às margens, às instalações nelas localizadas e às embarcações atracadas é proibida a passagem de embarcações em velocidade superior a 5 nós e em distância inferior a 150 metros das margens em locais de concentração de embarcações, trapiches, flutuantes e portos organizados.

Figura 3: Trecho da NPCP-AO que trata da velocidade máxima permitida aos navios nos canais de acesso ao Porto de Belém.

Fonte: MARINHA DO BRASIL [7]

Diante do exposto acima, a motivação deste trabalho é propor um modelo alternativo de uso de rebocadores portuários, de forma a responder aos seguintes questionamentos:

- i. Como ajustar a velocidade inicial mínima dos navios mais modernos, muitas vezes um valor superior ao valor máximo permitido em várias normas da Autoridade Marítima Brasileira, sem prejudicar a manobrabilidade destas embarcações?
- ii. Existe alguma forma de permitir o acesso destes tipos de navios aos portos brasileiros, mantendo-se um valor seguro de folga abaixo da quilha, não afetando a segurança da navegação, e ainda, minimizando custos de dragagem?

- iii. Finalmente, há alguma maneira de permitir que se aumente a folga abaixo da quilha de navios navegando em canais de acesso, de forma a utilizar esta variação de calado para se obter ganhos de carga e frete?

Este trabalho objetiva responder positivamente as questões acima, a partir de um modelo alternativo de uso de rebocadores portuários nas manobras dos navios nos portos: utilização de um número maior de rebocadores em algumas manobras, permitindo com que os rebocadores controlem efetivamente a velocidade do navio no canal de acesso até o berço de atracação. Ao se alterar a velocidade do navio para um valor menor do que a velocidade inicial mínima, o valor total do afundamento também é reduzido e, por consequência, aumenta-se a folga abaixo da quilha “líquida”. E, através deste incremento pela multiplicação do valor de tonelagem por centímetro de imersão (TPC) do navio, possibilitar ao armador do navio um ganho de capacidade e de receita. Esta operação pode ser representada pelo algoritmo e figura 4 abaixo:

$$S(USD) = \{ (\Delta(UKC) \times TPC) \times (S_{FRETE}) \} \cdot \{ S_{CAPACIDADE} \}$$

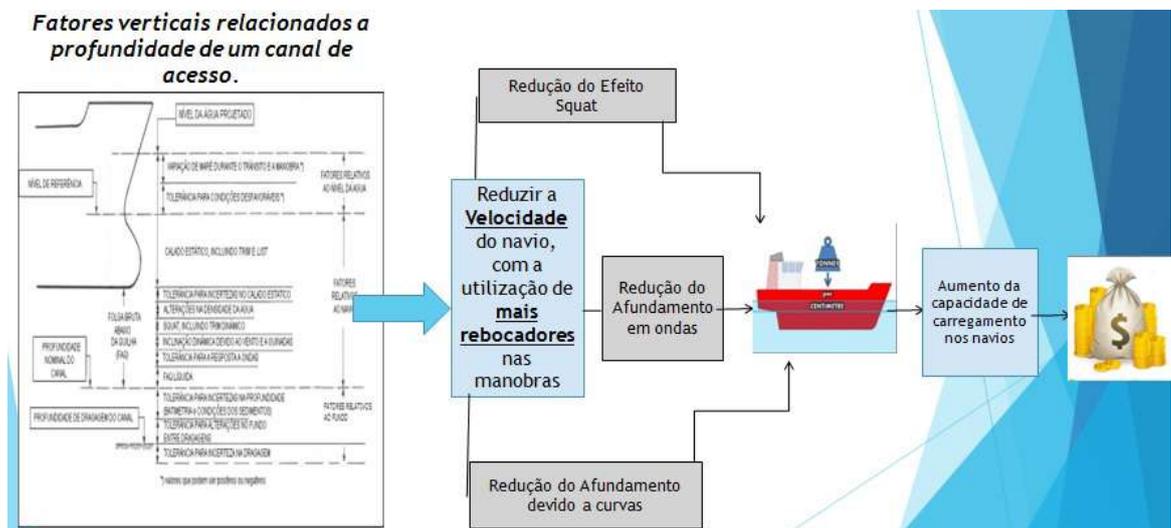


Figura 4: Fluxograma representando a proposta do trabalho. Fonte: Autor

2. FATORES DE INFLUÊNCIA DO PARÂMETRO “FOLGA ABAIXO DA QUILHA”

No projeto de construção ou ampliação de um canal de acesso, ocasião que ocorre, por exemplo, para se permitir um aumento de capacidade do porto, faz-se necessário o conhecimento de fatores que influenciam as manobras dos navios e a segurança da navegação em áreas restritas.

Estes fatores, de acordo com a PIANC [2], são divididos em:

- Fatores relativos a dimensões verticais do canal de acesso;
- Fatores relativos a dimensões horizontais do canal de acesso.

Os fatores relativos às dimensões horizontais são referenciados em relação ao comprimento e boca do maior navio-tipo a ser manobrado no canal de acesso e área portuária, em conjunto com fatores ambientais e externos, quais sejam: vento, ondas, correntes, auxílios a navegação, superfície e tipo de fundo, etc. Estes parâmetros não influenciam a folga abaixo da quilha (calculada pela subtração da profundidade menos o calado do navio) e não estarão em análise neste trabalho.

Entretanto, os fatores relativos as dimensões verticais influenciam a folga abaixo da quilha, pois alteram o nível da profundidade de água no local ou, alteram o valor do calado estático do navio. Conforme PIANC [2], estes fatores são subdivididos em:

i. Fatores relativos ao nível da água:

- Variação de maré durante o trânsito e manobra;
- Tolerância para condições desfavoráveis

ii. Fatores relativos ao navio:

- Calado estático, incluindo trim e banda;

- Tolerância para incertezas do calado estático;
- Efeito squat, incluindo trim dinâmico;
- Inclinação dinâmica devido a vento e guinadas;
- Tolerância para resposta a ondas;
- Folga abaixo da quilha líquida

iii. Fatores relativos ao fundo:

- Tolerância para incertezas na profundidade;
- Tolerância para alterações no fundo entre dragagens;
- Tolerância para incerteza na dragagem.

Apenas a título de ilustração, é apresentada abaixo a figura 5, com todos os parâmetros listados acima; esta imagem comporá a próxima norma brasileira da Associação Brasileira de Normas Técnicas sobre Planejamento Portuário, ABNT NBR 13246 [1], em fase final de publicação na data desta dissertação.

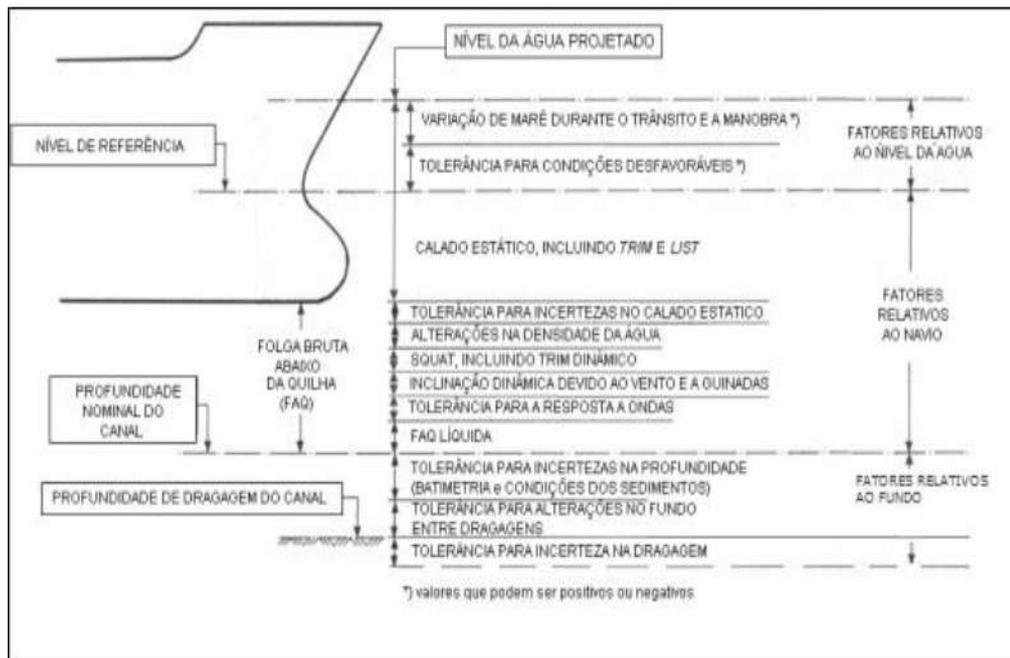


Figura 5: Fatores verticais relacionados a profundidade de um canal de acesso.

Fonte: ABNT [1].

Os fatores relacionados ao nível da água – citados em “i” - baseiam-se no nível da altura da maré no momento da manobra do navio no canal de acesso. Por óbvio, estes fatores não podem controlados pelos operadores do navio (prático, comandante, tripulação, etc), apenas adequados ao instante da manobra para deixar o valor mínimo de folga abaixo da quilha para o navio navegar e não encalhar.

Os fatores relacionados ao fundo – citados em “iii” – também são concernentes ao canal de acesso ao porto que o navio está navegando, e se relacionam também ao processo de transporte de sedimentos que ocorre no canal de acesso, que pode diminuir o valor de profundidade dragada no canal, e conseqüentemente, o valor da folga abaixo da quilha. Em portos onde há lama de baixa densidade, pode ocorrer a interação entre a lama e o fundo náutico, reduzindo ainda mais o valor da folga abaixo da quilha, conforme apresentaram CASACA, *et al.* [8].

Apenas à guisa de complementação, em portos onde há interação entre a lama e o fundo náutico, pode ocorrer aumento de resistência ao avanço, consoante explicado em SANO e YASUKAWA [9], fato que pode também reduzir a velocidade do navio.

Serão explicados em maior detalhe os 3 (três) parâmetros de maior influência na obtenção da folga abaixo da quilha “líquida”, todos fatores relacionados ao navio (citados em “ii”) : efeito Squat; efeito do afundamento do navio ao fazer curvas (inclinação dinâmica) e, efeito do afundamento do navio em ondas.

2.1. Efeito Squat

Quando embarcações, independente do porte, classe ou tipo, estão navegando próximas a umas das outras, é perceptível em cada uma delas a presença das demais, seja de uma forma maior ou menor, conforme expôs BARRASS [10]. A este efeito, denominado interação, resultado da diferença de campos de pressão no fluido, pode manifestar-se de várias formas, desde a indução indesejável de velocidades, mudanças no aproamento ou, reduções na distância entre a quilha da embarcação e o fundo. O último efeito citado em epígrafe resulta do fenômeno bem conhecido na engenharia naval denominado efeito Squat.

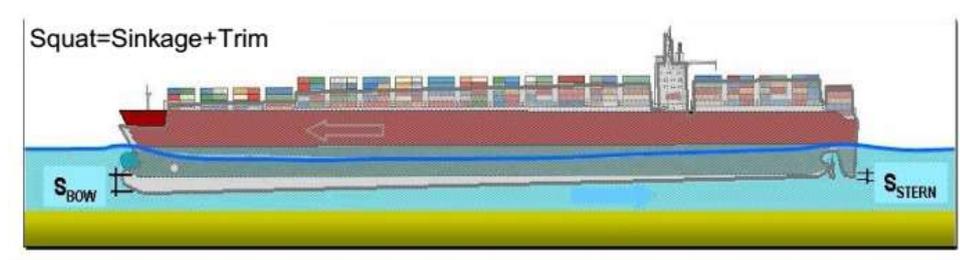


Figura 6: Ilustração do efeito Squat em um navio navegando em velocidade.

Fonte: PIANC [3].

De acordo com BARRASS [10], o efeito Squat ilustrado na figura 6, é o somatório algébrico de um afundamento vertical, denominado em inglês, “sinkage”, com um movimento rotacional da proa, denominado de “trim”. A direção deste movimento rotacional da proa dependerá, na sua maior plenitude, do coeficiente de bloco (C_B), conforme se segue:

- Se quando a embarcação estiver parada na água, e em condição de águas parcelhas, possuir um coeficiente de bloco maior que 0.700, ela embicará (trim pela proa) quando estiver navegando;
- Se quando a embarcação estiver parada na água, e em condição de águas parcelhas, tiver um coeficiente de bloco menor que 0.700, ela derrabará (trim pela popa) quando estiver navegando;
- Se quando a embarcação estiver parada na água, e em condição de águas parcelhas, tiver um coeficiente de bloco igual a 0.700, não haverá movimento rotacional da proa.

Logo, percebemos que, de acordo com BARRASS [10], navios com formas mais cheias - $C_B > 0.700$ - possuirão uma tendência a ter Squat pela proa, enquanto os navios com formas mais finas - $C_B < 0.700$ - tenderão a ter Squat pela popa. Embora este valor não seja tão acurado para todos os navios, ainda é considerado como uma boa “regra geral”, conforme PIANC [3].

O efeito Squat sempre existiu, mas era menos relevante, pois os navios eram de menores dimensões, mais lentos, e navegavam em canais mais profundos. Com o aumento de novas construções de navios de maior potência, com maiores valores de velocidade e de calado, navegando em áreas com pequenos valores de folga abaixo da quilha, o efeito

Squat passou a ser relevante para cálculos de probabilidade e estimativas de encalhes, custos de reparação, custos com seguradoras, de acordo com PIANC [3].

2.1.1. Fatores que influenciam o Efeito Squat

A previsibilidade do efeito Squat depende das características do navio e configuração do canal de acesso. Os principais parâmetros concernentes ao navio são: o calado, representado pela letra “T”; o coeficiente de bloco, C_B ; e a velocidade do navio, representado por V_S . Cabe lembrar que esta é a velocidade do navio na água, logo, de acordo com PIANC [3], devem-se incluir os efeitos causados pelas correntes de rios próximos ao canal de acesso e, correntes de marés.

O coeficiente de bloco C_B é uma medida adimensional de um navio, que reflete o quanto de volume do casco dele está sendo ocupado por um paralelepípedo reto-retângulo circunscrito a este navio. Pode ser expresso na fórmula:

$$C_b = \frac{V}{L_{pp} \times B \times T}$$

Onde :

C_b =coeficiente de bloco;

V = volume de carena

L_{pp} = comprimento entre perpendiculares

B = boca

T = calado

Um artigo recente de cálculos de afundamento e influência direta do coeficiente de bloco foi o de GRONARZ [11], cujos resultados de algumas fórmulas de Squat e sua dependência com o parâmetro C_B são expostas na figura 7 abaixo:

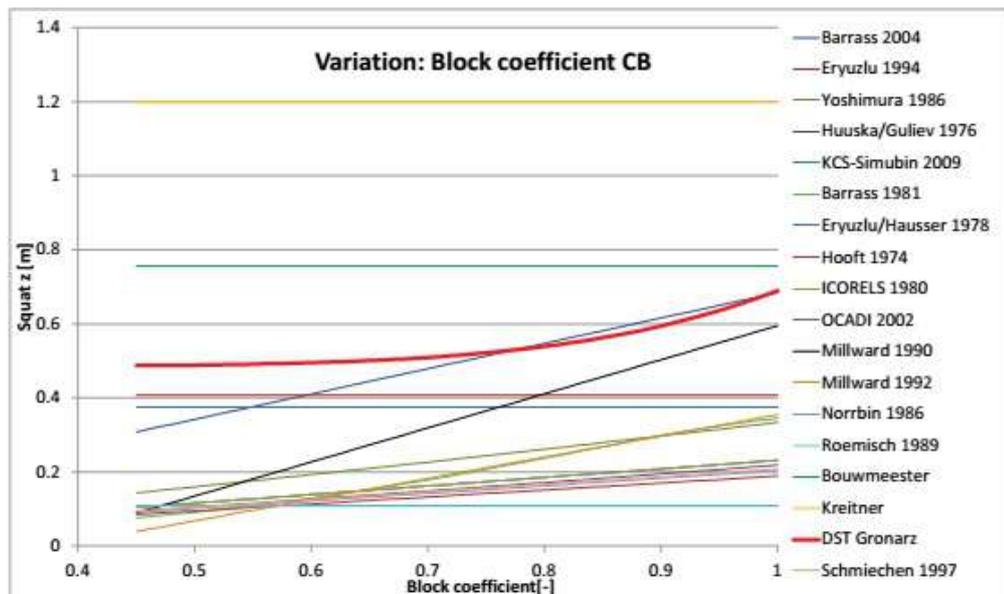


Figura 7: Exemplificação das formulações do afundamento para Efeito Squat devido a dependência do C_b .

Fonte: GRONARZ [11].

Por outro lado, os principais parâmetros de canal que influenciam o efeito Squat são: profundidade, representado pela letra "H" e a área seccional do canal; ambos estes parâmetros estarão influenciando mais ou menos o efeito Squat, dependendo das dimensões do navio navegando no canal. E da razão entre a área da seção transversal do navio pela área da seção transversal do canal, origina-se outro número adimensional, denominado "fator de bloqueio do canal" (do inglês, "blockage factor"), ilustrado na figura 8, retirada de MacELREVEY [12].

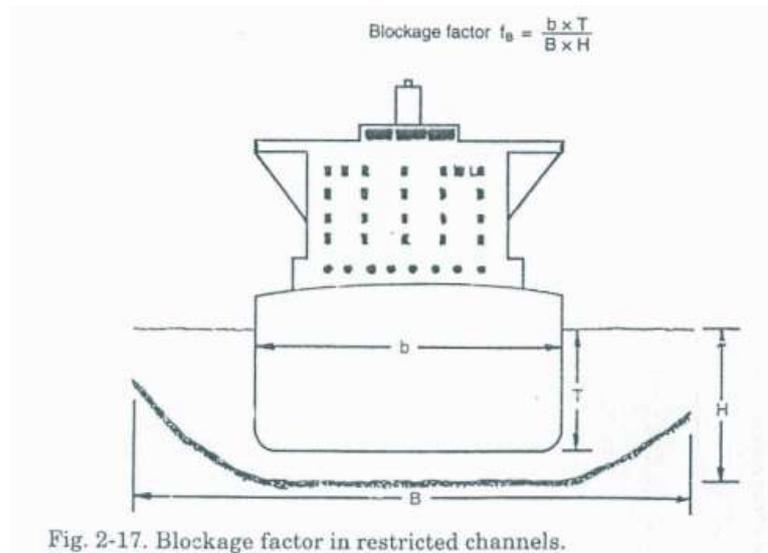


Figura 8: Ilustração do fator de bloqueio.

Fonte: MacELREVEY [12].

Onde

F_b = fator de bloqueio;

B = boca do navio;

T = calado

W = largura do canal

H = profundidade do canal

:

De forma geral, o afundamento devido ao efeito Squat varia com o valor da velocidade elevado ao quadrado. Conseqüentemente, se o navio tiver sua velocidade dobrada, o afundamento devido ao efeito Squat será quadruplicado. Por outro lado, se o navio reduzir sua velocidade a metade, o afundamento devido ao efeito Squat será diminuído a quarta parte.

De todas as fórmulas citadas e explicadas no relatório do PIANC [3], para clareza da explicação, cita-se a fórmula simplificada de Romisch (1989). Esta é a fórmula utilizada pela ferramenta de análise (simulador de manobras em modelo matemático) neste estudo, cujos resultados da análise estarão no capítulo 4.

$$S_{b,R} = C_V \cdot C_F \cdot K_{\Delta T} \cdot T \text{ – Fórmula para cálculo do Efeito Squat pela proa do navio}$$

$$S_{s,R} = C_V \cdot K_{\Delta T} \cdot T \text{ – Fórmula para cálculo do Efeito Squat pela popa do navio}$$

Onde:

C_V = Fator de correção para a velocidade do navio;

$$\text{Calculado por : } C_V = 8 (V / V_{\text{crítica}})^2 \cdot [(V / V_{\text{cr}} - 0,5)^4 + 0,0625]$$

C_F = Fator de correção para o formato do navio;

$$\text{Calculado por : } C_F = (10 C_B / L_{pp} / B)^2$$

$K_{\Delta T}$ = Fator de correção para Squat na velocidade crítica.

$$\text{Calculado por: } K_{\Delta T} = 0,155 \cdot \sqrt{h / T}$$

2.2. Afundamento do navio em ondas

Adicionalmente ao efeito Squat, quando o navio está navegando em um canal de acesso exposto ao efeito de ondas ou swell⁴, o navio sofre amplificação dos movimentos de caturro (em inglês “pitch”) e arfagem (em inglês, “heave”), para ondas de proa, e balanço (em inglês “roll”), para ondas de través; graus de liberdade representados na figura 9 abaixo.. Estes movimentos ocasionam um aumento de calado, e consequente diminuição na folga abaixo da quilha, na maior parte dos casos.

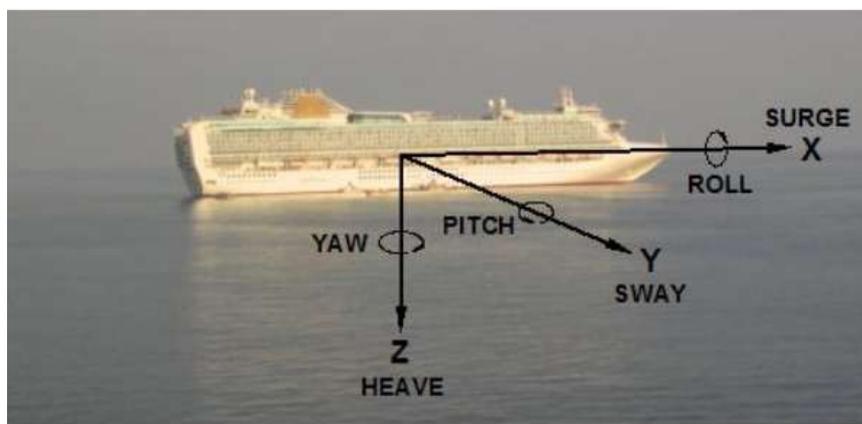


Figura 9: Apresentação dos 6 graus de liberdade de uma embarcação.

Fonte: PIANC [3]

A título de exemplificação, McCARTNEY, *et al.* [13] reportaram um ângulo de caturro de 2,5° (dois e meio graus) pode causar ao navio de 1000 pés (aproximadamente 305 metros) um afundamento de 22 pés (aproximadamente 6,7 metros) em mar aberto; já em áreas portuárias, como foram feitas observações no Rio Columbia (estado de Washington, costa oeste dos Estados Unidos) de afundamentos na ordem de 25 pés (aproximadamente 7,6 metros).

⁴ Swell: ondulações geradas por vento, que não foram geradas por vento local. O swell tem cristas mais bem definidas e planas do que as ondas formadas pelo vento. O período do swell é muito regular, variando de 8 a 30 segundos, embora seja raro ocorrer períodos de 15 a 30 segundos. Fonte: ABNT [1].

De acordo com O'BRIEN [14], a magnitude destes movimentos irregulares e dinâmicos em cada ponto do trajeto do navio dependerá de alguns fatores, incluindo:

- Velocidade do navio;
- O espectro da onda incidente (descrevendo a distribuição de energia de onda como função da frequência e direção);
- Dimensões do navio, formato do casco e dados de estabilidade;
- Razão profundidade do local / calado do navio.

O aumento máximo de calado ocorre, de acordo com PIANC [3], quando a amplitude da onda incidente se adiciona a amplitude do movimento natural do navio, causando ressonância entre os períodos do navio e da onda incidente e amplificando o movimento de caturro ou balanço.

Outro aspecto importante a se considerar é o período da onda incidente. O período da onda corresponde a distância temporal para formação de duas cristas consecutivas. Logo, quanto maior o período, mais tempo levar-se-á para formar a próxima crista, e mais massa de água terá a próxima onda. A partir disso, deduz-se que quanto maior o período da onda incidente, maiores serão seus efeitos no afundamento do navio.

Essencial é a ressalva feita em ROM [15], que, se o navio está em movimento, o período de onda considerado é aquele conhecido como “período de encontro” ou “período aparente”, o qual é o intervalo de tempo para passagem de duas cristas consecutivas por um mesmo ponto da embarcação. Conseqüentemente, este período de encontro não dependerá somente do período da onda incidente, mas também da velocidade da embarcação e do ângulo de incidência da onda com o aproamento da embarcação. Esta consideração permite que a embarcação, quando possível, modifique seu aproamento ou velocidade, com o objetivo de modificar as condições da sua resposta em ondas.

Apenas para exemplificação do efeito das ondas no afundamento de um navio em movimento, é apresentado na figura 10 o estudo de GOURLAY [16], que obteve medidas de afundamento em ondas, para um navio graneleiro de 230 metros de comprimento entre perpendiculares, a partir da modelagem de ondas incidentes pela proa, com 1 (um) metro de altura e, diferentes períodos de incidência.

Ele verificou que os deslocamentos verticais significantes para este navio-tipo ocorreram a amplitude média dos 1/3 (um terço) maiores movimentos em um mar irregular para os valores dados de período.

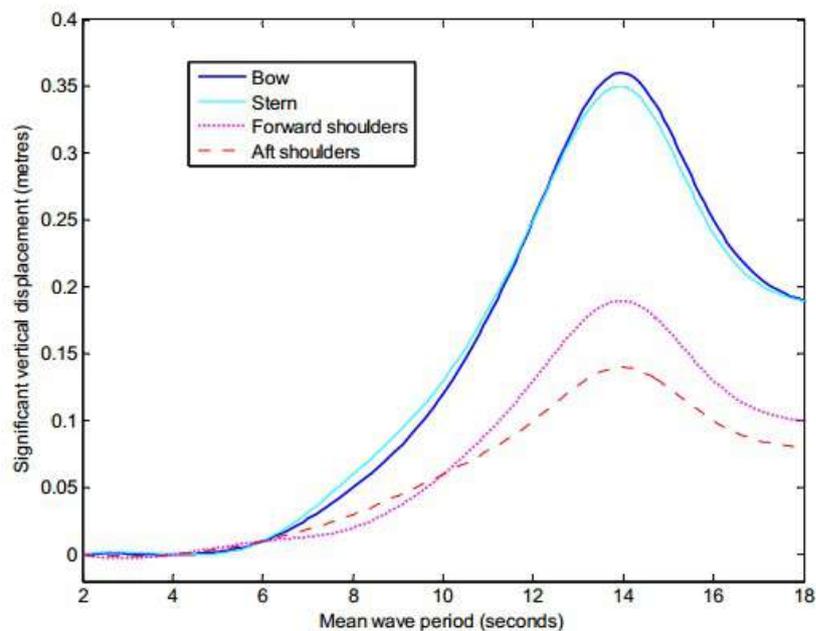


Figura 10: Exemplos de afundamento devido a ondas de proa, de diferentes períodos de incidência.
Fonte: GOURLAY [16].

2.3. Inclinação dinâmica: afundamento do navio ao fazer curvas

O terceiro importante fator que afeta diretamente a folga abaixo da quilha de um navio em um canal de acesso é a inclinação que um navio adquire ao fazer curvas em um canal, bem conhecida como inclinação dinâmica, ou em inglês, “dynamic heel”.

Segundo PARKER [17], quando um navio está fazendo uma curva, atua nos seu casco uma força dirigida para fora da curva, que modifica a posição do centro de carena do navio, deixando-o fora da linha de centro. Esta descentralização do centro de carena faz com que o navio adquira uma banda, de acordo com a direção da curva. A magnitude desta banda depende da velocidade do navio, do raio do giro e da altura metacêntrica do navio. Navios tipo porta-contêineres e petroleiros experimentam valores maiores de acréscimo de calado devido a esta inclinação. Complementa LEWIS [18] que esta banda ocorre devido ao fato de que, ao carregar o leme e alterar o grau de liberdade “yaw”, são induzidos movimentos nos planos dos graus de liberdade “pitch” e “roll”, sendo estes últimos de grande significância para a ocorrência da inclinação.

Adicionalmente, CLARK [19] aduz que a inclinação inicial devido a força do leme é dependente da razão de guinada do navio, estabilidade estática transversal e sua velocidade, ilustrando com a figura 11 (abaixo), como ocorre esta inclinação, que irá resultar em aumento de calado e decréscimo da folga abaixo da quilha.

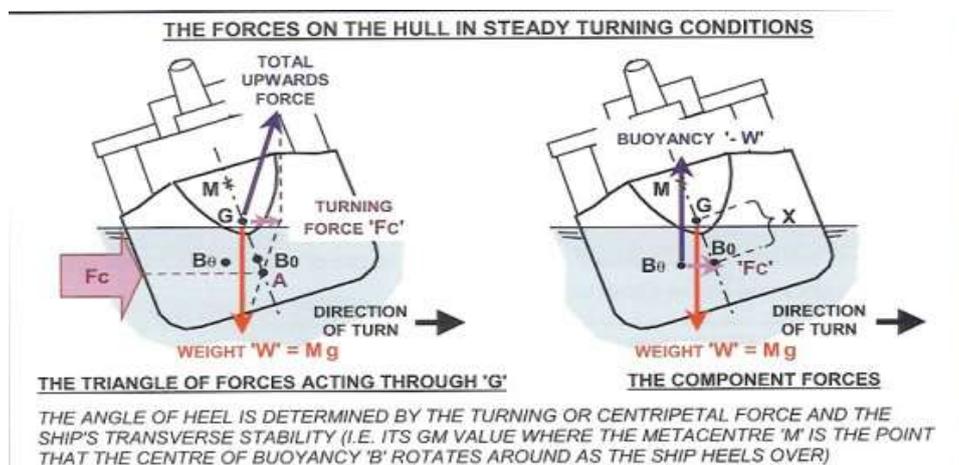


Figura 11: Inclinação que um navio adquire em curvas, e consequente aumento do seu calado.

Fonte: CLARK [19].

McCARTNEY, *et al.* [13] reportaram que apenas 5° (cinco graus) de inclinação devido a curvas, de um navio de 100 pés (aproximadamente 30 metros) de boca foi suficiente para aumentar o calado na seção de meio-navio em, aproximadamente 4,2 pés (aproximadamente 1,28 metros).

3. BREVES CONSIDERAÇÕES SOBRE REBOCADORES PORTUÁRIOS.

Navios mercantes em sua natureza são construídos visando aumentar sua capacidade de carga. A custa disso, alguns parâmetros de uma boa manobrabilidade, por exemplo - alta razão comprimento / boca, alta potência propulsiva, lemes com alta razão de aspecto, entre outros – são muitas vezes desprezados, em vista da construção de maiores porões ou espaços para carga. Para compensar estas limitações concernentes a uma boa manobrabilidade, as manobras portuárias dos navios mercantes são, em sua grande maioria, subsidiadas pelo auxílio de rebocadores portuários: pequenas embarcações construídas com grande potência de máquinas, elevada manobrabilidade, e que possuem equipamentos próprios e certificados para esta atividade (ex: cabos de reboque, guinchos de reboque, etc.).

Em manobras portuárias, sua atuação junto aos navios ocorre principalmente sob 2 tipos de assistência, dependendo da velocidade que o navio esteja desenvolvendo:

- i. Quando o navio está navegando no canal de acesso, cujas velocidades de trânsito variam, de acordo com HENSEN⁵ [2], na maior parte dos casos, de 3 a 6 nós:
 - Auxílio no controle da velocidade do navio, manobras de entrada e saída da área portuária ou bacia de evolução;
 - Auxílio na compensação de forças ambientais (vento, ondas e corrente) que podem tender a desviar seu curso para fora do canal de acesso.

⁵ A publicação “Tug Use in Ports – A Practical Guide”, de autoria de Henk Hensen é a publicação recomendada pela Organização Marítima Internacional (OMI / IMO), através da circular IMO Circ. MSC 1101 [20] para análises sobre uso de rebocadores portuários em portos no mundo.

- Auxílio no governo do navio, manutenção do seu aproamento e/ou curso no canal de acesso, rios; passagens por pontes ou eclusas, conforme visto na figura 12;



Figura 12: Rebocadores auxiliando os navios na passagem por eclusas e pontes, no porto de Antuérpia, Bélgica.

Fonte: HENSEN [2]

- Auxílio durante a parada e o giro na bacia de evolução;
- Aproximação do navio para o berço, no método “empurra-puxa⁶”, atuando no costado do navio, como ilustrado na figura 13, abaixo.

⁶ Método empurra-puxa ou “push-pull” (em inglês): método em que os rebocadores são colocados para empurrar o navio para direção do berço e, para compensar este movimento lateral, puxando com cabo longo. Normalmente, os rebocadores são amarrados para operar desta forma nas bochechas e alhetas do navio.



Figura 13: Rebocadores prestando assistência a navio-tanque no terminal de Sullon Voe, na Escócia.

Fonte: HENSEN [2].

Além destes serviços, estas embarcações ainda podem ser utilizadas para fainas de emergência, tais como:

- Salvatagem: reboque de embarcações avariadas em alto-mar para o estaleiro de reparo (ex: após um encalhe abalroamento em alto-mar);
- Combate a incêndio: alguns rebocadores possuem canhões de combate a incêndio (“fire-fighting”) para uso, em caso de fainas que demandem este serviço.

3.1. Conceito de Tonelagem de Tração Estática (“Bollard Pull”)

A principal medida de avaliação de um rebocador portuário, independente da sua classificação, seu tipo e projeto de construção, é a tonelagem de tração estática, em inglês, “bollard pull”. Comparando a um navio mercante, cujo valor é medido pela sua tonelagem de porte bruto (TPB), a tração estática é a medida valorativa de um rebocador portuário, pois representa a avaliação da sua força estática para reboque.

De acordo com BARRADAS FILHO [21], o teste de tração estática compreende a puxada, pelo rebocador, em diferentes regimes de rotações do propulsor (70, 80, 90, 100%), de um cabo passado no seu guincho e preso a um cabeço em terra, com capacidade já pré-estabelecida de construção.

É mister observar que o teste de tração estática é apenas uma indicação de como será a puxada do guincho daquele rebocador que realizou o teste. Como o teste é feito em águas abrigadas, e sob condições ambientais extremamente favoráveis e dificilmente encontradas em manobras portuárias reais, é importante a lembrança e consciência por parte daqueles que utilizarão o rebocador para assistência na manobra (prático, comandante do navio e comandante do rebocador), que a medida exata de tração no cabo de reboque, durante as manobras tende a ser bem inferior a registrada nos testes de tração estática. Por isso, na adequação e avaliação da tração estática necessária para manobra de certo navio, são utilizados e acrescidos fatores de segurança ao cálculo total, mencionados em HENSEN [2]; estes fatores dependerão das condições ambientais da manobra do navio com o rebocador.

3.2. Principais tipos de rebocadores encontrados no Brasil

Analogamente aos navios, que possuem classificação de acordo com o tipo de carga que transportam (conforme PIANC [3], por exemplo: porta-contêineres, graneleiros, petroleiros, etc.) ou serviço que se destinam (ex: navios mercantes, navios de Estado), os rebocadores portuários também apresentam classificações. Alguns autores apresentam classificações conforme o tipo de propulsão, a exemplo de FRAGOSO, *et al.* [22]. Apresentaremos a classificação em função da localização da propulsão e do ponto de reboque, de acordo com HENSEN [3]:

- a) Rebocadores que possuem propulsão a vante da seção de meio-navio e ponto de reboque a ré: rebocadores tratores

- b) Rebocadores que possuem propulsão a ré e ponto de reboque próximo da seção de meio-navio: rebocadores convencionais;
- c) Tipos intermediários de rebocadores, que podem ser classificados como convencionais ou tratores, dependendo da forma que operam: rebocadores tratores-reversos, rebocadores com propulsão azimutal de popa (ASD's) e, rebocadores combinados.

Existem ainda novos desenvolvimentos de rebocadores: são aqueles rebocadores que surgiram no século XXI, a partir de novos projetos analisados pelos renomados projetistas Robert Allan e Damen Shipyards: rebocador-rotor; rebocador- carrossel; rebocador SDM, rebocador-RAVE, rebocador-trator Voith-Water; este último, objeto de estudo do paper de JURGENS, *et al.* [23]. Estes tipos de rebocadores não existem nos portos nacionais e não serão contemplados neste estudo.

A classificação apresentada acima atende ao requisito exposto em ALLAN [24], que define que independente do tipo de rebocador, a tríade PROJETO – APLICAÇÃO – OPERAÇÃO deve ser sempre mantida para gerar segurança nas operações com o navio assistido. E a segurança e desempenho das operações com rebocadores estão diretamente relacionadas aos locais de instalação da propulsão, ponto de reboque, além do centro de pressões do rebocador.

Diante da classificação acima, será explicado em maior detalhamento as características dos rebocadores portuários encontrados no Brasil, quais sejam : tratores, convencionais e ASD's.

3.2.1. Rebocadores tratores

Os tratores são rebocadores que possuem propulsão a vante da seção de meio-navio, e guincho ou gato de reboque situado na extremidade de popa. Eles dispõem de

propulsores instalados sempre em pares, na proa do rebocador, podendo ser de 2 (dois) tipos: propulsão azimutal ou propulsão cicloidal, este último ilustrado na figura 14.

São rebocadores de manobrabilidade elevada, podendo prestar assistência ao navio em altas velocidades, operando tanto na proa quanto na popa do navio assistido. Possuem uma sobrequilha vertical (“skeg”) na seção de ré, para prover maior estabilidade de curso quando navegando de popa, e maior estabilidade transversal quando operando na popa do navio assistido em altas velocidades (método indireto⁷ de reboque).

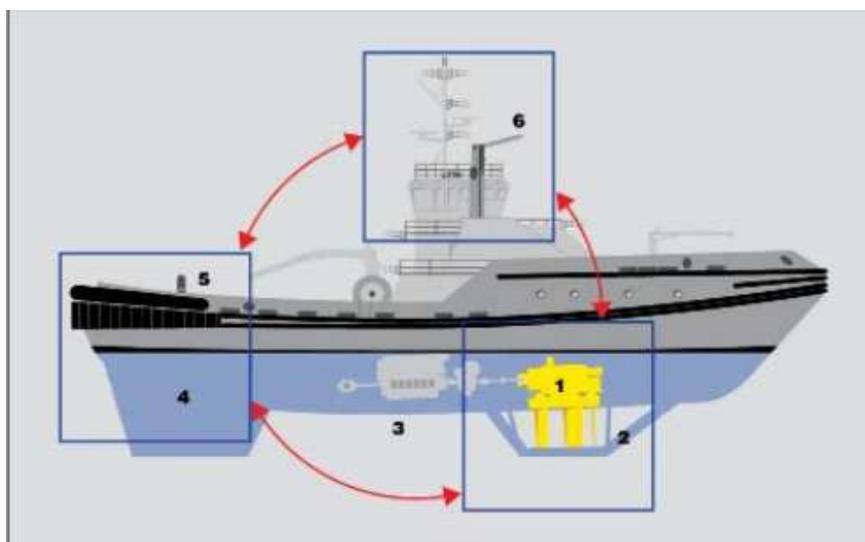


Figura 14: Exemplo de rebocador trator com propulsão cicloidal.

Fonte: JURGENS, D, et al. *Tugology'09*. [23].

Embora bastante empregado em portos da Europa e Ásia, as operações deste tipo de rebocador estão em desuso no Brasil. Atualmente, segundo dados do Instituto Brasileiro de Rebocagem (IBR), há apenas 4 rebocadores tratores no Brasil, todos com propulsão azimutal.

⁷ Método Indireto de Reboque: De acordo com HENSEN [2], é utilizado com rebocadores operando na popa do navio, em altas velocidades, maiores do que cinco a seis nós. O rebocador faz uso de forças hidrodinâmicas no cabo de reboque para gerar forças maiores do que a tonelagem de tração estática no cabo de reboque.

3.2.2. Rebocadores convencionais

Os rebocadores convencionais são os que possuem propulsores a ré e ponto de reboque próximo a seção de meio-navio, geralmente localizado a aproximadamente 45% do comprimento de linha d'água, a partir da popa. Estes rebocadores possuem um, dois (ilustração na figura 15), ou até mesmo três propulsores localizados na popa, às vezes instalados dentro de tubulões Kort, que permitem um aumento percentual, de 15 a 25 % [2] do seu empuxo em operações de reboque. Podem também possuir um impelidor de proa ("bow thruster") retrátil para auxílio nas operações de reboque com cabo longo.



Figura 15: Exemplo de rebocador convencional com dois eixos.

Fonte: FRAGOSO, *et al.* [22].

Este rebocador é ideal para operação de reboque na proa do navio com cabo passado no seu ponto de reboque localizado próximo da seção de meio-navio; nesta condição, é capaz de prestar assistência de governo ao navio para ambos os bordos, em qualquer velocidade. Entretanto, de acordo com HENSEN [2], para operação no costado do navio e com cabo passado na popa deste, possui severas limitações: não consegue trocar o

bordo de operação na popa do navio, em velocidades superiores a 3 (três) nós e possui uma efetiva atuação de empurrar no costado do navio em velocidades máximas de 3 (três) a 4 (quatro) nós, valores baixos para condições normais de operação entre navios e rebocadores.

Ainda existe um significativo número de rebocadores convencionais, e muitos ainda são construídos. Entretanto, no Brasil, o número de encomendas deste tipo de rebocador diminuiu nos estaleiros brasileiros ao longo da 1ª. década do século XXI, sendo substituídas pelas construções de rebocadores com propulsão azimutal de popa (ASD's). Ao mesmo tempo, as normas e regulamentos da Autoridade Marítima nos portos (NPCP's) passaram a exigir em muitos locais a utilização de outros tipos de rebocadores, como os próprios ASD's. Por conseguinte, o número de rebocadores do tipo convencional está em declínio ao longo dos anos no Brasil, e as manobras dos navios nos portos estão sendo realizadas cada vez mais com rebocadores ASD, cujas características serão tratadas mais adiante.

3.2.3. Rebocadores com propulsão azimutal de popa (ASD's)

Os rebocadores com propulsão azimutal na popa, doravante rebocadores ASD (do inglês "*azimuth stern drive*"), são aqueles que, de acordo com HENSEN [2], possuem propulsores azimutais, que podem girar 360° (trezentos e sessenta graus) na popa, localizados em geral a 10% do comprimento de linha d'água, a partir de ré; eles dispõem de um guincho principal e mais potente na parte de vante e, outro ponto de reboque localizado próximo a seção de meio-navio (aproximadamente 35% a 40% do comprimento de linha d'água, a partir de ré) , podendo ser um gato de reboque ou outro guincho.

Em termos de controle da propulsão, estes rebocadores podem desenvolver empuxo para qualquer direção, embora possuam um empuxo a ré percentual máximo da ordem de 5 a 10% inferior ao empuxo de vante.

Ilustra-se na figura 16, duas construções modernas de rebocadores ASD, ambas do projetista canadense Robert Allan.

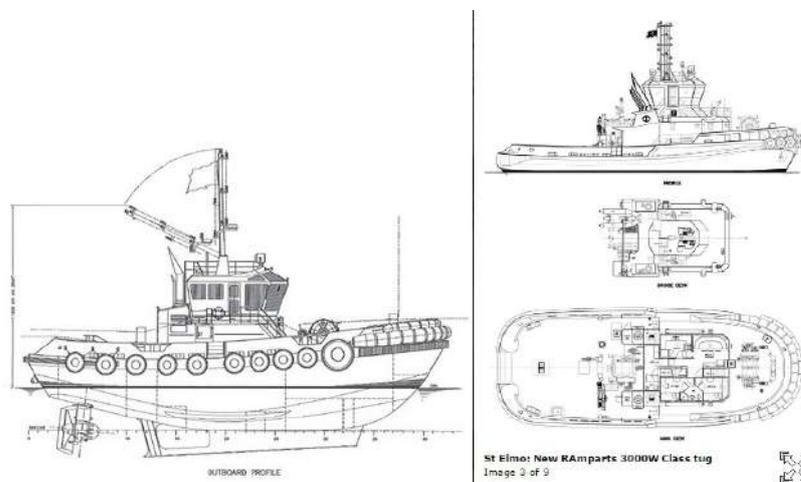


Figura 16 : Exemplos de rebocadores ASD. Modelos RAport 2400 (direita) e RAMpart 3000W (esquerda).

Fonte: Robert Allan.

Pode ser considerado um rebocador “multi-tarefa” (“multi-tug”), pois pode operar como um rebocador trator-reverso - utilizando o cabo passado no guincho de proa - ou como um rebocador convencional - utilizando o cabo passado no gato ou guincho de reboque próximo da seção de meio-navio - onde se encontra o ponto de reboque de um rebocador convencional. É capaz de prestar assistência para ambos os bordos na proa do navio, bem como na popa deste, mesmo em velocidades relativamente altas, maiores que 5 (cinco) a 6 (seis) nós.

Para operações no costado do navio durante atracação ou desatracação, os rebocadores ASD são bastante úteis e eficazes, por causa da alta potência de reversão das suas máquinas, e seus propulsores onidirecionais capazes de realizarem um giro de 360° (trezentos e sessenta graus).

Ademais, nas operações de cabo passado na proa do navio, ao operar utilizando seu potente guincho de proa, os rebocadores ASD fazem a operação denominada “proa-

com-proa” (do inglês, “bow-to-bow”), ilustrada na figura 17, e cujos riscos e eficiência desta operação são discutidos em HENSEN [2, 25]. Neste tipo especial de operação, o rebocador navega de popa, e é capaz de controlar o governo do navio para ambos os bordos. Em virtude de esta operação ser mais arriscada que outras, foi estabelecido um limite para a velocidade do navio de 5 (cinco) nós, quando estiver operando desta forma.



Figura 17: Rebocador ASD rebocando navio porta-contêineres na operação proa-com-proa.

Fonte: HENSEN [2,25].

3.3. Métodos de assistência utilizados nas manobras

Em se tratando de formas de assistência, de acordo com HENSEN [2], basicamente existem 3 métodos de uso de rebocadores portuários no mundo : método americano, método europeu e método combinado.

- i. **Método americano**: utilizado na grande maioria dos portos dos Estados Unidos, Canadá, Austrália, Malásia, África do Sul e grandes terminais de petróleo na Noruega. Podem ser usados rebocadores convencionais ou ASD's / tratores-reversos. Conforme ilustrado na figura 18, os rebocadores são amarrados a contrabordo do navio, nas bochechas e alhetas, ou na popa do navio, assistindo no governo durante o trânsito no canal de acesso e

operando no costado (método “empurra-puxa”) durante a atracação. A forma que os rebocadores são amarrados depende principalmente do tipo de rebocador, enquanto que o número de cabos de reboque usados (nos EUA, podem ser até três cabos) dependerá do tipo de rebocador, situação local e do tipo de assistência requerida.

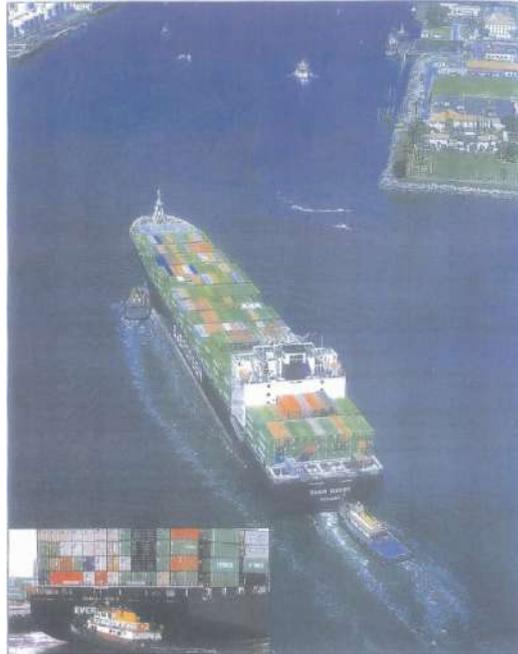


Figura 18: Rebocadores do tipo convencional em manobra de assistência a um navio porta-contêineres, no porto de Los Angeles.

Fonte: HENSEN [2].

- ii. **Método europeu:** utilizado especificamente nos portos da Europa, em maior frequência com rebocadores convencionais, operando com cabo passado para o navio durante o trânsito no canal de acesso e durante a atracação, conforme ilustrado na figura 19. Segundo HENSEN [2], a grande vantagem deste método é que ele pode ser utilizado em águas restritas e estreitas, como, por exemplo: passagem do navio por pontes, entrada de diques secos em estaleiros e entrada de eclusas (ex: Canal do Panamá).



Figura 19: Rebocadores convencionais operando no método europeu, na proa do navio assistido.

Fonte: FRAGOSO, *et al.* [22].

- iii. **Método combinado**: utilizado em vários portos pelo mundo (ex: Austrália); consiste na combinação dos métodos americano e europeu, citados em epígrafe. Utiliza-se de rebocadores ASD ou tratores-reversos. Este é o também o método principal utilizado pelos práticos nos portos brasileiros, onde, na maior parte das manobras de atracação, dois rebocadores são posicionados na bochecha e alheta do bordo oposto ao da atracação, operando no método “empurra-puxa”, enquanto outros dois rebocadores são posicionados com cabo passado na proa e na popa, puxando o navio para fora do berço e controlando sua velocidade de aproximação, que deve estar em um valor próximo de zero nós (ex: 0,15; 0,30 nós, dependendo do tipo de navio, tonelagem, condição de carregamento e construção do berço).

4. METODOLOGIA E APLICAÇÃO: Análise do potencial aumento de folga abaixo da quilha de um uso alternativo de rebocadores portuários nas manobras de navios.

4.1. Cenário da análise.

Ao final do capítulo 1 (Introdução), foi ventilada a hipótese de se utilizar um número maior de rebocadores portuários em assistência aos navios, com o fito de proporcionar uma redução nos seus valores de velocidade inicial e, por consequência, aumentar o parâmetro folga abaixo da quilha durante suas manobras, resolvendo dessa maneira, os seguintes objetivos propostos:

- i. Adequação de valores elevados de velocidade inicial dos navios mais modernos às limitações de velocidade impostas pelas normas da Autoridade Marítima Brasileira, em alguns portos nacionais;
- ii. Permitir o acesso de navios mais modernos que possuem velocidades iniciais na ordem de 8 nós ou mais em portos brasileiros, sem afetar a segurança da navegação, evitando a ocorrência de encalhe e ainda, minimizando custos de dragagem;
- iii. Aumentar a folga abaixo da quilha dos navios em trânsito, transformando este acréscimo em aumento de calado e, em consequência disso, incremento de capacidade para o armador.

Diante disso, a escolha do cenário para análise levou em consideração alguns aspectos:

- Um porto em que as normas da Autoridade Marítima impõem um valor de velocidade de trânsito maior do que o valor mínimo de velocidade das embarcações mais modernas;
- Um porto em que o valor de folga abaixo da quilha das manobras atuais possa ser reduzido através da redução da velocidade do navio;
- Um porto de exportação de carga, em que a grande parte das manobras de atracação ocorra com navios em lastro, e as desatracações ocorram com navio carregado.
- Um porto que receba sempre a mesma classe de navios em uma quantidade razoável, durante todos os meses.

Para cumprir com os objetivos acima, foi escolhido o cenário do porto do Rio de Janeiro, região do cais comercial, cujos canais de acesso e terminais são mostrados em detalhe na figura 20.



Figura 20: Vista aérea do Porto do Rio de Janeiro com a divisão dos terminais e dos canais de acesso ao terminal de contêineres e ao porto comercial.

Fonte: MARINHA DO BRASIL [5].

A análise levou em consideração a seguinte geografia e parâmetros inseridos no modelo:

- I. O canal de acesso possui aproximadamente quatro milhas de extensão entre as bóias 1 e 7 - em frente ao armazém número 8 (oito)⁸ – berço de atracação das manobras realizadas com o uso da ferramenta de análise. Existe um trecho retilíneo, de aproximadamente uma milha e meia de extensão, balizado por 2 pares de bóias laterais, marcando um banco de menor profundidade em frente a Ilha das Cobras e , do outro lado, profundidades inferiores a 11 metros, em frente a Ilha das Enxadas.
- II. As profundidades do canal em toda a extensão foram parametrizadas para o valor de 11 metros, para que não houvesse resultados erráticos de folga abaixo da quilha em virtude das diferenças de profundidade que existem no canal de acesso ao Porto do Rio de Janeiro. Apresenta-se abaixo na figura 21 um corte da carta náutica DHN 1512, da Diretoria de Hidrografia e Navegação (Marinha do Brasil), que ilustra o trecho do canal de acesso em que houve a parametrização de profundidades para 11 metros, e as regiões de profundidade que circundam o canal.

⁸ Este berço recebe navios graneleiros com 10,90 metros de calado máximo. De acordo com as normas da Autoridade Marítima, descritas em MARINHA DO BRASIL [5], o calado máximo de navios neste berço é 10,10 metros, podendo ser acrescido da altura da maré de enchente referida ao nível de redução da DHN, no instante da manobra, porém limitado a 10,90 metros.

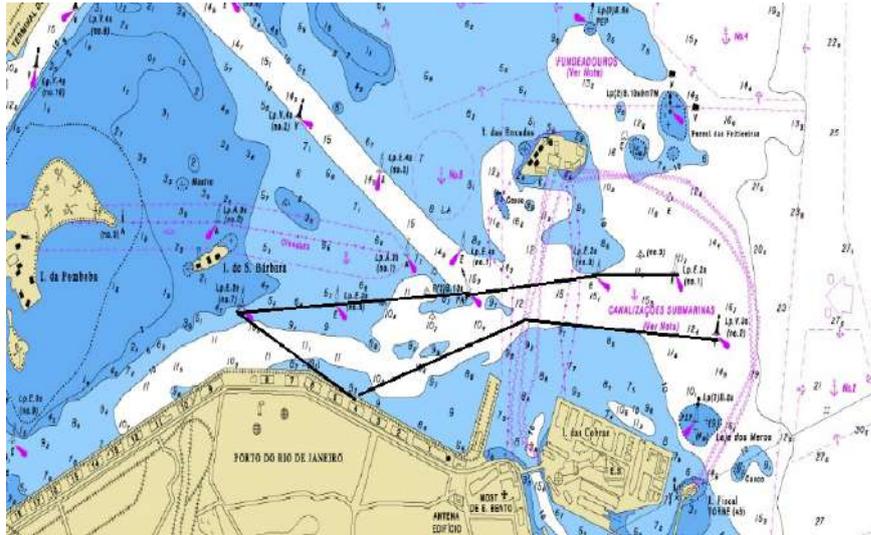


Figura 21: Trecho da carta náutica DHN 1512 com destaque para o canal de acesso ao Porto Comercial, com profundidades parametrizadas para 11 metros.

Fonte: Diretoria de Hidrografia e Navegação (imagem adaptada).

- III. A velocidade máxima de trânsito para o navio foi limitada a 7 nós, conforme restrição imposta nas Normas e Procedimentos da Capitania dos Portos do Rio de Janeiro, NPCP-RJ, e ilustrada na figura 1 desta dissertação;
- IV. Não houve cruzamentos e ultrapassagens com o navio, durante as manobras realizadas nesta análise, conforme restrições de espaço no canal de acesso, restrições estas também regulamentadas nas NPCP-RJ;
- V. As manobras foram programadas com o objetivo de se utilizar a mais alta maré de enchente (preamar) de forma a permitir que navios de maiores valores de calado permitidos para o porto, graneleiros com calados de 10,90 metros, pudessem navegar pelo canal de acesso e realizar manobras de atracação, com um valor mínimo admissível de folga abaixo da quilha que não comprometesse a segurança da navegação.

4.2. Ferramenta utilizada na análise: simulador de manobras em modelo matemático

As análises foram executadas em um simulador de manobras de propriedade do Instituto BZ de capacitação técnica, que possui uma licença de uso, e cuja modelagem matemática foi desenvolvida pela empresa Transas Marine, proprietária do software NTPro 5000®. Este software possui o cenário escolhido, o modelo de navio graneleiro a ser utilizado, modelos de rebocadores e, condicionantes ambientais próprias do porto do Rio de Janeiro.

São empregados alguns coeficientes hidrodinâmicos validados pela empresa proprietária do software NTPro 5000® na modelagem matemática deste simulador; algumas explicações concernentes a esta modelagem são mostradas a seguir

4.2.1. Modelagem do navio-tipo

Em simulação marítima, o termo navio-tipo é usado para descrever o modelo matemático da embarcação desenvolvida, necessária para simular o comportamento do navio. O banco de dados do navio-tipo contém os parâmetros e coeficientes hidrodinâmicos necessários para calcular o comportamento do navio no ambiente virtual-dinâmico.

Durante os testes para adequação dos dados extraídos da prova de mar do navio-tipo, são realizadas algumas manobras - testes que objetivam a obtenção de parâmetros a serem inseridos no modelo de navio-tipo dentro do simulador. Alguns destes testes são mostrados na tabela 1 abaixo:

Tabela 1: Lista de manobras obrigatórias realizadas durante a validação de dados do navio-tipo.

Item	Manobras realizadas para obtenção dos dados inseridos no simulador	Parâmetro do navio-tipo que se pretende obter.
1	<ul style="list-style-type: none"> • Velocidade em diferentes regimes de máquina • Parâmetros da curva de giro estabilizada em diferentes regimes de máquina • Manobras de Zig-Zag (10/10 e 20/20) • Manobras de Parada (“Crash stop”). • Manobras de Estabilidade Direcional 	Movimento do navio em águas profundas
2	<ul style="list-style-type: none"> • Curva de giro em águas rasas • Manobra de aceleração do navio em águas rasas <ul style="list-style-type: none"> • Manobra de desaceleração do navio em águas rasas, com propulsor parado (“coasting”). • Manobra de manutenção de velocidade do navio em águas rasas para obtenção dos valores de afundamento (Efeito Squat). 	Movimento do navio em águas rasas
3	<ul style="list-style-type: none"> • Manobra para determinação dos parâmetros de oscilação do navio com máquina parada; 	Movimento do navio em ondas

	<ul style="list-style-type: none"> • Manobra para determinar o efeito de balanço (“rolling”) e efeito de deriva em ondas com máquina parada e toda-força adiante. • Determinação dos parâmetros de movimento do navio fundeado; • Determinação dos parâmetros da operação em piloto automático. 	
4	<ul style="list-style-type: none"> • Determinação dos parâmetros do navio com vento incidente de través • Determinação dos movimentos do navio com máquinas paradas e vento incidente; • Determinação dos parâmetros de vento com o navio fundeado. 	Movimento do navio sob condições de vento
5	<ul style="list-style-type: none"> • Determinação dos parâmetros de movimento do navio com corrente uniforme incidente; • Determinação dos parâmetros de movimento do navio com corrente incidente de diferentes ângulos em relação ao aproamento do navio; 	Movimento do navio sob condições de corrente

A modelagem ocorre com equações diferenciais nos 6 graus de liberdade do navio (apresentados na figura 9). O modelo matemático do navio-tipo leva em consideração um conjunto de equações diferenciais, que são usadas para definir os parâmetros cinemáticos

do movimento do navio (ex: sistema de coordenadas centrado no navio, ângulos de trim⁹, pitch, etc), e os valores correspondentes de velocidade e aceleração.

São usados 2 sistemas de coordenadas : um centrado e fixado ao navio, e outro centrado e fixado em terra.

4.2.2. Modelagem das forças de vento

As componentes das forças de vento são definidas em 6 graus de liberdade como valores constantes, e com as componentes de rajadas de vento (quando houver). Estas componentes se transformam em 6 (seis) graus de liberdade quando atuam sobre a embarcação, caso esta sofra os movimentos de arfagem e caturro. As forças de vento atuando sobre o navio são modeladas a partir da velocidade do vento elevado ao quadrado e direção.

O comportamento do valor de intensidade e direção do vento inserido no simulador é linear com o tempo, e suas medições são feitas por interpolações dos valores, sob o domínio do tempo.

4.2.3. Modelagem das forças de corrente

Os componentes das forças de corrente são modelados nos 6 graus de liberdade, em coeficientes do perfil do casco submerso (derivados de testes com modelos reduzidos) para cada componente de força, e as forças são proporcionais ao valor da velocidade da corrente elevado quadrado, a direção da corrente e densidade da água do mar.

O comportamento do valor de intensidade e direção da corrente inserido no simulador é linear com o tempo, e suas medições são feitas por interpolações dos valores, sob o domínio do tempo.

⁹ Trim: Diferença entre calados de vante e de ré, expressa em metros (ou graus, as vezes). O trim pela popa (isto é, mais afundado na popa), é definido como trim positivo. Fonte: ABNT [1].

4.2.4. Modelagem das forças das ondas

As forças de ondas são computadas com precisão para todos os 6 graus de liberdade. A computação precisa da força de onda sobre o casco do navio durante a simulação é um dos pontos críticos na modelagem dinâmica, em conjunto com as forças de vento e corrente.

O comportamento do valor de altura e direção das ondas, inserido no simulador é linear com o tempo, e suas medições são feitas por interpolações dos valores, sob o domínio do tempo.

4.2.5. Modelagem das interações com fundo, bancos e navio-navio.

As forças que representam a interação com o fundo são modeladas por meio de coeficientes empíricos derivados de dados de testes, como uma fração da relação profundidade / calado, multiplicada pela velocidade do navio elevada ao quadrado.

O efeito Squat é calculado com base na fórmula de Romisch (1989), novamente citada abaixo e detalhada em PIANC [3], válida para canais irrestritos e também, aqueles com restrição lateral.

$$S_{b,R} = C_V \cdot C_F \cdot K_{\Delta T} \cdot T - \text{Squat pela proa do navio}$$

$$S_{s,R} = C_V \cdot K_{\Delta T} \cdot T - \text{Squat pela popa do navio}$$

Onde:

C_V = Fator de correção para a velocidade do navio;

Calculado por : $C_V = 8 (V / V_{\text{critica}})^2 \cdot [(V / V_{\text{cr}} - 0,5)^4 + 0,0625]$

C_F = Fator de correção para o formato do navio;

Calculado por : $C_F = (10 C_B / L_{pp} / B)^2$

$K_{\Delta T}$ = Fator de correção para Squat na velocidade crítica.

Calculado por: $K_{\Delta T} = 0,155 \cdot \sqrt{h / T}$

Os efeitos de interação com bancos e navio-navio são modelados utilizando 12 (doze) ou mais pontos dos vetores de pressão distribuídos ao longo de todo o casco com mudança de seus valores, se a configuração do canal ou do banco se altera durante a trajetória da embarcação (o que pode provocar novos valores para as forças).

4.3. Modelos de navio-tipo e de rebocador utilizados

O navio-tipo utilizado nas análises, cujas principais características são mostradas na tabela 2 abaixo, foi um graneleiro com dimensões de projeto muito próximas aquelas dos navios que realizam as manobras no Porto do Rio de Janeiro.

Tabela 2: Características do navio-tipo usado nas simulações

Tipo de navio	TPB	Deslocamento ¹⁰ carregado (t.m.)	Comprimento (m)	Boca (m)	Calado (m)	Tipo de Propulsão
Graneleiro Classe "Panamax"	65.000	64062	225.0	32.3	10.90	Passo Fixo

Adicionalmente ao navio-tipo, foram considerados modelos de rebocadores de propulsão azimutal de popa (ASD), com 40 toneladas de tração estática cada um, com características principais mostradas na tabela 3. Estas características apresentam bastante

¹⁰ Deslocamento de um navio: peso total real do navio (geralmente em toneladas métricas), variável de acordo com a tonelage de carga embarcada. Fonte: ABNT [1].

similaridade com os rebocadores portuários utilizados nas manobras reais de graneleiros de 10,90 metros de calado, no Cais Comercial do Rio de Janeiro.

Tabela 3: Características do rebocador usado nas simulações

Tipo de Rebocador	Tipo de propulsão	Tonelagem de Tração Estática (ton)	Comprimento (m)	Boca (m)	Calado (m)
Azimutal de Popa (ASD)	2 propulsores azimutais de passo controlável	40	26,10	8,9	3,3

O cálculo do número de rebocadores necessários para a manobra de determinado navio-tipo é resultado de estudos e projetos de dimensionamento de rebocadores, de acordo com o porto analisado, conforme exemplificado no trabalho de TEJADA [4], que apresentou um projeto de dimensionamento de rebocadores escort, para o novo Canal do Panamá.

4.4. Condições ambientais utilizadas para análise

4.4.1. Regime de marés

Consoante leciona MIGUENS [26], maré é a oscilação vertical da superfície do mar ou outra grande massa d'água sobre a Terra, causada primariamente pelas diferenças de atração gravitacional entre o planeta Terra e a Lua (em maior extensão), e também entre a Terra e o Sol (em menor extensão).

Existem basicamente dois tipos de marés em portos: semidiurnas, em que existirão duas marés com altura máxima (denominadas preamares), e duas marés com altura mínima (denominadas baixa-mares); e também as marés de desigualdades diurnas, em que haverá no porto duas ou mais preamares e duas ou mais baixa-mares por dia. O regime de marés do porto analisado segue o padrão de desigualdades diurnas, variando conforme o tipo de maré: sizígia ou quadratura.

Utilizou-se o relatório de campanha de medição de marés feito pela empresa Petrobrás, em PETROBRÁS [27], para conhecimento dos máximos valores de marés no Porto do Rio de Janeiro, sendo o resultado disposto na tabela 4, mostrada a seguir:

Tabela 4: Características de marés analisadas nas simulações.

Característica	Valores (metros)
Máxima maré astronômica e maré atmosférica	2,55
Máxima maré astronômica	2,01
Altura máxima na maré de sizígia	1,37
Altura mínima na maré de sizígia	0,11
Nível médio do mar	0,68

Fonte: PETROBRÁS [27].

Consoante já explicado, as manobras analisadas foram realizadas sempre próximas a mais alta maré de enchente (preamar), adequando o valor do calado do navio-tipo (10,90

metros) as restrições impostas pela Autoridade Marítima descritas em MARINHA DO BRASIL [5].

A figura 22 mostrada abaixo representa a condição de altura de maré imposta nas simulações e pode ser interpretada da seguinte maneira: nos primeiros 30 minutos de simulação, a maré estava enchendo de uma altura de um metro e meio, até atingir o estofo de maré¹¹ com altura de dois metros; esta condição está condizente com a máxima altura de maré astronômica mostrada na tabela 4, extraída do relatório PETROBRÁS [24].



Time	Tide (m)
00:00:00	1.5
00:30:00	2.0
<Add new>	

Figura 22: Condição de altura de marés inseridas nas simulações.

4.4.2. Correntes de maré

No estudo dos componentes das forças geradoras de maré, verifica-se que as correntes de maré geram o movimento horizontal da massa líquida que resultará no movimento vertical do nível do mar (marés). Dessa forma, conforme ensina MIGUENS [26], é necessário que se entenda que existe uma coexistência entre marés e correntes de maré: são as correntes de maré responsáveis pela elevação (maré de enchente) ou redução (maré de vazante) no nível do mar nos portos.

Dada esta afinidade entre os dois elementos, de acordo com MIGUENS [26], é possível relacionar a velocidade e a direção da corrente de maré, as horas de estofo de

¹¹ ESTOFO DE MARÉ: Período durante o qual o nível do mar fica praticamente estacionado. Pode ser estofo de enchente ou de vazante. MIGUENS [26].

maré (preamar – maré mais alta; baixamar – maré mais baixa). De forma geral, os horários de estofo de maré possuem valores mínimos de corrente de maré, já que representam os momentos de inflexão de nível do mar. Apenas para exemplificação, em uma maré de enchente, o nível do mar enche, com a corrente de maré diminuindo seu valor até que a altura de maré atinge o valor máximo, e a corrente de maré atinge o valor mínimo. Adicionalmente, os horários de maiores velocidades de correntes de marés coincidem com os momentos próximos do valor médio entre a baixa-mar e a preamar.

Em relação às velocidades de correntes de maré inseridas nas análises, e, diante da explicação acima, considerando que as manobras ocorreram sempre próximas a preamar, a corrente inserida nas simulações possuiu um valor próximo de zero, representando um valor mínimo de corrente de maré próximo de um estofo de maré de enchente.

Na análise das direções predominantes, após leitura e interpretação dos resultados do relatório PETROBRÁS [27], verificou-se que predominam as direções nordeste (NE) – para as condições de marés de vazante – e sul (S) - para as condições de marés de enchente - na região da Baía de Guanabara, cuja região do Cais Comercial do Rio de Janeiro está englobada. Estas direções podem ser representadas pela figura 21 retirada do relatório, onde os pontos azuis indicam os vetores de corrente medidos no período analisado.

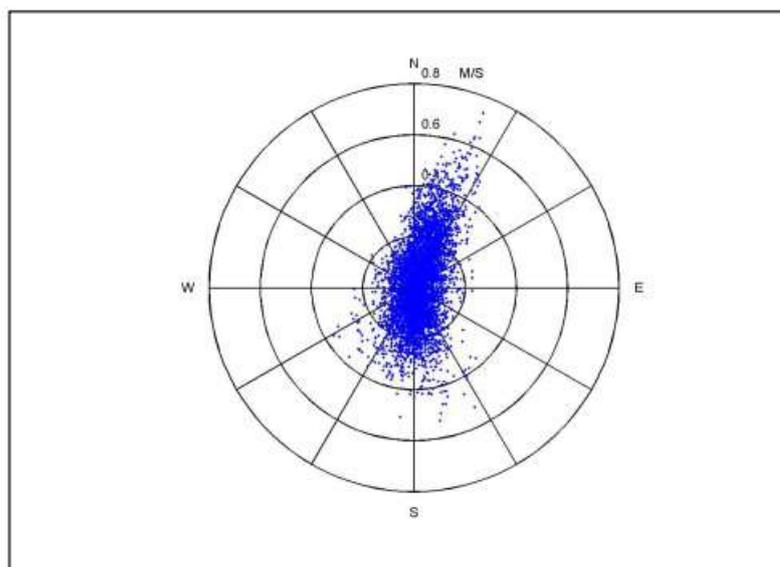


Figura 23: Imagem representando as direções predominantes das medições de corrente, durante a campanha de medição de correntes de maré.

Fonte: PETROBRÁS [27].

Diante do exposto, a figura 23 representa a condição de correntes de maré inserida nas análises e pode ser interpretada da seguinte maneira: nos primeiros 30 minutos de simulação, a velocidade da corrente decresce de 0,5 (meio) nó para 0,2 (dois décimos) nós; a redução deste valor coincide com o intervalo de tempo necessário para o estofa de maré de enchente ocorre. A direção é representada pelo valor 180° (cento e oitenta graus), o que representa a direção sul, significando uma condição de maré de enchente.

Time	Current (knt)	Direction (°)
00:00:00	0.5	180.0
00:30:00	0.2	180.0
<Add new>		

Figura 24: Valores de velocidade e direção de corrente de maré representada nas simulações.

4.4.3. Regime de ventos

O porto utilizado na análise possui ventos predominantes de 0 (zero) até 15 nós de intensidade, e direção predominante de noroeste (NW) ou sudoeste (SW). Apenas para explicação mais detalhada: 0 (zero) nós representa o vento de “calmaria” (0 - Escala Beaufort), e 15 (quinze) nós representa o vento “moderado” (4 – Escala Beaufort), de acordo com MIGUENS [26].

Foram analisados os valores de vento de 0 (zero) até 15 nós de intensidade, proveniente da direção noroeste (NW), por se tratar da pior condição a manutenção do controle do navio no canal de acesso e manobras de atracação. O valor de 15 nós representa um valor limitante para as manobras de atracação neste porto, em razão da largura do canal em relação a boca do navio-tipo e espaço disponível para o navio navegar com segurança no canal de acesso, de acordo com normas da praticagem do Rio de Janeiro.

4.4.4. Ondas

O regime de ondas do porto analisado apresenta mar de vagas que são, de acordo com MIGUENS [26], ondas formadas por vento presente; por isto, a direção das ondas acompanha a direção do vento presente, ou seja, as ondas originam-se da direção noroeste (NW) e se propagam na direção sudeste (SE).

As ondas possuem períodos variando de 7 a 14 segundos de formação entre cristas, e períodos de retorno de 1, 10, 20, 30, 50 e 100 segundos.

As análises utilizaram os resultados obtidos do relatório PETROBRÁS [27], e apresentados na tabela 5 abaixo. A linha denominada “VALORES MÉDIOS” representam os valores de média aritmética de altura de onda nos diferentes períodos (7 a 14 segundos). Todos os valores são dados em metros.

Tabela 5: Valores de altura de onda (em metros) na região da Baía de Guanabara, e indicação de valores médios.

Tr / Tp (s)	<u>7</u>	<u>8</u>	<u>9</u>	<u>10</u>	<u>11</u>	<u>12</u>	<u>13</u>	<u>14</u>
1	0,22	0,30	0,66	0,40	0,51	0,67	0,99	1,07
10	0,25	0,35	0,77	0,46	0,60	0,83	1,29	1,48
20	0,26	0,36	0,80	0,48	0,62	0,86	1,37	1,59
30	0,26	0,37	0,82	0,49	0,63	0,88	1,42	1,65
50	0,26	0,38	0,84	0,50	0,64	0,91	1,47	1,73
100	0,27	0,39	0,86	0,51	0,66	0,94	1,54	1,83
<u>VALORES MÉDIOS (m)</u>	<u>0,25</u>	<u>0,35</u>	<u>0,79</u>	<u>0,47</u>	<u>0,61</u>	<u>0,85</u>	<u>1,35</u>	<u>1,55</u>

Fonte: PETROBRÁS [27].

4.4.5 Mapa das condições ambientais analisadas para obtenção dos valores de folga abaixo da quilha

Diante das condições ambientais apresentadas nos itens 3.4.3 e 3.4.4, gerou-se a tabela 6, a partir dos valores de vento (zero até 15 nós), integrados com as condições de ondas, dado que os valores de marés e corrente de marés foram fixados consoante explicação nos itens 3.3.1 e 3.3.2.

Tabela 6: Quadro-resumo das condições ambientais utilizado na análise.

Condição da Onda / Veloc. Do Vento	Cond.1	Cond.2	Cond.3	Cond.4	Cond.5	Cond.6	Cond.7	Cond.8
Altura (m):	0,25	0,35	0,79	0,47	0,61	0,85	1,35	1,55
Período								

	(s): 7	(s): 8	(s) 9	(s) 10	(s) 11	(s) 12	(s) 13	(s) 14
Vento (nós): 0 ↓ 15	Valores encontrados de Folga Abaixo da Quilha (em metros) , de acordo com o número de rebocadores, a partir das simulações realizadas.							

4.5. Simulações e Resultados

As manobras deste estudo de caso focaram em analisar a pior condição para afundamento do navio em velocidade, devido aos efeitos apresentados e explicados no capítulo 1 (squat, afundamento em ondas e inclinação dinâmica), para um porto de exportação de carga a granel.

Em vista disso, foram realizadas simulações de manobras de atracação do navio-tipo e rebocadores, sob os diferentes cenários ambientais apresentados na tabela 6.

Ressalta-se que o cenário do estudo foi um canal de acesso modelado com uma profundidade única de 11 metros em toda a sua extensão até a região do berço de atracação, evitando que diferentes valores de profundidades do canal de acesso ao porto do Rio de Janeiro levassem a resultados erráticos de folga abaixo da quilha.

Para efeito de simplificação e melhoria da compreensão dos resultados, as condições ambientais da tabela 6 foram renomeadas para condição de ondas (variando de 1 até 8) *versus* condição de vento (variando de 0 até 15). Dessa forma, a condição denominada, por exemplo, “4.10”, significa a condição 4 de mar – ondas de 0,47 metros e período de 10 segundos – e vento de 10 nós.

4.5.1. Valores de folga abaixo da quilha nas manobras com 2 rebocadores, e velocidades médias de 6 nós.

Para obtenção dos valores mínimos de folga abaixo da quilha com a utilização de 2 rebocadores, foram realizadas 90 simulações de manobras de atracação do navio-tipo, nas condições ambientais descritas na tabela 6 deste trabalho.

Todas as simulações foram realizadas com o navio-tipo navegando no piloto automático até próximo do berço de atracação; ou seja, não foi empregado fator humano nas manobras, para compensar as forças de vento, corrente e ondas e atuação destas no navio-tipo.

Cada simulação com 2 rebocadores durou em média de 20 a 40 minutos; as simulações se realizaram com o navio-tipo navegando a uma velocidade média em torno de 6 nós , dentro do canal de acesso (próximo das bóias 1 e 2), sem o auxílio de rebocadores. As condições foram impostas para que o navio-tipo reduzisse sua velocidade para 5 nós, apenas para que os rebocadores se aproximassem e amarrassem os cabos ao navio-tipo. Este é um valor seguro de velocidade preconizado por IMO [20] e HENSEN [2], que o navio-tipo deve ter para os rebocadores fazerem esta aproximação e minimizar os efeitos indesejáveis de interação navio – rebocador, que podem ser causa de acidentes.

A tabela 7 a seguir apresenta os valores mínimos de folga abaixo da quilha obtidos após todas as 90 (noventa) simulações realizadas com 2 (dois) rebocadores:

Tabela 7: Valores mínimos (em metros) encontrados de folga abaixo da quilha nas simulações com 2 rebocadores.

Onda / Veloc. Do Vento (nós)	Cond.1	Cond.2	Cond.3	Cond.4	Cond.5	Cond.6	Cond.7	Cond.8
	Altura (m):	Altura (m):	Altura (m):	Altura (m):	Altura (m):	Altura (m):	Altura (m):	Altura (m):
	0,25	0,35	0,79	0,47	0,61	0,85	1,35	1,55
	Período (s):	Período (s):	Período (s)	Período (s)	Período (s)	Período (s)	Período (s)	Período (s)
	7	8	9	10	11	12	13	14
0	0,487	0,485	0,467	0,717	0,574	0,707	0,692	0,699
1	0,498	0,467	0,463	0,692	0,588	0,723	0,667	0,718
2	0,522	0,489	0,522	0,723	0,687	0,729	0,682	0,741
3	0,567	0,488	0,560	0,747	0,652	0,741	0,679	0,727
4	0,502	0,492	0,501	0,762	0,723	0,737	0,613	0,732
5	0,490	0,462	0,522	0,720	0,774	0,716	0,603	0,720
6	0,515	0,457	0,489	0,763	0,778	0,723	0,627	0,739
7	0,517	0,468	0,499	0,759	0,798	0,709	0,653	0,728
8	0,505	0,472	0,472	0,789	0,789	0,672	0,647	0,735
9	0,501	0,489	0,479	0,770	0,752	0,668	0,659	0,742
10	0,498	0,561	0,463	0,723	0,789	0,626	0,664	0,738
11	0,487	0,582	0,458	0,784	0,780	0,675	0,688	0,731
12	0,492	0,438	0,461	0,763	0,761	0,687	0,672	0,769
13	0,499	0,440	0,453	0,781	0,779	0,654	0,637	0,758
14	0,501	0,431	0,452	0,792	0,753	0,702	0,642	0,780
15	0,523	0,440	0,440	0,712	0,749	0,716	0,635	0,798

Para cada simulação, são obtidos em uma planilha, dados dos valores de folga abaixo da quilha no domínio do tempo, em intervalos de tempo regulares de 10 (dez) em 10 (dez) segundos.

A seguir serão explicadas, dentre estas 90 análises, aquelas que levaram aos menores e maiores resultados de folga mínima abaixo da quilha, com as suas respectivas condições ambientais:

i. Valor mínimo de folga abaixo da quilha: 0,431 metros - condição "2.14"

➤ Condição ambiental:

Ondas: 0,35 metros de altura / período de 8 segundos / Direção: NW para SE

Vento: proveniente de NW / 14 nós

➤ Tempo total de simulação: 19,5 minutos.

➤ Velocidade média do navio: 6,4 nós.

➤ Velocidade com que os rebocadores amarraram os cabos no navio: 4,5 nós

➤ Na aproximação do berço de atracação, o navio teve sua velocidade reduzida para 2 a 3 nós, reduzindo este valor para 1nó para posterior giro na bacia de evolução.

➤ A figura 25 apresenta um gráfico representativo das medições de folga abaixo da quilha e do decréscimo de velocidade no domínio do tempo.

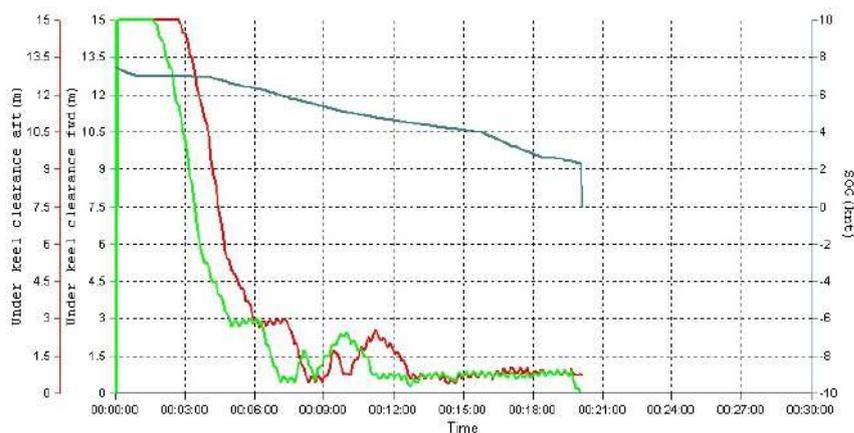


Figura 25: Variação dos valores de folga abaixo da quilha e velocidade do navio no domínio do tempo, de acordo com os valores obtidos na manobra com 2 rebocadores na condição “2.14”.

Fonte: Transas Marine / Instituto BZ.

A premissa nesta fase inicial de coleta de dados é que os rebocadores não serão utilizados para reduzir a velocidade do navio-tipo; sua atuação junto ao navio ocorre apenas no controle do seu aproamento e manutenção do seu curso retilíneo no canal de acesso.

Verificou-se pela geometria do canal de acesso que a onda incide no navio com um ângulo de 45° pela sua bochecha¹² de boreste¹³, o que causa um desvio no curso do navio para bombordo¹⁴ do canal de acesso.

Após análise da tabela 7, verifica-se que os valores de folga abaixo da quilha encontrados decrescem conforme a condição de mar fica menos severa, isto é, quanto menor a altura e períodos da onda incidente no navio, menores serão os valores encontrados. Isto pode ser identificado facilmente pelos dados obtidos nas condições “1”,

¹² Bochecha é a parte curva do costado de um e outro bordo, junto a roda de proa. Fonte: FONSECA [28].

¹³ Boreste é parte a direita do navio, supondo um observador situado no plano diametral e olhando para a proa. Fonte: FONSECA [28].

¹⁴ Bombordo é a parte a esquerda do navio, supondo um observador situado no plano diametral e olhando para a proa. Fonte: FONSECA [28].

“2” e “3”, cujos valores encontrados são bem inferiores aos das condições “7” e “8” (condições mais severas de mar). Atribui-se a esta redução o fato do navio-tipo ter o seu curso retilíneo menos perturbado no canal de acesso quando a onda incidente tiver menores alturas e períodos.

Dessa forma, se ele consegue manter o curso no canal sem maiores perturbações da onda incidente, o navio navegará com uma velocidade mais próxima da velocidade pré-estabelecida (6 nós), fato que aumentará seus valores de afundamento devido a squat e ondas, consoante explicações do capítulo 2 deste trabalho.

Apresenta-se a figura 26 a seguir, que mostra a trajetória percorrida pelo navio-tipo na manobra de 2 rebocadores na condição “2.14”. Nota-se que o navio percorre uma trajetória retilínea no rumo de aproximação pelo canal, faz uma guinada para bombordo (bordo esquerdo) da sua trajetória para adentrar na área mais abrigada do porto, e, já neste local, percorre novamente uma trajetória retilínea.

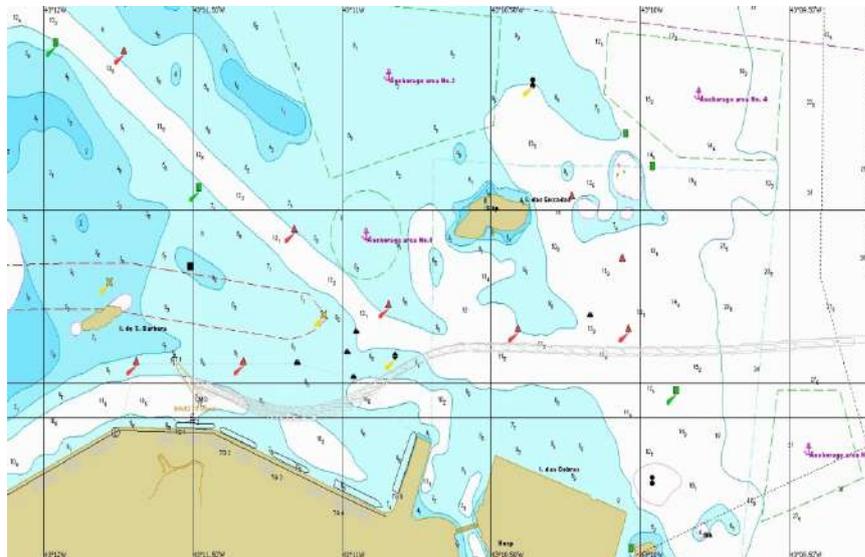


Figura 26: Trajetória percorrida pelo navio-tipo durante a manobra com 2 rebocadores na condição “2.14”. Fonte: Transas Marine / Instituto BZ.

ii. Valor máximo de folga abaixo da quilha: 0,798 metros - condição "8.15".

➤ Condição ambiental:

Ondas: 1,55 metros de altura / período de 14 segundos / Direção: NW para SE

Vento: proveniente de NW / 15 nós

➤ Tempo total de simulação: 39 minutos.

➤ Velocidade média do navio: 5,7 nós.

➤ Velocidade com que os rebocadores amarraram os cabos no navio: 4,5 nós

➤ Na aproximação do berço de atracação, o navio teve sua velocidade reduzida para 2 a 3 nós, reduzindo este valor para 1 nó para posterior giro na bacia de evolução.

➤ As figuras 27 e 28 abaixo apresentam, respectivamente, os gráficos representativos gerados a partir dos valores de folga abaixo da quilha e velocidade do navio, em função do tempo de manobra, e a planilha gerada com os dados contabilizados.

Fica perceptível que a redução da velocidade foi menos intensa que no caso "2.14", o que levou a um dado encontrado equivalente a quase o dobro do menor valor, comentado no item (i).

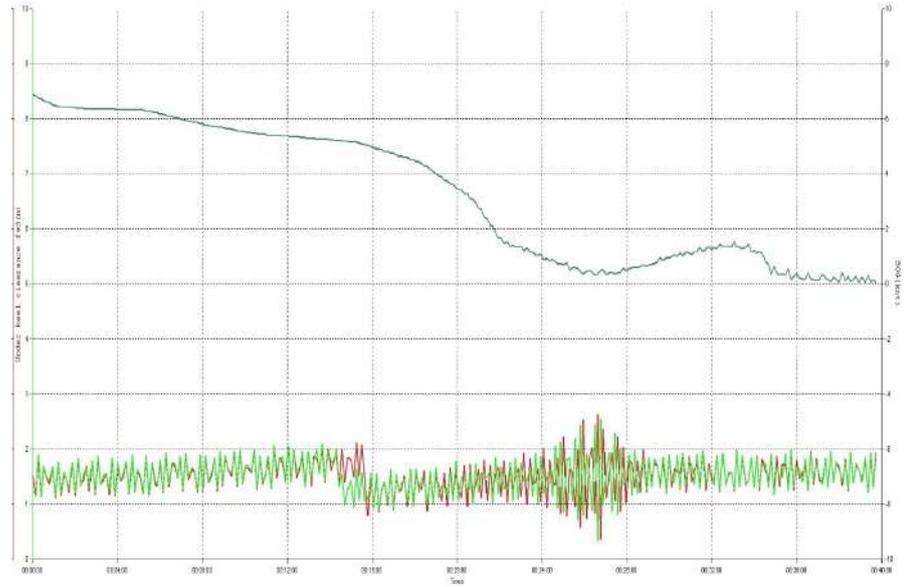


Figura 27: Variação dos valores de folga abaixo da quilha e velocidade do navio no domínio do tempo, de acordo com os valores obtidos na manobra com 2 rebocadores na condição “8.15”. Fonte: Transas Marine / Instituto BZ.

Time	Under keel clearance aft (m)	Under keel clearance fwd (m)	SDG (knt)	Exercise start time:	12:00:00
0:00:00	0	0	6.896	Begin time:	12:00:00
0:00:10	1.686	1.802	6.843	Time end:	12:39:50
0:00:20	1.43	1.404	6.788	Time step:	0:00:10
0:00:30	1.121	1.112	6.716		
0:02:30	1.592	1.677	6.363		
0:02:40	1.775	1.75	6.345		
0:03:40	1.652	1.74	6.35		
0:06:20	1.451	1.512	6.117		
0:06:30	1.205	1.22	6.101		
0:07:50	1.537	1.583	5.865		
0:08:00	1.867	1.888	5.804		
0:10:10	1.474	1.54	5.534		
0:10:20	1.878	1.910	5.478		
0:11:40	1.716	1.839	5.378		
0:13:40	1.32	1.384	5.26		
0:14:30	1.887	1.8	5.183		
0:14:40	1.937	1.525	5.191		
0:16:40	0.924	0.955	4.833		
0:17:40	1.643	1.627	4.57		
0:17:50	1.177	1.103	4.323		
0:19:00	1.284	1.106	4.048		
0:22:40	1.034	1.577	1.5		
0:24:30	1.212	2.031	0.9		
0:24:40	2.066	1.208	0.773		
0:24:50	1.536	1.047	0.798		
0:25:00	0.798	2.082	0.798		
0:25:10	1.804	1.702	0.604		

Figura 28: Trecho da planilha de dados (Excel) mostrando os valores obtidos de folga abaixo da quilha e velocidade do navio, no domínio do tempo: manobra com 2 rebocadores, na condição “8.15”. Fonte: Transas Marine / Instituto BZ.

Em oposição ao resultado mostrado em (i), o maior resultado mostrado na tabela 7 ocorreu na condição “8.15”. A velocidade média desta manobra foi reduzida para algo em

torno de 5,7 nós. Esta redução causou uma redução do efeito squat e uma redução do efeito do afundamento em ondas, explicados no capítulo 2.

Nesta simulação, o navio possuiu uma trajetória menos retilínea no canal de acesso a área portuária, sendo mais afetado pela condição de ondas e vento mais severos. A cada alteração de curso que o navio realiza no canal de acesso, na tentativa de evitar as áreas rasas adjacentes, e posterior encalhe, há redução da sua velocidade longitudinal, o que, por consequência, reduz o efeito Squat e o efeito de afundamento do navio em ondas. A figura 29 apresenta a trajetória descrita pelo navio na manobra em questão, com a direção relativa do mar e vento, demonstrando uma angulação incidente de aproximadamente 30° a 45° com o curso do navio no canal.



Figura 29: Trajetória percorrida pelo navio durante a manobra com 2 rebocadores, na condição "8.15".Fonte: Transas Marine / Instituto BZ.

Em acréscimo a explicação acima, o valor elevado de intensidade do vento nesta manobra – 15 nós – em conjunto com sua direção relativa de incidência no navio - aproximadamente 30° com o proa do navio em grande parte do canal de acesso – faz com que haja aumento da resistência ao avanço do navio, conforme ensina LARSSON,

et al [29]. Este aumento de resistência ao avanço faz com que a redução de velocidade do navio seja mínima, resultando em valores mínimos de afundamento devido a efeito Squat e ondas.

4.5.2. Valores de folga abaixo da quilha nas manobras com 5 rebocadores, e velocidades médias de 3 a 4 nós.

Para obtenção dos valores mínimos de folga abaixo da quilha com a utilização de 5 rebocadores, foram realizadas outras 90 simulações de manobras de atracação do navio-tipo, nas condições ambientais descritas já especificadas.

Cada simulação com 5 rebocadores durou em média de 50 minutos a 1 hora, já que navio-tipo navegou a uma velocidade média em torno de 3 a 4 nós , dentro do canal de acesso (próximo das bóias 1 e 2), com auxílio total dos rebocadores. Conforme já explicado no item 3.4.1, para que os rebocadores amarrassem os cabos ao navio-tipo, este teve sua velocidade reduzida para 5 nós, consoante HENSEN [2] e IMO [20]. A partir deste momento, como pode ser visualizado na figura 28, retirada de uma das simulações, os rebocadores passam a rebocar o navio a uma velocidade próxima de 3 a 4 nós, segundo o método combinado, explicado no item 2.3 deste trabalho.

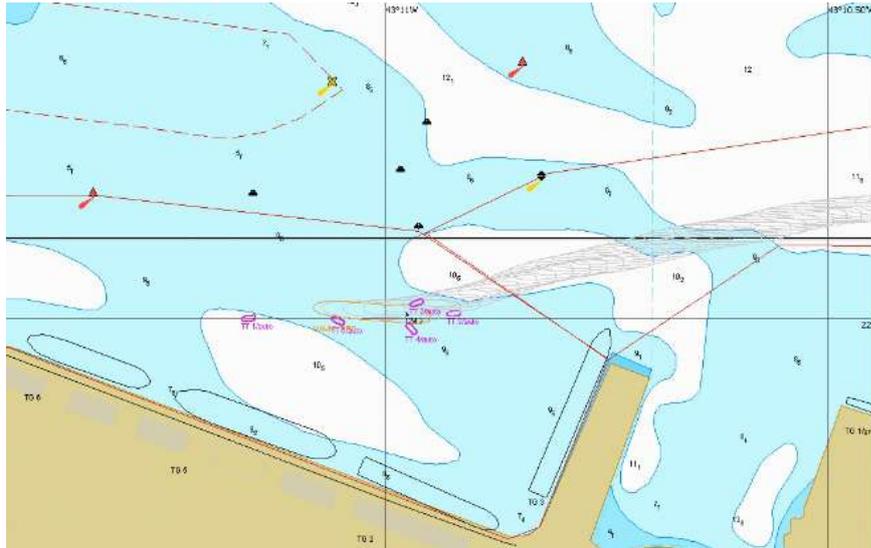


Figura 30: Imagem aérea da manobra com 5 rebocadores, na condição “3.10”.
Fonte: Transas Marine / Instituto BZ.

A figura 30 acima apresenta um dos dispositivos de amarração dos cinco rebocadores usados com o navio-tipo; a imagem aérea desta simulação foi tirada de uma posição em que o navio se encontra bem próximo da área portuária. Os objetivos deste dispositivo de rebocadores são os seguintes:

- 1 rebocador na proa, operando com cabo longo (método europeu) : para auxiliar o navio na manutenção do seu curso no canal de acesso;
- 1 rebocador na alheta¹⁵ de boreste, operando no costado (método americano) com cabo curto : para auxiliar o navio durante a navegação no canal, e produzir forças de frenagem para manter a velocidade do navio próxima de 3 a 4 nós; durante a atracação, este rebocador auxilia no método “empurra-puxa”;
- 1 rebocador na popa, operando com cabo longo (método europeu): para produzir ao navio forças de frenagem durante a navegação pelo canal de

¹⁵ Alheta é a parte curva do costado, de um bordo ou de outro, junto à popa. Fonte: FONSECA [28].

acesso, assim como produzir forças de governo na manutenção do seu curso retilíneo no canal;

- 1 rebocador na alheta de bombordo , operando no costado (método americano) com cabo curto: para auxiliar o navio na manutenção do seu curso durante a navegação no canal; durante a atracação, este rebocador auxilia no método “empurra-puxa”.
- 1 rebocador na bochecha de bombordo, operando no costado (método americano) com cabo curto: para produção de forças de frenagem para manter a velocidade do navio próxima de 3 a 4 nós; durante a atracação, este rebocador opera no método “empurra-puxa”.

É importante a declaração de que este dispositivo é apenas um exemplo de utilização de 5 rebocadores, podendo outros tipos de dispositivos serem usados para o mesmos propósitos de controle de velocidade do navio-tipo e manutenção do curso retilíneo no canal de acesso. A tabela 8 a seguir apresenta os valores mínimos de folga abaixo da quilha obtidos após todas as 90 (noventa) simulações realizadas com 5 rebocadores:

Tabela 8: Valores mínimos (em metros) encontrados de folga abaixo da quilha nas simulações com 5 rebocadores.

Onda / Veloc. Do Vento (nós)	Cond.1	Cond.2	Cond.3	Cond.4	Cond.5	Cond.6	Cond.7	Cond.8
	Altura (m):	Altura (m):	Altura (m):	Altura (m):	Altura (m):	Altura (m):	Altura (m):	Altura (m):
	0,25	0,35	0,79	0,47	0,61	0,85	1,35	1,55
	Período (s):	Período (s):	Período (s)	Período (s)	Período (s)	Período (s)	Período (s)	Período (s)
	7	8	9	10	11	12	13	14
0	0,749	1,074	1,003	1,063	1,044	0,932	0,807	0,776
1	0,781	1,088	1,012	1,084	1,038	0,957	0,812	0,787

2	0,698	1,069	1,029	1,079	1,032	0,969	0,813	0,791
3	0,724	1,070	1,018	1,088	1,021	0,978	0,819	0,774
4	0,763	1,043	1,017	1,082	1,029	0,991	0,817	0,781
5	0,601	1,065	1,013	1,086	1,019	0,997	0,815	0,785
6	0,698	1,054	1,020	1,073	1,038	0,969	0,839	0,787
7	0,789	1,095	1,031	1,077	1,031	0,987	0,829	0,789
8	0,942	1,099	1,027	1,080	1,049	0,961	0,845	0,780
9	0,957	1,071	1,017	1,081	1,051	0,959	0,879	0,791
10	1,140	1,076	1,023	1,076	1,056	0,956	0,841	0,788
11	1,102	1,051	1,019	1,089	1,047	0,949	0,849	0,791
12	1,154	1,039	1,021	1,110	1,029	0,952	0,853	0,811
13	1,110	1,011	1,028	1,117	1,013	0,955	0,929	0,805
14	1,218	1,024	1,009	1,113	1,028	0,959	0,957	0,817
15	1,168	1,004	1,002	1,149	1,009	0,956	0,960	0,819

Da mesma forma que nas primeiras 90 simulações realizadas, foram gerados novos dados (também em planilhas) de folga abaixo da quilha e velocidade, em intervalos de tempo regulares de 10 (dez) em 10 (dez) segundos.

Nota-se que, para a mesma condição de mar (a exceção da condição “1”), as manobras com 5 rebocadores apresentam dados de folga abaixo da quilha muito próximos uns dos outros. Isto se deve ao fato de não ter havido muitas diferenças de velocidade média do navio, e este ter seguido um curso quase retilíneo no canal de acesso, evitando interação com as regiões rasas adjacentes a ele. Este controle no governo do navio no canal de acesso, na maior parte do tempo, foi possível pela inclusão de um número maior de rebocadores.

A condição “1” de mar (ondas de 0,25 metros de altura e 7 segundos de período) apresentou o menor e o maior valor de toda a tabela 8. Apresentam-se abaixo os comentários para as diferenças nos valores obtidos:

i. Valor mínimo de folga abaixo da quilha: 0,601 metros - condição “1.5”

➤ Condição ambiental:

Ondas: 0,25 metros de altura / período de 7 segundos / Direção: NW para SE

Vento: proveniente de NW / 5 nós

➤ Velocidade média do navio no canal de acesso: 3,8 nós.

➤ Velocidade com que os rebocadores amarraram os cabos no navio: 4 nós

➤ A figura 31 apresenta um gráfico representativo das medições de folga abaixo da quilha e do decréscimo de velocidade do navio-tipo, na manobra que durou em torno de 51 minutos.

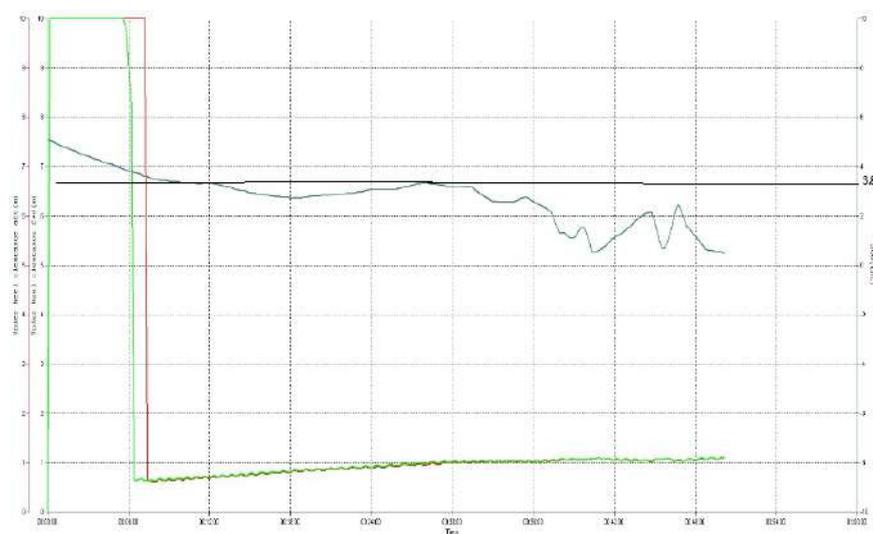


Figura 31: Variação dos valores de folga abaixo da quilha e velocidade do navio no domínio do tempo, de acordo com os valores obtidos na manobra com 5 rebocadores na condição “1.5”. Fonte: Transas Marine / Instituto BZ.

- A figura 32 apresenta a imagem com a trajetória do navio-tipo pelo canal de acesso na manobra com 5 rebocadores e na condição “1.5”: nota-se que o curso seguido do navio no canal não foi retilíneo, e para evitar que o navio se aproximasse das margens ou encalhasse, os rebocadores tiveram que atuar no controle do curso e manutenção da sua velocidade próxima de 4 nós.

Ainda na figura 30, explica-se que o trecho marcado de linhas vermelhas representa a faixa do canal que foi aprofundado para a cota única de 11 metros; os valores de folga abaixo da quilha são contabilizados a partir da entrada do navio-tipo no 1º par de bóias. Este foi o local que o navio-tipo reduziu sua velocidade para que os rebocadores se aproximassem e amarrassem os cabos de reboque.



Figura 32: Trajetória percorrida pelo navio-tipo durante a manobra com 5 rebocadores, na condição “1.5”, com a representação da direção e intensidade do vento e ondas. Fonte: Transas Marine / Instituto BZ.

- ii. Valor máximo de folga abaixo da quilha: 1,218 metros - condição “1.14”
- Condição ambiental:

Ondas: 0,25 metros de altura / período de 7 segundos / Direção: NW para SE

Vento: proveniente de NW / 14 nós

- Velocidade média do navio no canal de acesso: 2,2 nós.
- Velocidade com que os rebocadores amarraram os cabos no navio: 4 nós
- A figura 33 apresenta um gráfico representativo das medições de folga abaixo da quilha e do decréscimo de velocidade do navio-tipo. O tempo de manobra foi de aproximadamente 70 minutos (1 hora e 10 minutos).

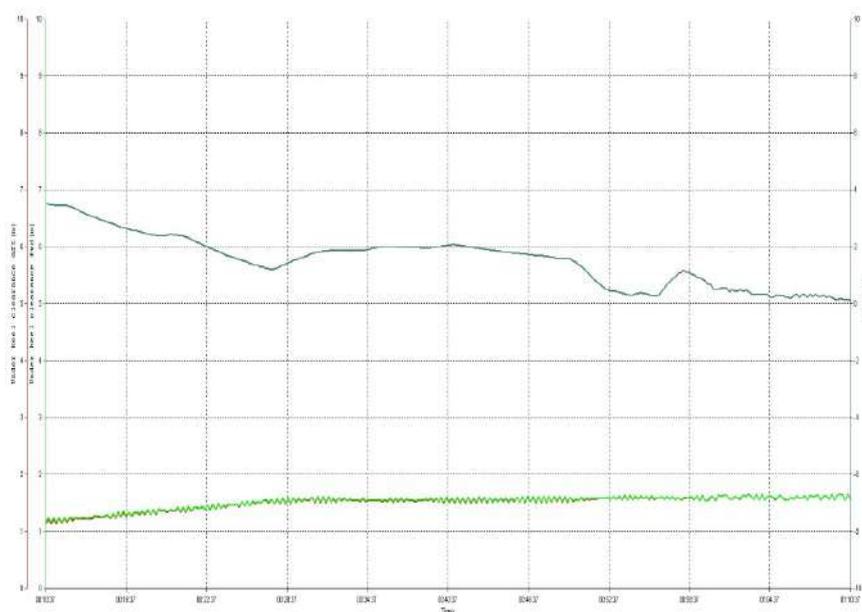


Figura 33 : Variação dos valores de folga abaixo da quilha e velocidade do navio no domínio do tempo, de acordo com os valores obtidos na manobra com 5 rebocadores na condição “1.14”. Fonte: Transas Marine / Instituto BZ.

Atribui-se a disparidade entre os dois valores, algo em torno de 0,6 metros, as diferenças de velocidade das 2 simulações, que levaram a intervalos de tempo de manobra bem distantes (aproximadamente 20 minutos de diferença entre as manobras).

Diante do exposto no item 3.5.2, o próximo capítulo abordará os cálculos das diferenças de folga abaixo da quilha para cada uma das 90 análises. A partir destas diferenças, será apresentado um “*trade-off*” entre o aumento de receita pelo embarque de carga devido a esta diferença de folga abaixo da quilha (convertida em aumento de calado para o navio), e incremento do custo em razão do aumento do número de rebocadores na manobra.

5. ANÁLISE ECONÔMICA DA OPERAÇÃO

5.1. Cálculo da quantidade de carga a ser embarcada

Após as 180 simulações realizadas, que apresentaram os valores mínimos de folga abaixo da quilha em cada simulação e, com as comparações dos resultados mostrados nas tabelas 7 e 8 (itens 3.5.1 e 3.5.2), pode-se afirmar que em algumas condições ambientais para as manobras específicas e para o porto analisado, houve significativas diferenças de folga abaixo da quilha através da inclusão de 3 rebocadores na manobra. Por outro lado, em outras condições ambientais do estudo, estas diferenças não foram relevantes, e o incremento do custo pela inclusão de 3 rebocadores pode não compensar financeiramente as receitas obtidas.

Dessa forma, a tabela 9 mostrada a seguir apresenta as diferenças entre os dados de folga abaixo da quilha obtidos pelas tabelas 8 e 7, respectivamente manobras com 5 e 2 rebocadores.

Tabela 9: Diferenças entre os valores mínimos (em metros) de folga abaixo da quilha entre as análises com 5 e com 2 rebocadores.

	Cond.1	Cond.2	Cond.3	Cond.4	Cond.5	Cond.6	Cond.7	Cond.8
Onda / Veloc. do Vento (nós)	Altura							
	(m):							
	0,25	0,35	0,79	0,47	0,61	0,85	1,35	1,55
	Período							
	(s):	(s):	(s)	(s)	(s)	(s)	(s)	(s)
	7	8	9	10	11	12	13	14

0	0,262	0,589	0,536	0,346	0,470	0,225	0,115	0,077
1	0,283	0,621	0,549	0,392	0,450	0,234	0,145	0,069
2	0,176	0,580	0,507	0,356	0,345	0,240	0,131	0,050
3	0,157	0,582	0,458	0,341	0,369	0,237	0,140	0,047
4	0,261	0,551	0,516	0,320	0,306	0,254	0,204	0,049
5	0,111	0,603	0,491	0,366	0,245	0,281	0,212	0,065
6	0,183	0,597	0,531	0,310	0,260	0,246	0,212	0,048
7	0,272	0,627	0,532	0,318	0,253	0,278	0,176	0,061
8	0,437	0,627	0,555	0,291	0,260	0,289	0,198	0,045
9	0,456	0,582	0,538	0,311	0,299	0,291	0,220	0,049
10	0,642	0,515	0,560	0,353	0,267	0,330	0,177	0,050
11	0,615	0,469	0,561	0,305	0,267	0,274	0,161	0,060
12	0,662	0,601	0,560	0,347	0,268	0,265	0,181	0,042
13	0,611	0,571	0,575	0,336	0,234	0,301	0,292	0,047
14	0,717	0,593	0,557	0,321	0,275	0,257	0,315	0,037
15	0,645	0,564	0,562	0,437	0,260	0,240	0,325	0,021
VALORES MÉDIOS	0,360	0,586	0,544	0,339	0,268	0,261	0,190	0,049

A coluna “VALORES MÉDIOS” indica a média aritmética entre os 15 dados obtidos em cada coluna de condição de mar. Nota-se que os valores vão decrescendo a partir da condição “2”. Em vista disso, algumas conclusões, *a priori*, podem ser extraídas:

I. O valor mínimo encontrado, que representa a menor diferença de folga abaixo da quilha através da inclusão de 3 rebocadores na manobra, ocorreu na condição “8.15”, foi de 0,021 metros.

Conforme pode ser visto pela comparação dos dados das tabelas 7 e 8, os resultados de folga abaixo da quilha encontrados são muito próximos na condição “8”, para cada condição estabelecida (“8.1”, “8.2”, e assim por diante). A razão deste resultado foi comentada no item 4.5.2, e pode ser atribuída aos valores de velocidade média do navio não terem apresentado muitas diferenças, quando comparadas as análises que utilizaram 5 rebocadores, com aquelas que utilizaram 2 rebocadores.

II. O valor máximo encontrado, representando a maior diferença de folga abaixo da quilha através da inclusão de 3 rebocadores na manobra, ocorreu na condição “1.14”, foi de 0,717 metros.

Conforme foi explicado no item 4.5.2, a manobra com 5 rebocadores na condição “1.14” foi feita sob uma velocidade média de 2,2 nós, em que o navio-tipo conseguiu navegar de forma segura no canal sob a assistência de 5 rebocadores. Esta velocidade causou uma redução significativa dos efeitos de afundamento em ondas, e do efeito Squat, gerando um valor de folga abaixo da quilha de 1, 218 metros.

Em vista disso, esta foi a análise que gerou a maior diferença entre os valores encontrados nas simulações com 5 rebocadores face as simulações que utilizaram 2 rebocadores, indo ao encontro também da conclusão exposta no item abaixo.

III. De forma geral, a inclusão de 3 rebocadores gerou maiores diferenças de folga abaixo da quilha nas condições ambientais menos severas, por exemplo, condições “2” e “3” de mar.

Alinhada com a conclusão exposta no item II acima, os resultados demonstram também que as maiores diferenças entre os valores médios de folga abaixo da quilha ocorreram em condições moderadas de mar: condições “2” e “3”. Pode-se atribuir isto ao fato da redução de velocidade média ter sido mais significativa nestas condições, sem

afetar o curso do navio no canal de acesso e sem permitir que o navio se aproximasse das margens.

IV. A inclusão de 3 rebocadores na manobra do navio-tipo não alterou significativamente a folga abaixo da quilha nas condições ambientais mais severas de mar, por exemplo, condições “7” e “8”.

Nas manobras com 5 rebocadores realizadas sob condições ambientais mais severas, não houve redução substancial da velocidade média do navio em relação as manobras com 2 rebocadores. Entretanto, houve alguns momentos da travessia no canal de acesso que foi necessário o aumento da velocidade para tornar o curso do navio mais retilíneo e afastá-lo das áreas rasas adjacentes ao canal, exatamente porque o efeito da condição de mar e vento (combinados) sobre o navio em movimento é tender afastá-lo do centro do canal.

Como os dados apresentados na tabela 8 apresentam os valores mínimos encontrados, nestes instantes que os rebocadores imprimiram ao navio-tipo uma maior velocidade para evitar aproximação de margens (ou possível encalhe), registrou-se os menores valores de folga abaixo da quilha, e estes valores são bem próximos daqueles obtidos na tabela 7, para as condições ambientais mais severas.

Para obtenção da capacidade de carga possível a ser embarcada a partir destas diferenças de folga abaixo da quilha convertidas em aumento de calado, é necessário conhecer o dado do TPC¹⁶ (toneladas por centímetro de imersão) do navio para o calado de 10,90 metros. Para isto, utilizou-se um manual de trim e estabilidade de um navio graneleiro

¹⁶ Toneladas por centímetro de imersão: significa o peso que deve ser adicionado ou retirado do navio a fim de se aumentar ou diminuir seu calado em um centímetro. Os navios possuem curvas e tabelas nas quais se podem obter as toneladas por centímetro correspondentes a cada flutuação e referidas ao calado respectivo. Fonte: FONSECA [28].

classe “Panamax”, retirado de VEROLME [30], cujas características são apresentadas na tabela 10 a seguir:

Tabela 10: Dados reais de navio graneleiro da classe “Panamax”.

Tipo do navio	TPB (t)	Comprimento Total (m)	Comprimento entre Perpendiculares (m)	Boca (m)	Calado moldado de projeto (m)	Valor do TPC (t/cm) para o calado de 10,90 metros (ton)
Graneleiro	70.000	241,89	233,76	32,20	12,94	68,27

Fonte: VEROLME [30]

REGISTRO DE ALTERAÇÕES		VEROLME ESTALEIROS REUNIDOS DO BRASIL S/A		6			
DATA		CARACTERÍSTICAS HIDROSTÁTICAS					
CALADO EXTREMO (M)	DESLOCAMENTO TOTAL (T)	PORTE BRUTO (T)	TPC	KM EM RELAÇÃO A BASE (M)	LCB POSIÇÃO LONGITUDINAL DO CENTRO DE GRAVITAÇÃO EM REL. A LRVZ (M)	LCF POSIÇÃO LONGITUDINAL DO CENTRO DE BUOYANCIA EM REL. A LRVZ (M)	MTC (T M)
8,00	50714	37434	66,52	14,37	-5,72	-3,69	994,0
8,10	51379	38099	66,56	14,30	-5,69	-3,62	993,9
8,20	52045	38765	66,61	14,23	-5,67	-3,55	997,9
8,30	52711	39431	66,65	14,16	-5,64	-3,48	999,8
8,40	53378	40098	66,70	14,10	-5,61	-3,42	1001,4
8,50	54045	40765	66,74	14,04	-5,59	-3,37	1002,9
8,60	54713	41433	66,77	13,98	-5,56	-3,31	1004,4
8,70	55380	42100	66,81	13,92	-5,53	-3,25	1005,9
8,80	56048	42768	66,86	13,86	-5,50	-3,19	1007,4
8,90	56718	43438	66,92	13,82	-5,47	-3,09	1010,7
9,00	57388	44108	66,99	13,77	-5,45	-2,99	1013,6
9,10	58058	44778	67,05	13,72	-5,42	-2,99	1016,3
9,20	58727	45447	67,11	13,67	-5,39	-2,79	1018,3
9,30	59400	46120	67,18	13,63	-5,36	-2,69	1022,3
9,40	60072	46792	67,24	13,59	-5,33	-2,59	1025,4
9,50	60745	47465	67,31	13,56	-5,30	-2,48	1028,4
9,60	61418	48138	67,37	13,52	-5,27	-2,38	1031,4
9,70	62092	48812	67,44	13,49	-5,23	-2,27	1034,6
9,80	62767	49487	67,51	13,45	-5,20	-2,17	1037,8
9,90	63443	50163	67,58	13,42	-5,17	-2,06	1041,9
10,00	64119	50839	67,65	13,40	-5,14	-1,96	1044,1
10,10	64794	51514	67,72	13,37	-5,10	-1,85	1047,3
10,20	65473	52193	67,79	13,34	-5,07	-1,75	1050,7
10,30	66151	52871	67,86	13,32	-5,03	-1,64	1054,1
10,40	66830	53550	67,93	13,30	-5,00	-1,53	1057,5
10,50	67509	54229	68,00	13,28	-4,96	-1,43	1060,9
10,60	68189	54909	68,07	13,26	-4,93	-1,33	1064,0
10,70	68871	55591	68,14	13,24	-4,89	-1,23	1067,1
10,80	69553	56273	68,20	13,22	-4,85	-1,13	1070,2
10,90	70234	56954	68,27	13,21	-4,82	-1,04	1073,3

 VEROLME ESTALEIROS REUNIDOS DO BRASIL S/A RIO DE JANEIRO		DIP / DPBC		DIREITOS RESERV.	
CHEFE DA DIVISÃO	<i>[Signature]</i>	ARMADOR	Docenave	CAS	
CHEFE DO DEPARTAMENTO	<i>[Signature]</i>	CLASSIFICAÇÃO	A.B.S.	B	
ENGENHEIRO RESPONSÁVEL	<i>[Signature]</i>	TOTAL DE FOLHAS	258	Nº	0

Figure 34: Capa do manual de estabilidade e tabela de dados hidrostáticos do navio classe

“Panamax” “DOCEALFA”. Fonte: VEROLME [30].

A figura 34 acima mostra a tabela de dados hidrostáticos do navio apresentado. Dessa forma, multiplicando-se os valores médios da diferença de folga abaixo da quilha (transformados de metros para centímetros) pelo valor de 68,27 toneladas, obtém, para cada condição ambiental analisada no trabalho, os valores de toneladas a serem embarcadas, conforme tabela 11, mostrada a seguir:

Tabela 11: Cálculo da tonelage a ser embarcada, para diferentes condições ambientais da análise.

Onda / Veloc. Do Vento	Cond.1 Alt:0,25m Período: 7 s	Cond.2 Alt:0,35m Período: 8 s	Cond.3 Alt:0,79m Período: 9 s	Cond.4 Alt:0,47m Período: 10 s	Cond.5 Alt:0,61m Período: 11s	Cond.6 Alt:0,85m Período: 12s	Cond.7 Alt:1,35m Período: 13 s	Cond.8 Alt:1,55m Período: 14 s
VALORES MÉDIOS (m)	0,360	0,586	0,544	0,339	0,268	0,261	0,190	0,049
VALORES MÉDIOS (cm)	36,00	58,60	54,40	33,90	26,80	26,10	19,00	4,90
TPC do navio-tipo para 10,90 metros de calado	68,27							
Quantidade de carga a ser embarcada (ton)	2457,72	3997,21	3710,47	2310,94	1826,22	1781,85	1293,72	334,52

Por consequência do cálculo, fica notável que os menores valores de carga a ser embarcada são aqueles de condições ambientais mais adversas (condições “7” e “8”), por terem apresentado as menores diferenças de valores de folga abaixo da quilha pela inclusão de 3 rebocadores nas manobras.

Em contrapartida, nas condições “2” e “3” do estudo, houve um incremento de 3997,21 e 3710,47 toneladas, respectivamente. Estes valores representam quase 5% do deslocamento de um navio desta classe a mais a ser transportada, por cada viagem.

5.2. Obtenção dos valores médios de frete para carga a granel

Em relação aos valores de frete (USD / ton) de carga embarcada em um navio-tipo da classe “Panamax”, é sabido que os preços são flutuantes e sua variação ocorre em função principalmente de 3 fatores:

- A rota a ser realizada pelo navio: viagens mais longas demandarão mais tempo de travessia e possuirão taxas de frete mais altas.
- A volatilidade de mercado: tal volatilidade é associada a fatores externos (preços da commodity negociados nas principais bolsas de valores do mundo, projeções de oferta e demanda etc).
- O tipo de navio afretado: navios de diferentes classes (ex: Handymax, Panamax, Capesize, entre outros) e porte bruto possuirão taxas de frete diferente, para o mesmo período, e mesma rota.

Nos últimos 4 anos, verificou-se uma marcante tendência de baixa nas taxas de afretamento, em todas as diferentes classes de navios de granel sólido, conforme mostrado na figura 35 abaixo, retirada de UNCTAD [31]. O mercado de granel sólido teve, em 2015, o máximo declínio desde 1999, no qual as receitas brutas dos navios classe “Capesize” tiveram os menores níveis, fortemente influenciados pela redução do crescimento da economia chinesa.

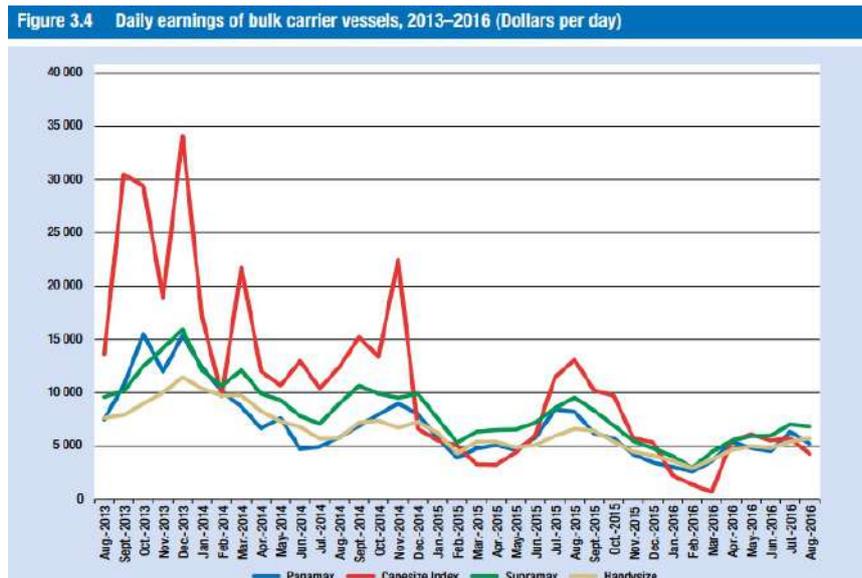


Figura 35: Queda nos valores de receita, entre os anos 2013 e 2015, para os diferentes tipos de navios graneleiros.

Fonte: UNCTAD [31].

Diante do exposto acima, para cálculo do frete a ser utilizado na análise, tomou-se com base duas viagens internacionais do navio-tipo graneleiro da classe “Panamax”, entre um porto brasileiro (Tubarão – ES) e 2 destinos internacionais de diferentes distâncias (Rotterdam – Holanda e Qingdao – China). Adicionalmente a este exemplo, em consulta com os dados de CLARKSON [32] e [33] e PLATTS [34], dados licenciados para uso da Universidade Federal do Rio de Janeiro, obteve-se as seguintes curvas de dados de frete, expostas na figura 36 abaixo:

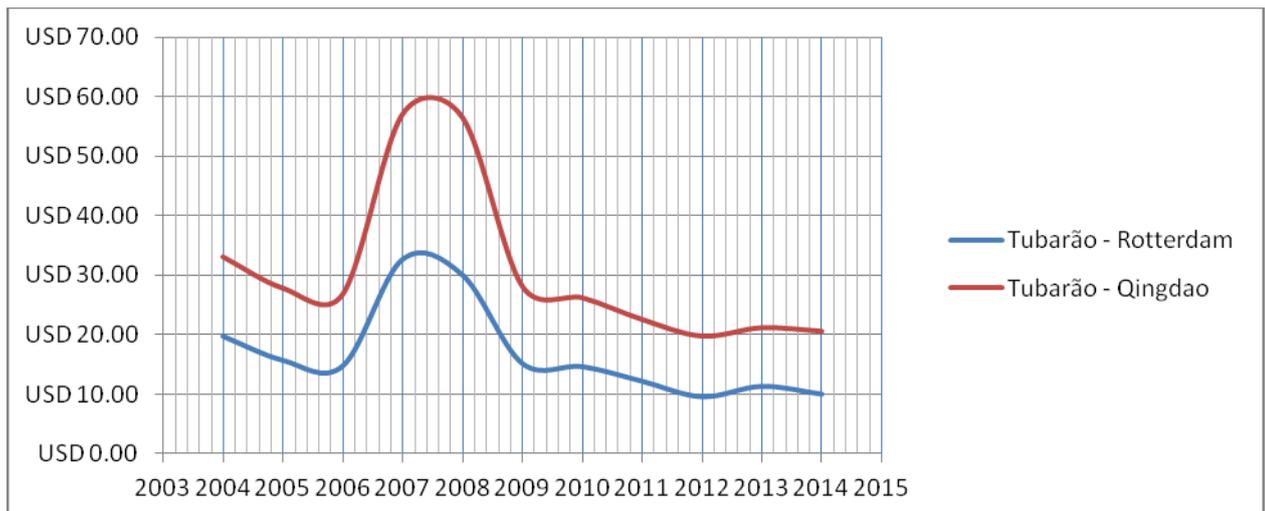


Figura 36: Dados de frete (USD / t) em 2 rotas diferentes.

Fonte: CLARKSON [32] e CLARKSON [33].

Nesta série história verifica-se a oscilação do valor do frete de granel no mercado internacional, entre os anos de 2004 e 2014. Entre as razões para tais oscilações, além das já citadas acima, de acordo com CLARKSON [31], o fato de o mercado naval mundial ter passado por um período de alta oferta de navios graneleiros, o que levou muitos armadores a terem receitas muito próximas dos custos de operação.

Para o objetivo de estimar o efeito quantitativo do ganho econômico devido ao aumento de calado, pode-se utilizar os valores extremos de frete: : um de maior valor na maior rota (57,14 USD / ton) e outro de menor valor na menor rota (9,91 USD / ton). Apresentam-se na tabela abaixo ambos os cenários para a quantidade de carga embarcada calculada no item 4.1.

Tabela 12: Cálculos dos valores de aumento de receita bruta para 2 cenários de preços de frete e 2 cenários de rotas realizadas pelo navio-tipo.

	Cond.1	Cond.2	Cond.3	Cond.4	Cond.5	Cond.6	Cond.7	Cond.8
<u>Quantidade de carga a ser embarcada</u> (ton)	2457,72	3997,21	3710,47	2310,94	1826,22	1781,85	1293,72	334,52
<u>CENÁRIO 1:</u> <u>Menor valor de Frete com a menor rota (U\$D / Ton)</u>	9,91							
<u>Aumento de receita para o armador (U\$D)</u> <u>(Pior cenário)</u>	24356,01	39612,34	36770,80	22901,41	18097,86	17658,10	12820,73	3315,12
<u>CENÁRIO 2:</u> <u>Maior valor de Frete na maior rota (U\$D / Ton)</u>	57,14							
<u>Aumento de receita para o armador (U\$D)</u> <u>(Melhor cenário)</u>	140434,12	228400,49	212016,51	132047,08	104350,05	101814,74	73922,96	19114,64

5.3. Obtenção do custo representativo pela utilização de 3 rebocadores adicionais por manobra portuária

Para obtenção dos dados do custo representativo por manobra de um rebocador azimutal, foram realizadas algumas entrevistas com especialistas em rebocadores no Brasil, alguns deles pertencentes ao Instituto Brasileiro de Rebocagem (IBR), já que não há dados publicados pelas empresas de rebocadores e tampouco, pela Agência Nacional de Transportes Aquaviários (ANTAQ) que regula o setor.

Diante disso, estimou-se que o valor cobrado dos armadores seja algo em torno de USD 2750,00 por movimentação de rebocador azimutal, em média, nos portos brasileiros, levando-se em consideração uma idade média do rebocador inferior a 10 anos de uso, e levando-se em consideração um contrato de afretamento por tempo (*"Time Charter Party"*); neste modelo de contrato, o afretador do rebocador (por exemplo, um consórcio entre um proprietário do porto e um armador de um navio específico daquele porto) fica responsável apenas pela gestão comercial, deixando a gestão náutica (ex: custos com tripulação, combustíveis, alimentação, entre outros) a cargo da empresa de rebocadores.

Logo, com a inclusão de 3 rebocadores adicionais às manobras do navio classe "Panamax" , o aumento representativo de custo pode ser considerado da ordem de USD 8250,00.

5.4. Aumento de receita para o armador do navio.

Diante do exposto nos itens 4.1 a 4.3, chega-se a análise econômica final da operação. A avaliação envolve o *trade-off* entre o aumento de receita obtida pelo aumento do calado, de acordo com os valores de frete considerados, em detrimento do valor adicional de inclusão de rebocadores.

Seguindo a análise descrita nos itens anteriores, a tabela 13 abaixo apresenta esta análise final:

Tabela 13: Cálculo final de aumento ou redução de receita da operação, de acordo com a condição ambiental e os 2 cenários de preços de frete.

	Cond.1	Cond.2	Cond.3	Cond.4	Cond.5	Cond.6	Cond.7	Cond.8
<u>Aumento de receita para o armador (U\$D)</u> <u>(Pior cenário)</u>	24356,01	39612,34	36770,80	22901,41	18097,86	17658,10	12820,73	3315,12
<u>Aumento de Despesas para o armador (U\$D), devido a inclusão de 3 rebocadores adicionais</u>	8250,00							
<u>Diferença (Receita – Despesa) para o Armador (Pior Cenário) (U\$D)</u>	16106,01	31362,34	28520,80	14651,41	9847,86	9408,10	4570,73	- 4934,88
<u>Aumento de receita para o armador (U\$D)</u> <u>(Melhor cenário)</u>	140434,12	228400,49	212016,51	132047,08	104350,05	101814,74	73922,96	19114,64

<u>Aumento de Despesas para o armador (USD), devido a inclusão de 3 rebocadores adicionais</u>	8250,00							
<u>Diferença (Receita – Despesa) para o Armador (Melhor Cenário) (USD)</u>	132184,12	220150,49	203766,51	123797,08	96100,35	93564,74	65672,96	10864,64

Em análise da tabela 13, verifica-se que em grande parte das condições ambientais apresentadas, a operação final geraria aumento de receita; em algumas, o aumento de receita é mínimo e pode não ser compensatório; e em uma condição analisada, houve redução da receita.

Diante deste cenário, são geradas as seguintes conclusões:

1. Levando-se em consideração a rota mais curta para o navio graneleiro e o pior cenário no valor do frete de granel - ano de 2014 - segundo os relatórios CLARKSON [30] e CLARKSON [31], utilizados como base para as análises:
 - Existiu uma condição ambiental - condição “8” – que houve redução de receita para o armador, respectivamente no valor de USD 4934,88. Isto se deu, pois esta foi a condição que houve a menor diferença nos valores de folga abaixo da quilha pela inclusão de 3 rebocadores na manobra.
 - Existiram outras três condições ambientais – condições “5”, “6” e “7”, que houve um baixo valor de aumento de receita, inferior a USD 10000,00, sendo assim uma margem de lucro muito pequena para uma operação deste tipo.

Considera-se que tais operações poderiam trazer redução de receita para o armador, caso o valor do afretamento do rebocador por manobra fosse um pouco superior ao valor considerado, ou o modelo de contrato de afretamento do rebocador fosse outro que envolvesse maiores custos ao armador do navio. Isto poderia ocorrer, por exemplo, em um modelo de contrato de afretamento a casco nu, em que o afretador do rebocador (no exemplo, o armador) ficasse responsável, além da gestão comercial, também pela gestão náutica do rebocador afretado; ocorreria uma elevação dos custos com tripulação, combustível, manutenção, que, sendo geridos pelo armador do navio, poderia tornar a operação não economicamente rentável.

- Existiram outras 2 condições – “1” e “4” – que geraram um aumento de receita pouco maior que U\$D 10000,00, e que podem ser usadas como parâmetros para uma época que os valores de frete estiverem tão baixos.
 - Por fim, nas condições “2” e “3”, houve um aumento de receita considerável, gerando uma margem de aumento de receita bem maior que as outras condições.
2. Levando-se em consideração a rota mais longa e o maior valor do frete a granel, que, na estatística apresentada nos relatórios CLARKSON [29] e CLARKSON [30], foi no ano de 2007, podemos concluir o seguinte:
- Nenhuma das condições apresentou redução de receita;
 - Apenas em uma das condições – condição “8” - apresentou um pequeno aumento de receita. Consoante já exposto anteriormente no item 4.1, a condição “8” foi aquela que apresentou os menores valores de diferença entre os dados encontrados de folga abaixo da quilha, tendo como consequência disso, apresentado um aumento de receita total de

aproximadamente U\$D 10864,64. Este valor pode ser considerado pequeno para a operação, e pode ser que, em outro modelo de contrato de afretamento do rebocador ou, sob outro valor de afretamento, a operação leve a redução de receita;

- Em todas as outras 7 condições houve significativo aumento de receita para o armador, com destaque para as condições “2” e “3”, que foram aquelas que o estudo resultou em maiores valores de diferença de folga abaixo da quilha, e cujos valores de aumento de receita ultrapassaram os U\$D 200.000,00.

A partir destas conclusões, pode-se gerar dois gráficos com os valores de receita, de acordo com os dois cenários de frete e as condições ambientais analisadas, conforme figura 35 mostrada a seguir.

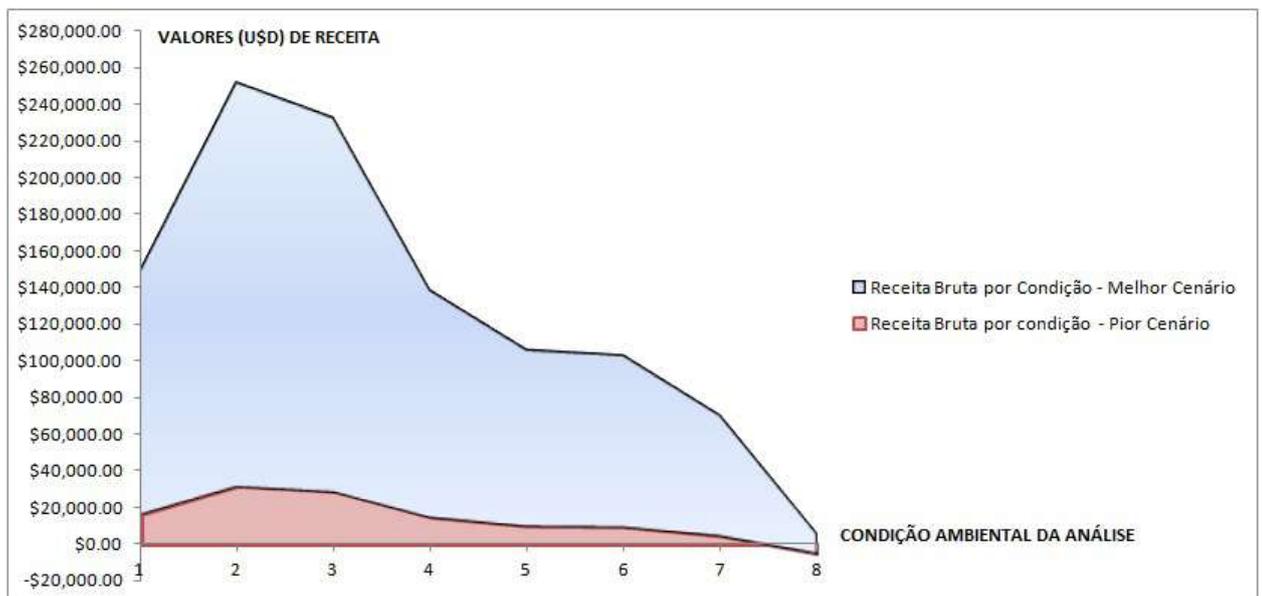


Figura 37: Apresentação dos 2 cenários de receita de acordo com o valor de frete e condição ambiental da análise.

Diante da discussão dos resultados apresentada acima, o capítulo 6 a seguir expõe as conclusões finais do trabalho e apresenta as contribuições e ressalvas finais desta dissertação.

6. CONCLUSÕES E CONTRIBUIÇÃO ESPERADA

O advento de novas construções de navios mercantes gerou um aumento nas suas principais dimensões: comprimento, boca (estas dimensões horizontais) e calado (dimensão vertical). Mormente o calado de projeto dos navios tenha aumentado em grande extensão nos últimos projetos de navios construídos nos estaleiros mundiais e ainda, que este aumento ocorreu de maneira independente da classe e tipo de carga que o navio transporta, os portos brasileiros permaneceram com as mesmas dimensões.

O estudo apresentado nesta dissertação apresentou uma análise metodológica alternativa de uso de rebocadores para auxílio nas manobras de navios, com fito de mitigar um dos maiores gargalos portuários encontrados na grande maioria dos portos nacionais: os valores mínimos de folga abaixo da quilha que os navios devem respeitar nas manobras pelos canais de acesso, reduzindo as probabilidades de encalhe.

Em acréscimo às conclusões já apresentadas no capítulo anterior, algumas ressalvas quanto a estas conclusões são importantes para as contribuições deste trabalho:

1. A metodologia utilizada é uma ferramenta útil e relevante para aumento de carga transportada e de receita, e deve ser conjugada com as situações específicas e condições ambientais do caso concreto do canal de acesso analisado. A consideração de que o canal de acesso deve ter a mesma profundidade em toda a sua extensão tem alta relevância para a consistência dos resultados finais.
2. A ordem de grandeza do aumento de calado, e por consequência, de aumento de carga a ser transportada varia principalmente com a condição ambiental analisada e com a capacidade dos rebocadores em gerarem forças de frenagem suficientes para reduzir a velocidade do navio-tipo;

3. Os resultados e a ordem de grandeza do aumento de receita obtida indicam um limite para este aumento. Este limite depende do valor do frete e da condição ambiental que o navio realizou a manobra.

4. Análises mais detalhadas e obtenção de conclusões mais significativas sobre a ordem de grandeza do aumento de carga a ser transportada devem ser feitas para o caso específico. Possuem grande relevância para os resultados: o conhecimento específico das condições ambientais do porto, da modelagem do comportamento do afundamento do navio-tipo no simulador de manobras utilizado, bem como das possíveis forças de frenagem e governo geradas pelos rebocadores, durante assistência do navio-tipo nas manobras.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] **ABNT NBR 13246 / 17: Planejamento Portuário** (em fase de publicação).
- [2] HENSEN, Henk. **Tug Use in Port – A Practical Guide**. Nautical Institute. 2nd. Edition. 2002.
- [3] PIANC – Permanent International Association of Navigation Congress – **Report 121 – 2014: Harbour Approach Channels and Design Guidelines**. 2014.
- [4] TEJADA, Francisco Captain (2009). Escort Towing in the Expanded Panama Canal. Maritime Simulation Conference. **MARSIM, 2009**. Panama.
- [5] MARINHA DO BRASIL, CPRJ, 2012. **Normas e Procedimentos da Capitania dos Portos do Rio de Janeiro**. Disponível em <https://www.mar.mil.br/cprj/npcp.html>>. Acesso em 01.02.2017
- [6] MARINHA DO BRASIL, CPSP, 2012. **Normas e Procedimentos da Capitania dos Portos de São Paulo**. Disponível em <https://www.mar.mil.br/cpsp/principal/npcp/NPCPSPCAP5.pdf> > Acesso em 01.02.2017
- [7] MARINHA DO BRASIL, CPAO, 2012. **Normas e Procedimentos da Capitania dos Portos da Amazônia Oriental**. Disponível em < <https://www.mar.mil.br/cpaor/> > Acesso em 01.02.2017

- [8] CASACA, Ana C. Paixão & CASACA, Manuel (2017): The impact of muddy bottoms in ports, **Maritime Policy & Management**, DOI: 10.1080/03088839.2017.1309471.<http://dx.doi.org/10.1080/03088839.2017.1309471>.>
- [9] SANO, Masaaki; YASUKAWA, Hironori (2009). Ship Wave Making Resistance, Sinkage and Trim when navigating in muddy areas. International Marine Simulator Forum. **Maritime Simulation Conference. MARSIM 2009**. Panama.
- [10] BARRASS, C.B; DAND, Ian W. **Squat Interaction Manoeuvring**, Nautical Institute, 1995.
- [11] GRONARZ, A (2016): Development of a Squat formula based on Numerical Calculations. **4th International Conference on Ship Manoeuvring in Shallow and Confined Water (MASHCON)**, Hamburg. ISBN 978-3-93930-38-0. DOI: 10.18451/978-3-939230-38-0_13.
- [12] MacELREVEY, Daniel H. & MacELREVEY, Daniel E. **SHIPHANDLING FOR THE MARINER**. 2004. Cornell Maritime Press
- [13] McCARTNEY, Bruce, L., *et al.* **SHIP CHANNEL AND DESIGN OPERATION**. ASCE Manuals and Reports on engineering practice. No.107. ASCE - American Society of Civil Engineers. 2005.
- [14] O' BRIEN, Terry. **EXPERIENCE USING DYNAMIC UNDERKEEL CLEARANCE SYSTEMS: SELECTED CASE STUDIES AND RECENT DEVELOPMENTS**. 2002. Disponível em <<https://omcinternational.com/wp-content/uploads/2014/05/PIANC.pdf>>.
- Acesso em 21.02.2017

- [15] ROM 3.1 -99: **RECOMMENDATIONS FOR MARITIME WORKS. Design of the Maritime Configuration of Ports, Approach Channels and Harbour Basins.** Gobierno de España. 2000.
- [16] GOURLAY, T.P. "Ship Underkeel Clearance in Waves". *Proc. Coasts and Ports*, Melbourne, July 2007. pp. 1-6. Disponível em <http://cmst.curtin.edu.au/wp-content/uploads/sites/4/2016/05/gourlay-2007-ship_underkeel_clearance_in_waves.pdf>. Acesso em 20.02.2017.
- [17] PARKER, Bruce B; HUFF, Lloyd C. "Modern Underkeel Clearance Management". *International Hydrographic Review. Monaco. September 1998.* Disponível em <<https://journals.lib.unb.ca/index.php/ihr/article/view/22959/26656>>. Acesso em 22.02.2017.
- [18] LEWIS, Edward V. **PRINCIPLES OF NAVAL ARCHITECTURE.** Vol. III – Motions in Waves and Controllability. Society of Naval Architects and Marine Engineers. 1989.
- [19] CLARK, I.C, BSc, MSc, MNI. **SHIP DYNAMICS FOR MARINERS.** Nautical Institute. 1st. Edition. 2005.
- [20] IMO Circ. 1101. **SHIP PORT INTERFACE. Availability of Tug Assistance.** 2003
- [21] BARRADAS FILHO, Luis C.A, 2009. *Uma análise dos mercados de rebocadores portuários.* Dissertação de mestrado. COPPE / UFRJ Engenharia Naval e Oceânica. Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- [22] FRAGOSO, Otávio A. e CAJATY, Marcelo C. – **Rebocadores Portuários.** Conselho Nacional de Praticagem - CONAPRA. 2002.

- [23] JURGENS, D. Dr; PALM, M. – **Voith Water Tractor – Improved Manoeuvrability and Seakeeping Behaviour**. Tugology, 2009. Rotterdam.
- [24] ALLAN, Robert G. “The Design of Modern Tugboats”. **PACIFIC MARITIME MAGAZINE**. May 2016. Disponível em <http://ral.ca/wp-content/uploads/2016/06/TugDesignAllan05_may_2016pmm.pdf> Acesso em 01.03.2017.
- [25] HENSEN, Henk. **Bow Tug Operations with Azimuth Stern Drive Tugs**. Nautical Institute. 2006.
- [26] MIGUENS, Altineu P. **NAVEGAÇÃO: A CIÊNCIA E ARTE. Capítulo 10. Marés e correntes de maré; correntes oceânicas**. Diretoria de Hidrografia e Navegação. DHN. Rio de Janeiro. Disponível em <<http://www.dhn.mar.mil.br>>. Acesso em 10.02.2017.
- [27] PETROBRÁS. **METEOCEAN DATA**. PROJECT: LNG Terminal of Guanabara Bay-RJ. No. I-ET-4155.52-6611-941-PPC-001.rev.A. 26.04.2012.
- [28] FONSECA, Maurilio M. **ARTE NAVAL**. Serviço de Documentação da Marinha. Rio de Janeiro. Vol. I. 7ª. Edição. 2005.
- [29] LARSSON, L & RAVEN, Hoyte C. **THE PRINCIPLES OF NAVAL ARCHITECTURE. Ship Resistance and Flow**. Society of Naval Architects and Marine Engineers. 2010.
- [30] VEROLME ESTALEIROS REUNIDOS DO BRASIL S.A. Manual de Trim e Estabilidade (incluindo cálculo dos esforços longitudinais) – final. Navio Graneleiro de 70.000 TPB. Casco 54 – DOCEALFA.

- [31] UNCTAD – United Nations Conference on Trade and Development. Review of Maritime Transport. 2016. Disponível em <http://unctad.org/en/PublicationsLibrary/rmt2016_en.pdf>. Acesso em 20.04.2017.
- [32] CLARKSON Research Services. “*Dry Bulk Trade Outlook*”. Volume 16. No. 6. ISSN : 1361 – 3189. pp. 1 -24. June 2010.
- [33] CLARKSON Research Services. “*Dry Bulk Trade Outlook*”. Volume 21. No. 3. ISSN 1361 – 3189. pp. 1-24. March – 2015.
- [34] PLATTS SHIPPING, S&P Global. “Dry Freight Wire”, Vol. 4. Issue 1. January 3, 2017.