



COMPARAÇÃO DE METODOLOGIAS PARA A DETERMINAÇÃO DE
MOVIMENTOS VERTICAIS DO NAVIO NA DEFINIÇÃO DA PROFUNDIDADE
DE PROJETO DE CANAIS NAVEGÁVEIS

Guilherme Pires Black Pereira

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.

Orientadores: Marcos Nicolás Gallo

Paulo Cesar Colonna Rosman

Rio de Janeiro
Fevereiro de 2022

COMPARAÇÃO DE METODOLOGIAS PARA A DETERMINAÇÃO DE
MOVIMENTOS VERTICAIS DO NAVIO NA DEFINIÇÃO DA PROFUNDIDADE
DE PROJETO DE CANAIS NAVEGÁVEIS

Guilherme Pires Black Pereira

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO
LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA 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. Marcos Nicolás Gallo, D.Sc.

Prof. Paulo Cesar Colonna Rosman, Ph.D.

Prof. Afonso Augusto Magalhães de Araújo, D.Sc.

Dr. Rogério Neder Candella, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL
FEVEREIRO DE 2022

Pereira, Guilherme Pires Black

Comparação de metodologias para a determinação de movimentos verticais do navio na definição da Profundidade de Projeto de Canais / Guilherme Pires Black Pereira. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2022.

XIII, 130 p.: il.; 29,7 cm.

Orientadores: Marcos Nicolás Gallo

Paulo Cesar Colonna Rosman

Dissertação (mestrado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Oceânica, 2022.

Referências Bibliográficas: p. 113-117.

1. Projeto de canal de navegação. 2. Avaliação. 3. Sinalização Náutica. 4. Profundidade de Projeto. 5. Requisitos de *UKC*. 6. Navio de Projeto. 7. Engenharia da Navegação. I. Marcos Nicolás Gallo *et al.*, II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Oceânica. III. Título.

Quer vencer os desafios? Confie em DEUS!

Quer ser bom no que faz? Pratique!

Quer alcançar o objetivo? Jamais desista!

Quer crescer? Tenha raízes.

Quer ver resultados? Persevere.

Quer ser feliz? Esqueça o passado.

Quer falar bem? Escute melhor.

Quer aprender? Persista em ler.

Quer realização pessoal? Sirva!

Quer fazer diferença? Pague o preço.

Aqueles que nada fazem e esperam algum tipo de vitória estão enganados.

A vitória é dos que lutam, dos que agem, dos que “saem do porto”.

A vitória é dos que se arriscam para alcançar o alto da montanha.

Deus está no controle de tudo.

Ele é a nossa força.

Autor desconhecido

Dedico este trabalho ao meu filho João, à minha esposa Fernanda, ao meu sobrinho e
afilhado Ian Gabriel e aos meus pais Paulo e Maria de Lourdes.

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

COMPARAÇÃO DE METODOLOGIAS PARA A DETERMINAÇÃO DE
MOVIMENTOS VERTICAIS DO NAVIO NA DEFINIÇÃO DA PROFUNDIDADE
DE PROJETO DE CANAIS NAVEGÁVEIS

Guilherme Pires Black Pereira

Fevereiro/2022

Orientadores: Marcos Nicolás Gallo

Paulo Cesar Colonna Rosman

Programa: Engenharia Oceânica

Nas últimas décadas, um aumento substancial das dimensões e calados de navios vem imprimindo certa pressão na infraestrutura dos acessos portuários que, por sua vez, vem buscando adequar seus canais de navegação, de forma a viabilizar a acessibilidade de tais navios. O propósito deste trabalho é quantificar os principais fatores contribuintes dos movimentos verticais do navio durante o trânsito de entrada e saída e sua contribuição para composição da profundidade, a fim de quantificar o nível de segurança da Profundidade de Projeto (PP) selecionada em trechos retilíneos do Canal de Navegação. Para isso, foram consideradas metodologias determinísticas mundialmente aplicadas e dados pré-determinados, definidos como “Critérios de Projeto”, os quais foram utilizados para o cálculo do máximo “efeito *squat*” e do “máximo movimento vertical induzido por ondas” e permitiram quantificar a “PP calculada”. A “PP calculada” foi então numericamente comparada à “PP selecionada” em três trechos retilíneos pré-selecionados do Canal de Navegação, sendo individualmente calculados os fatores de segurança intrínsecos aos trânsitos de entrada e saída do navio, distintamente, em cada trecho. Os resultados obtidos serviram como ferramenta de verificação da seleção da “Profundidade de Projeto” de um Canal de Navegação de acesso marítimo portuário localizado na região Sul-Sudeste brasileira. Enquanto ambos os trânsitos nos trechos “Inicial” e “Final” e o trânsito de saída do trecho “Intermediário” demonstraram ter uma adequada seleção para a Profundidade de Projeto, o mesmo não confirmado para o trânsito de entrada no trecho “Intermediário”, pois não foi identificado um fator de segurança minimamente adequado ao cumprimento do requisito de *UKC* condicionado.

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

COMPARISON OF METHODOLOGIES FOR THE DETERMINATION OF
VERTICAL MOVEMENTS OF THE SHIP IN THE DEFINITION OF THE PROJECT
DEPTH OF NAVIGABLE CHANNEL

Guilherme Pires Black Pereira

February/2022

Advisors: Marcos Nicolás Gallo

Paulo Cesar Colonna Rosman

Department: Ocean Engineering

In recent decades, there has been a substantial increase in the dimensions and draughts of ships, which has placed some pressure on the infrastructure of port access, which, in turn, has been adapting its navigation channels in order to facilitate the accessibility of such ships. The purpose of this work is to quantify the main factors that contribute to the vertical movements of the ship during the entry and exit transit and its contribution to the composition of the depth, in order to quantify the safety level of the Project Depth selected in straight stretches of the Navigation Channel. For this, deterministic methodologies applied worldwide and predetermined data, defined as “Design Criteria”, were employed to calculate maximum “squat effect” and “maximum wave-induced vertical movement”, allowing to quantify the “Calculated PP”. The “Calculated PP” was then numerically compared to the “Selected PP” in three pre-selected straight sections of the Navigation Channel, and the safety factors intrinsic to the ship's entry and exit transits were individually calculated, separately, in each section. The results obtained served as a verification tool for the selection of the “Project Depth” in a port maritime access Navigation Channel located in the South-Southeast region of Brazil. While both the transits in the “Initial” and “Final” sections and the exit transit of the “Intermediate” section have demonstrated to be an adequate selection for the Project Depth, the same was not confirmed for the entrance transit in the “Intermediate” section, as a minimal adequate safety factor was not identified to comply with the conditional UKC requirement.

Sumário

1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Objetivos	9
1.2. Contextualização histórica	9
2. A IMPORTÂNCIA DA PROFUNDIDADE NA ANÁLISE DE PROJETOS DE SINALIZAÇÃO NÁUTICA	16
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	22
3.1. “Critérios de Projeto” e o “requisito de <i>UKC</i> ”	30
3.2. Estimativa para o máximo “efeito <i>squat</i> ” “ <i>S(m)</i> ”	32
3.2.1. Formulação de HUUSKA-GULIEV (1976).....	39
3.2.2. Metodologia de cômputo da área da seção transversal submersa idealizada “ <i>Ac</i> ” do canal e principais parâmetros	42
3.2.3. Parâmetros de aferição do grau de restrição.....	46
3.3. Estimativa para o máximo movimento vertical induzido por ondas “ <i>Z(m)</i> ”	51
3.3.1. Metodologia japonesa	53
3.3.2. Climatologia das ondas incidentes na região de estudo	58
3.4. Caracterização do estuário Baía de Sepetiba.....	59
3.4.1. O efeito da maré meteorológica no nível médio local.....	63
3.4.2. Critérios de Projeto assumidos	66
3.5. O Navio de Projeto.....	71
4. DESENVOLVIMENTO	73
4.1. Os fatores selecionados	77
4.2. Análises iniciais e cômputo de parâmetros de interesse.....	82
4.2.1. Computo do fator máximo “efeito <i>squat</i> ” - “ <i>S(m)</i> ”	88
4.3. Cômputo da estimativa do fator máximo movimento vertical induzido por ondas “ <i>Z(m)</i> ” ⁹⁰	
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	93
5.1. Máximo movimento vertical induzido por ondas “ <i>Z(m)</i> ”	93
5.2. O máximo “efeito <i>squat</i> ”: “ <i>S (m)</i> ”	103
5.3. Resultado da composição da “ <i>PP</i> calculada”	106
6. CONCLUSÕES.....	109
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	113

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Crescimento das dimensões e capacidades de carga dos navios nos últimos cinquenta anos. Fonte: ALLIANZ (2019, p.21)	3
Figura 2: Representação gráfica do crescimento das dimensões e calado dos navios ao longo dos anos e a conseqüente redução das margens de segurança abaixo da linha da água. Fonte: desconhecida	4
Figura 3: Crescimento das dimensões dos navios porta-contentores ao longo dos anos (1972-2015)”. Fonte: ITF (2017, p. 21)	11
Figura 4: Fatores relacionados ao nível de água de projeto. Fonte: adaptada de PIANC (2014, p. 23).	26
Figura 5: Folgas e margens selecionadas para verificar a profundidade mínima, de acordo norma ABNT NBR 13246:1995. Fonte: extraída de ABNT (1995, p.4).	31
Figura 6: Parâmetros utilizados nos testes realizados por DE KONING GANS; BOONSTRA (2007). Fonte: DE KONING GANS; BOONSTRA (2007) <i>apud</i> PIANC (2014).	33
Figura 7: Tipos de seções transversas submersas, de geometria trapezoidal, idealizadas. Fonte: adaptada de PIANC (2014)	37
Figura 8: Método gráfico de obtenção do parâmetro “K1” necessário ao cálculo do parâmetro “Ks”. Fonte: PIANC (2014, p.193).	41
Figura 9: Representação geométrica da Fórmula de PIANC (2014) para o cálculo de “Ac”	43
Figura 10 - Desenvolvimento do equilíbrio dinâmico do talude do canal de navegação, sujeito a processos morfodinâmicos, ocasionado pelo fluxo das correntes de maré. Fonte: Van Rijn (2018).	45
Figura 11: Representação gráfica de nove diferentes graus de restrição (o tamanho da área “Ac” não é suficiente para diferenciar graus de restrição). Fonte: elaboração própria	47
Figura 12: Batimetria de um trecho “Inicial” do canal de navegação de acesso ao Porto de Itaguaí-RJ, com base nas profundidades cartografadas na carta náutica 1623, da DHN. Fonte: elaboração própria	50
Figura 13: Batimetria de um trecho “Intermediário” do canal de navegação de acesso ao Porto de Itaguaí-RJ, com base nas profundidades cartografadas na carta náutica 1623, da DHN. Fonte: elaboração própria	50
Figura 14: Batimetria de um trecho “Final” do canal de navegação de acesso ao Porto de Itaguaí-RJ, com base nas profundidades cartografadas na carta náutica 1623, da DHN. Fonte: elaboração própria	51
Figura 15: Condições de interesse para o cálculo do parâmetro “Z₂” - aplicação da metodologia japonesa de estimativa do fator “Máximo movimento vertical induzido por ondas”: (i) quando $L_{pp} = \lambda$; (ii) quando $\lambda \geq 0,45 \times L_{pp}$. Fonte: adaptada de PIANC (2014, p. 51)	54
Figura 16: Condições de interesse para o cálculo do parâmetro “Z₃” - aplicação da metodologia japonesa de estimativa do fator “Máximo movimento vertical induzido por ondas”: (i) quando $T_e \approx T_r$. Fonte: adaptada de PIANC (2014, p.52)	55
Figura 17: Curvas RAO padrão, em função do ângulo de incidência da onda sobre a proa do navio “ψ”, para cômputo do parâmetro “Z₂”. Fonte: elaboração própria	56
Figura 18: Indicação da Profundidade Nominal relativa ao trecho “Inicial” do canal de navegação. Fonte: extraída da carta náutica 1623 da DHN.	60

Figura 19: Indicação da Profundidade Nominal relativa ao trecho “Intermediário” do canal de navegação. Fonte: extraída da carta náutica 1621 da DHN.	61
Figura 20: Indicação da Profundidade Nominal relativa ao trecho “Final” do canal de navegação. Fonte: extraída da carta náutica 1621 da DHN.	61
Figura 21: Localização dos trechos analisados pertencentes ao canal de navegação de acesso ao Porto de Itaguaí-RJ. Fonte: elaboração própria	67
Figura 22: Foto de uma manobra real de atracação do Navio “HYUNDAY LOYALTI” no Terminal de Contêineres (TECON) do Porto de Itaguaí-RJ. Fonte: internet	72
Figura 23: Representação mais adequada ao emprego de margens de segurança, com base em fatores multiplicativos ao valor máximo do calado estático (T) do navio de projeto.....	75
Figura 24: Demonstração de como uma percepção equivocada a respeito de margens de segurança pode conduzir a conclusões precipitadas	76
Figura 25: Fatores componentes do parâmetro “PP calculada” e a composição do “requisito de UKC”. Fonte: elaboração própria	78
Figura 26: Identificação e localização geográfica dos três trechos, nas cartas náuticas 1621 e 1623. Fonte: elaboração própria	83
Figura 27: Perfis batimétricos selecionados, representativos de grande parte dos segmentos do canal de acesso ao Porto de Itaguaí (trechos 2 - “Inicial”, 13 - “Intermediário” e 20 - “Final”)	84
Figura 28: Perfis batimétricos, com largura de seção reta igual a 1000 metros, Identificação gráfica da Largura “W” e cálculo da atividade “n” do banco submerso. Fonte: elaboração própria.....	85
Figura 29: Representação gráfica de uma seção transversal submersa idealizada “ac” genérica e parâmetros de interesse	87
Figura 30: Método gráfico e de ajuste polinomial para obtenção do parâmetro “K1” necessário à utilização da formulação HUUSKA-GULIEV (1976)	90
Figura 31: Tela do software “J-Fairway (2013)” utilizado para realizar o cálculo dos parâmetros de interesse na metodologia japonesa de estimativa de “Z(m)”	91
Figura 32: Principais rumos dos trânsitos de entrada e saída do CN; e principal origem das ondas incidentes de origem remota oceânica (<i>swell</i>)	92
Figura 33: Máxima estimativa para movimento vertical induzido por ondas “Z(m)” = $Z_3 = 3,4$ metros para o trânsito de “entrada”, no trecho “Inicial”. Resultado da aplicação da metodologia japonesa. Fonte: elaboração própria	95
Figura 34: Estimativa para movimento vertical induzido por ondas. $Z_3 = 2,57$ metros para o trânsito de “entrada”, no trecho “Inicial”. Resultado da aplicação da metodologia japonesa. Fonte: elaboração própria	96
Figura 35: Máxima estimativa para movimento vertical induzido por ondas “Z(m)” = $Z_3 = 2,24$ metros para o trânsito de “entrada”, no trecho “Intermediário”. Resultado da aplicação da metodologia japonesa. Fonte: elaboração própria	97
Figura 36: Estimativa para movimento vertical induzido por ondas. $Z_3 = 2,02$ metros para o trânsito de “entrada”, no trecho “Intermediário”. Resultado da aplicação da metodologia japonesa. Fonte: elaboração própria	98
Figura 37: estimativa para movimento vertical induzido por ondas. $Z_3 = 2,57$ metros para o trânsito de “entrada”, no trecho “Intermediário”. Resultado da aplicação da metodologia japonesa. Fonte: elaboração própria	99
Figura 38: Máxima amplitude do movimento vertical induzido por ondas no trânsito de saída do trecho inicial. “Z(m)” igual a 1,4 metros. Fonte: elaboração própria ...	100

Figura 39: Cômputo do parâmetro “Z_2” no trânsito de “saída”, no trecho “Inicial” do CN. O fator “$Z(m)$” = 1,4 metros para uma onda incidente com “T_p” minimamente igual a 11,7 segundos. Fonte: elaboração própria	101
Figura 40: Máxima amplitude do movimento vertical induzido por ondas no trânsito de saída do trecho inicial. Fonte: elaboração própria	102
Figura 41: Cômputo do parâmetro “Z_2” no trânsito de “saída”, no trecho “Intermediário” do CN. O fator “$Z(m)$” = 0,35 metro para uma onda incidente com “T_p” minimamente igual a 12,7 segundos. Fonte: elaboração própria	103
Figura 42: Estimativa máximo efeito <i>squat</i> (trecho inicial). Fonte: elaboração própria	104
Figura 43: Estimativa máximo efeito <i>squat</i> (trecho intermediário). Fonte: elaboração própria	105
Figura 44: Estimativa máximo efeito <i>squat</i> (trecho final). Fonte: elaboração própria	106

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Formulações matemáticas indicadas em PIANC (2014). Fonte: PIANC (2014, p.191).	37
Tabela 2: Polinômio de ajustamento desenvolvido por BRIGGS <i>et al.</i> (2006, 2013) para calcular o parâmetro “K1”. Fonte: adaptada de PIANC (2014, p 194).....	41
Tabela 3: Estatística de alturas e períodos de onda na posição geográfica LAT 24.6189° S e LONG 044.4128° W. Fonte: adaptada de SOARES (2016, p.57).	59
Tabela 4: Dados estatísticos coletados entre 1951 e 1990 no Porto de Santos-SP, sazonalidade de sobre-elevações e subelevações, por estação do ano, do nível médio do mar decadal. Fonte: elaboração própria	64
Tabela 5: Maior comprimento calculável para a onda incidente “λ” varia em função da profundidade “Dout” e do maior período de onda incidente “Tp”	68
Tabela 6: Número de Froude de Profundidade (Fn_h) para cada entrada discreta de velocidade “Vs” do navio e profundidade (h) relativa a cada trecho do canal.....	70
Tabela 7: Condições de projeto assumidas	70
Tabela 8: Dados do “Navio de Projeto selecionado” inspirados no Navio “HYUNDAI LOYALTY”	71
Tabela 9: Memória de cálculo dos parâmetros hT e para a razão hT / H correlacionados à inferência do parâmetro “Dout” e identificação das profundidades “H” e “OBD” nos perfis batimétricos selecionados para os três trechos considerando.....	86
Tabela 10: Resumo dos parâmetros calculados necessários à aplicação da formulação de HUUSKA-GULIEV (1976) para estimativa do máximo “efeito <i>squat</i>”	87
Tabela 11: Principais parâmetros calculados e utilizados para estimar o fator máximo “efeito <i>squat</i>”	88
Tabela 12: Fatores de segurança calculados para o trânsito de “entrada” e “saída” para os trechos de interesse no canal.....	107
Tabela 13: Resultado da composição da “PP calculada” e comparação com a “PP selecionada”	108

LISTA DE SIGLAS, SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

SIGLAS	DEFINIÇÃO	UNIDADE
Ac	Área da seção transversal reta submersa do canal	m ²
As	Área da seção transversal reta submersa do navio	m ²
ASCE	American Society of Civil Engineers	
B	Largura do navio em sua máxima seção transversal	metros
BAW	Instituto Federal de Pesquisa e Engenharia Aquaviário alemão	
Br	Razão de bloqueio	adimensional
CB	Coefficiente de Bloco	adimensional
CEM	Coastal Engineering Manual	
CN	Canal de Navegação	
DHN	Diretoria de Hidrografia e Navegação	
FAQ	Folga Abaixo da Quilha = coluna de água abaixo da quilha	metros
FLAQ	Folga Líquida Abaixo da Quilha	metros
Fnh	Número de Froude de profundidade	metros
GISIS	Global Integrated Shipping Information System	
h	profundidade = -z (cota batimétrica)	metros
H	Altura da coluna de água ou da superfície livre em relação ao fundo	metros
h _m	profundidade média da seção transversal submersa do canal	metros
hT	Altura das margens laterais - altura dos overbanks	metros
IALA	International Association Aids to Navigation and Lighthouse Authorities	
IAPH	International Association of Ports and Harbours	
IMPA	International Maritime Pilots Association	
IMO	International Maritime Organization	
LOA	Length overall	metros
Lpp	Comprimento do navio entre perpendiculares	metros
MAIB	Marine Accident Investigation Branch	
MCI	Marine Casualties and Incidents	
n	atividade do talude (h/v)	adimensional
NORMAM	Normas da Autoridade Marítima	
NP	Navio de Projeto ou Navio Design	
NRC	National Research Council	
OBD	Overbank Depths	metros
PCN	Projeto de Canal de Navegação	
PIANC	World Association for Waterborne Transport Infrastructure	
PP	Profundidade de Projeto	metros
RAO	Response Amplitude Operator	adimensional
S	Fator de bloqueio	adimensional
S ₁	Fator de bloqueio corrigido	adimensional
T	Calado máximo estático do navio	metros
TECON	Terminal de Contêineres	
UKC	Gross Underkeel Clearance	metros
USACE	United States Army Corps of Engineers	metros
Vs	Voyage Data Recorder	
VTS	Velocidade Limite de Schijf	
W	Velocidade do Navio	m/s ou nós
WEff	Vessel Traffic System	
Wtop	U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station	

1. INTRODUÇÃO

O Canal de Navegação (CN) deve ser considerado um projeto de infraestrutura portuária e deve atender tanto a **aspectos econômicos**, como também a aspectos relacionados à **segurança da navegação** (NRC, 1983).

Possíveis interações do navio com o fundo ou até mesmo com as margens laterais submersas de um Canal de Navegação podem ser a causa raiz de uma série de incidentes ou acidentes de navegação. Tais aspectos, na maioria dos casos, dizem respeito a falhas operacionais.

Segundo USACE (2006), as operações portuárias, no que tange à navegação, podem ser entendidas como um sistema (Sistema de Navegação) composto por três componentes principais (ou subsistemas):

- Engenharia da via marítima: canais de navegação, fatores ambientais, serviços de dragagem e facilidades portuárias;
- Tráfego marítimo: onde são tratadas regras e regulações operacionais; auxílios à navegação, serviço de praticagem e auxílio de rebocadores, informações, comunicações e sistema de controle de tráfego de embarcações (*Vessel Traffic System – VTS*);
- Hidrodinâmica do navio: navio de projeto (NP), manobrabilidade e controlabilidade, fatores humanos e equipamentos de navegação.

Segundo MCNALLY (2008), projetos de navegação são considerados projetos de engenharia, sob todos os aspectos: *design*, construção, operação e manutenção e, portanto, devem ser desenvolvidos com base em critérios de engenharia definidos através de leis, regulações, códigos, guias, manuais e boas práticas.

Segundo USACE (2006), o Projeto de Canais de Navegação (PCN) é um componente do subsistema Engenharia da via marítima. Embora os PCN sejam primariamente tratados neste subsistema, a troca de informações com outros dois subsistemas é uma necessidade fundamental. Desta forma, o engenheiro e/ou projetista pode analisar de modo integrado todo o “Sistema de Navegação”, considerando também os fatores relacionados ao Tráfego Marítimo e à Hidrodinâmica do Navio.

O comércio marítimo nacional e internacional tem forte contribuição no crescimento econômico de um país e seu comércio exterior. Uma das formas de explorar essa potencialidade é através da realização de investimentos na infraestrutura portuária, envolvendo a realização de obras em seus canais de acesso marítimos e demais vias navegáveis de acesso, objetivando

ampliar sua capacidade para comportar navios de maiores dimensões e calados. Esse tipo de investimento credencia estes portos a fazerem parte de rotas internacionais de transporte marítimo, operadas por navios de grande porte, e ainda provê vantagem competitiva, em relação a demais portos e terminais privados nacionais (GILMAN, 1999; GOURLAY *et al.*, 2015).

As dimensões de um CN ditam as dimensões de um navio que nele podem navegar (com meios próprios), assim como a necessidade de estabelecimento de auxílios à navegação marítima (externos ao navio). Também é fato notório que o PCN é fortemente influenciado pelo tamanho do Navio de Projeto e pela acurácia dos auxílios à navegação disponíveis (USACE, 2006, p. 2-4).

Diante da afirmativa “espelhada” acima, pode-se afirmar que o crescimento das dimensões dos navios exerce “pressão” sobre a infraestrutura de acesso marítima portuária, que conseqüentemente precisa ser frequentemente verificada e eventualmente readequada, inclusive em termos de necessidade realização de obras de dragagem.

Nos últimos 50 anos, a capacidade dos navios porta-contentores cresceu aproximadamente 1500%, tal como demonstrado na Figura 1. O aumento da capacidade de carga dos navios também foi acompanhado pelo aumento do seu calado, no entanto, a infraestrutura do canal de acesso dos portos nacionais não acompanhou esta evolução.

A indústria de construção naval vem construindo navios cada vez maiores (GILMAN, 1999; PIANC, 2018), exercendo uma pressão competitiva natural sobre os portos e terminais nacionais para comportar a operação desses novos navios. Conforme GOURLAY *et al.* (2015), “as novas gerações de navios contentores trouxeram novos desafios no gerenciamento da folga abaixo da quilha em canais restritos, especialmente pela profundidade.”.



Figura 1: Crescimento das dimensões e capacidades de carga dos navios nos últimos cinquenta anos. Fonte: ALLIANZ (2019, p.21)

Segundo NRC (1983), aspectos relacionados à segurança da navegação podem ser observados a partir da análise das dimensões dos Navios de Projeto (NP) selecionados, assim como pelos critérios estabelecidos no próprio projeto, doravante indicados como “Critérios de Projeto”. Tais referências devem justificar o dimensionamento do CN, considerando, inclusive, a operação futura de navios de grande porte, dimensões e calado (USACE, 2006). Logo, a seleção do Navio de Projeto é um elemento fundamental, que conceitualmente deve ser conduzida a partir de um amplo estudo, considerando os diversos tipos e tamanhos de navios que poderiam transitar, com segurança, no canal durante a vida útil do projeto.

Diversos aspectos precisam ser considerados, entre eles: os navios de maiores dimensões, aqueles que possuem menor capacidade de manobra, as condicionantes ambientais seguras, a velocidade máxima permitida, o uso consciente da vantagem da maré, a disponibilidade de assistência e capacidade operacional de rebocadores, assim como especificidades relacionadas ao das embarcações na região (NRC, 1983, p. 2-5).

Propiciar a devida segurança a projetos que envolvam navios com grandes calados é uma grande preocupação de diversas instituições globais, dada a importância do comércio marítimo no cenário mundial (PIANC, 2018) e a necessidade de reduzir custos relativo ao transporte. O parâmetro chave, invariavelmente, é o Navio de Projeto selecionado, ou Navio-Tipo, e suas dimensões.

Uma adequada Sinalização Náutica, embora não impeça a ocorrência de acidentes, certamente auxilia o navegante, para que não haja tais acontecimentos, e sem dúvida reveste-se de significativa contribuição e obrigação do Estado Costeiro, à medida em que ele se torna necessário sob a análise do risco inerente ao tipo e volume de tráfego de embarcações.

Os auxílios à navegação marítima (AToN) têm função semelhante às placas e sinais de trânsito instalados em uma rodovia. A principal diferença entre uma hidrovia, ou seja, um CN e uma via navegável qualquer é a exigência relativa à permanente disponibilidade de uma adequada sinalização náutica.

Nas últimas décadas, navios com dimensões e calados cada vez maiores vêm sendo construídos e o acesso portuário desses navios tem norteado a seleção dos Navios de Projeto. Isto deveria obrigatoriamente requerer a readequação da infraestrutura do CN, inclusive relacionada ao Projeto de Sinalização Náutica.

Em termos de profundidade, o aumento histórico do calado e da dimensão dos navios mercantes invariavelmente representa uma diminuição das margens de segurança do Projeto inicial do Canal de Navegação. A Figura 2 demonstra que, para uma mesma infraestrutura do CN, o risco de toque no fundo, em termos de probabilidade de ocorrência, tende sempre a aumentar com o aumento do calado do navio. A diminuta folga abaixo da quilha tende a comportar menor amplitude de movimentos verticais do navio, especialmente em movimento e sob ação de suas próprias máquinas.

AUMENTO DO CALADO DOS NAVIOS AO LONGO DOS ANOS

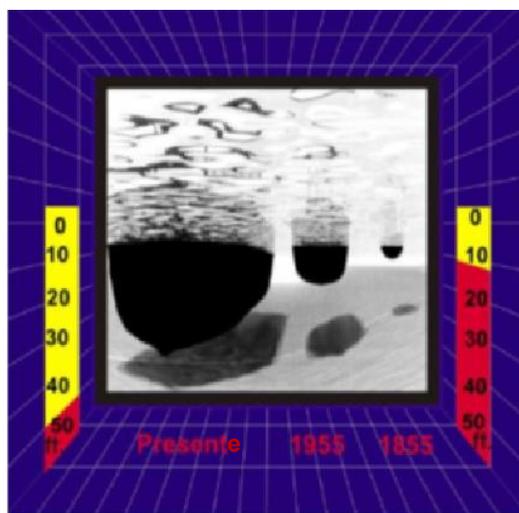


Figura 2: Representação gráfica do crescimento das dimensões e calado dos navios ao longo dos anos e a consequente redução das margens de segurança abaixo da linha da água.

Fonte: desconhecida

A indicação de determinado Navio de Projeto (NP) em um Projeto de Sinalização Náutica pode ser perturbadora quando o calado máximo deste navio e a profundidade a ser defendida são da mesma ordem de grandeza ou de valores próximos. A verificação da adequação da seleção do NP, caso viável, demonstra ser um aspecto de interesse sob o aspecto da Segurança da Navegação, passível de avaliação. Naturalmente isto indica que a futura

navegação deste Navio-Tipo, sob meios próprios, tenderá a ter pequenas margens de segurança, tornando-se em alguns casos até mesmo insuficientes em determinada infraestrutura de CN já existente, não plenamente adequada a esta seleção.

Dentro do Escopo de um Projeto de Sinalização Náutica, isso não significa que o NP será incapaz ou impossibilitado de navegar naquele CN, mas sim que a aceitação de um grande risco ao “toque no fundo” foi assumida. Isso também pode significar a obrigatoriedade da implementação de controles de riscos adicionais e até mesmo a inviabilidade de realização do trânsito de determinado NP, utilizando para isso única e exclusivamente meios próprios.

Desta forma, a disponibilidade de um parâmetro de avaliação de determinada Profundidade de Projeto a determinado trecho ou segmento do CN, à luz do calado estático máximo do NP selecionado, revela-se um bom parâmetro referencial quanto à segurança desta seleção, que impactará diretamente nos Projetos de Sinalização Náutica, uma vez que podem indicar se a profundidade a ser defendida pelos Sinais Laterais encontra-se adequada ao NP selecionado.

Segundo PIANC (2014, p. 21), além das dimensões do Navio de Projeto, diversos outros aspectos podem ser observados, tais como: a capacidade de propulsão destes navios, a qualidade da sinalização náutica, a aplicação de procedimentos operacionais mais restritivos, o emprego de um maior número de rebocadores ou de rebocadores de maior potência, o embarque de práticos, a realização de simulação de manobras, *etc.*

A realização de obras de dragagem é a principal ferramenta objetiva na busca de obter melhores condições de infraestrutura à navegação, provendo a manutenção da profundidade nominal (dragagem de manutenção) ou adequando-o a uma nova seleção (dragagem de aprofundamento). Como consequência natural da realização de uma obra, uma dragagem de aprofundamento ou de derrocagem das margens de CN, é necessário o reestabelecimento de uma nova sinalização náutica, adequada a sinalizar, na superfície do mar, a profundidade mínima a ser defendida.

Sob o aspecto de projeto, a indisponibilidade do acesso marítimo a determinado navio de interesse devido à restrição de calado determina o “*downtime* vertical” do CN. Ao selecionar uma maior Profundidade de Projeto para explorar sua potencialidade econômica, em tese, o “*downtime* vertical” diminui, e torna o acesso marítimo, não tão seguro, considerando a diminuta margem de segurança, tendente à insuficiência.

Em teoria, a execução de obra de dragagem de aprofundamento ou derrocagem objetiva diminuir o “*downtime* vertical” do CN ou do PCN, de modo a viabilizar a navegação, por meios próprios, dos navios ao longo do CN. Pode-se dizer que as obras de dragagem e/ou derrocagem

são realizadas para atender às dimensões estabelecidas no PCN, que deve contemplar aspectos relacionados à sobredragagem e eventuais compensações das incertezas relacionadas à obra de dragagem em si, para atendimento das condições necessárias, que devem estar previstas no PCN.

No entanto a profundidade em si não é um parâmetro isoladamente analisado em um CN já estabelecido. A largura útil do CN deve estar adequada à profundidade mínima segura ao tráfego do NP selecionado; somente assim o acesso marítimo poderá estar bem-sinalizado ao navegante.

Nesta dissertação será assumido com NP selecionado um navio cujas dimensões características e calado são semelhantes à dos navios que atualmente vêm operando no canal de acesso marítimo ao Porto de Itaguaí-RJ. Trata-se de um estudo de caso fictício, que apresenta componentes reais, sujeitos à avaliação, e outros que precisaram ser assumidos, para a necessária quantificação dos resultados quantitativos.

Atualmente a NORMAM-17/DHN (5ª Revisão) estabelece normas, procedimentos e instruções sobre auxílios à navegação para aplicação nas Águas Jurisdicionais Brasileiras (AJB), mas não há normas ABNT que tratem sobre a verificação geométrica de Projetos de Canais de Navegação (PCN). Como consequência, não há critérios nacionais que possibilitem fazer uma análise mais profunda a respeito da seleção da “Profundidade de Projeto”, uma vez que ela é tratada apenas como um dado de entrada (uma informação) em um Projeto de Sinalização Náutica, que corretamente se restringe a analisar aspectos técnicos específicos relacionados à importância da padronização destes auxílios a nível internacional, considerando o aspecto das conexões e rotas marítimas globais.

Assim como PIANC (2014), a atualização, em 2017, da NBR ABNT 13246, trazia em seu escopo que a seleção da profundidade de dragagem deveria ser em função das ondas e das marés locais, devendo ser baseada em considerações ambientais e econômicas; porém as consequências desta escolha deveriam ser a variação dos horários nos quais o canal poderia ser navegável, com segurança, e não uma variação dos níveis de segurança: os requisitos de segurança, portanto, deveriam ser sempre mantidos.

Segundo (IALA, 2018, p.115), é útil analisar os requisitos funcionais de um PCN em diferentes partes, considerando aspectos relacionados à localização geográfica de determinados trechos, focando na diferenciação entre segmentos mais externos (próximos ao mar aberto e desabrigados) e internos. Tal aspecto remete, portanto, à necessidade de considerar a expectativa de movimentos verticais no dimensionamento da mínima profundidade necessária ao trânsito do NP selecionado.

A IALA reconhece que a utilização de simulações possibilita o importante provimento de informações ao desenvolvimento do PCN, inclusive quanto ao estabelecimento de auxílios à navegação:

“O propósito da simulação na avaliação de projetos é avaliar os riscos de um determinado Navio de Projeto operando em uma via navegável e área portuária. Isto também inclui a avaliação da geometria do canal de navegação, estabelecimento de auxílios à navegação e aspectos relacionados à manobrabilidade.” (IALA, 2018, p. 117).

Em relação à navegação marítima, a Organização Marítima Internacional (IMO) estabeleceu a necessidade de maior acurácia da posição, como requisito para a fase de navegação compreendida pelas áreas marítimas costeiras, águas restritas de acessos marítimos portuários, cujo valor mínimo exigido é 10 metros, com uma confiabilidade de 95% (acurácia horizontal absoluta), de acordo com a Resolução A.915 (22) da organização.

Deve-se considerar que esta acurácia não considera, por exemplo, a amplitude máxima de seus movimentos enquanto flutua sobre a superfície da água. Esta pode ser estimada em termos de um “raio de giro” máximo admissível, centrado na posição de lançamento de sua poita de ancoragem, localizada no fundo do mar.

Segundo IHO (2020), “em algumas áreas, a localização atual de potenciais perigos pode ser substancialmente diferentes, horizontalmente e verticalmente, daqueles que estão cartografados”. Consequentemente, o navegante pode não estar tão seguro quanto ele acha que está quando navegando sobre máquinas. Nesta situação, cresce a importância da Sinalização Náutica em águas restritas pela profundidade e da informação quanto à profundidade por elas defendida.

Em um Projeto de Estabelecimento de Sinais Náuticos, a Profundidade de Projeto é a profundidade que será defendida pelos pares de sinais laterais, que definem os limites laterais em um CN.

Segundo IHO (2020), a qualidade dos dados batimétricos (acurácia da batimetria) é uma combinação entre três fatores principais: (a) acurácia da posição; (b) acurácia da profundidade; e (c) a cobertura do leito submarino. Conhecidas as incertezas quanto à informação da profundidade, assim como a necessidade de que ela seja minimamente suficiente para comportar os movimentos verticais do navio possivelmente observados durante o trânsito sob máquinas e meios próprios, não se pode admitir erros grosseiros na seleção de uma determinada Profundidade de Projeto, no escopo de um Projeto de Estabelecimento de Sinais Náuticos.

É importante que seja conduzida uma avaliação quanto a esta seleção. Não há obrigatoriedade quanto à utilização de ferramentas computacionais de simulação na realização

desta análise. As incertezas relacionadas à informação de profundidade exigem o estabelecimento de mínimas margens de segurança.

No entanto, uma vez que um CN já foi implementado, como verificar a adequabilidade da Profundidade de Projeto ao maior Navio-Tipo? Como dimensionar a segurança relacionada ao trânsito e certas condições ambientais? Qual foi o nível de segurança alcançado pelas condições iniciais? Como avaliar a necessidade de implementação de medidas de controle de risco sem o conhecimento de tal nível ou uma referência quantitativa.

A extinta NBR ABNT 13246:2017 tentou internalizar dois diferentes métodos procedimentais de verificação do PCN, a fim de checar se ele atendia a todas as exigências das recomendações contidas em PIANC (2014): Determinístico e Probabilístico. A metodologia “determinística” para a verificação da dimensão geométrica horizontal, ou seja, da Largura do Canal, recomendava a realização de estudos de simulação ou modelagem física. Já a verificação da dimensão geométrica vertical, ou seja, da Profundidade de Projeto, não foi objetivamente recomendada.

No presente capítulo foi apresentada uma breve introdução, histórico e contextualização do problema, destacando uma mais detalhada definição do que vem a ser um CN para o sucesso de um empreendimento portuário. O capítulo II aborda a importância da profundidade em um Projeto de Sinalização Náutica, destacando a aplicação dos Sinais Laterais pertencentes ao Sistema de Sinalização Náutica da *International Association of Marine Aids to Navigation and Lighthouse Authorities* (IALA), cuja principal função é orientar a navegação visual e a manutenção da posição do navio em relação aos limites geográficos do CN.

No capítulo III são apresentadas as referências bibliográficas utilizadas, que embasaram o desenvolvimento dos cálculos e objetivaram o cômputo e valoração da “PP calculada”, enquanto no capítulo IV foi apresentado o desenvolvimento do estudo proposto e os fatores selecionados para a composição da “PP calculada” e a abordagem utilizada para o cômputo destes fatores, à luz dos critérios de projeto assumidos, para a quantificação do valor da “PP calculada” para cada trecho. Tal valor serviu como base para a relativização do grau de segurança alcançado em diferentes trechos e em diferentes trânsitos no CN (de entrada e saída), tomando por base a razão entre a “PP calculada” e o calado máximo estático (T) do Navio de Projeto selecionado.

Outros fatores considerados na composição da “PP calculada”, tais como condição desfavorável da maré, efeito da variação da densidade da água no calado e margem de segurança são tratados de forma marginal, uma vez que tal estimativa depende da análise e combinação de fatores ambientais associados à interação com o navio, que não foram abordados nesta

dissertação. Para esses fatores, não foram apresentados cálculos, mas apenas valores estimados disponíveis na literatura afeta ao tema.

No capítulo V é apresentada a discussão dos resultados obtidos, analisando sua contribuição na aplicação da metodologia de análise proposta, que objetiva contribuir para o desenvolvimento mais abrangente da análise de Projetos de Sinalização Náutica, no contexto de aspectos relativos à Segurança da Navegação. Já no capítulo VI, são apresentadas as conclusões obtidas neste trabalho, com base nos objetivos traçados a seguir.

1.1. Objetivos

Em portos em que acesso marítimo é regulado pela Autoridade Portuária, o nível de segurança individual dos trânsitos pode variar, mesmo sob as mesmas condições operacionais limites, para determinado Navio-Tipo de grandes dimensões e calado em canais essencialmente restritos pela profundidade.

Segundo PIANC (1985.p. 16), “a acurácia com a qual tais situações são analisadas determinará o grau de confiança no estabelecimento da profundidade do canal e das limitações de velocidade dos navios”. Deve-se ter em mente que a sinalização náutica deve priorizar mais a segurança do que eficiência do tráfego marítimo. Esta segurança é sintetizada pela seleção da Profundidade de Projeto e pelas condições que determinaram esta seleção (Critérios de Projeto).

O objetivo principal desta dissertação é quantificar o nível de segurança da Profundidade de Projeto selecionada em um Canal de Navegação, para o trânsito de entrada e saída de determinado Navio de Projeto, à luz da assunção de pré-determinados “Critérios de Projeto”. Os objetivos específicos são os seguintes:

- Esquematização e regionalização conceitual do CN, como ferramenta de apoio na análise do grau de restrição.
- Determinação da “PP calculada” incluindo diferentes metodologias determinísticas para os movimentos verticais do navio, incluindo o efeito *squat*.
- Avaliação do efeito no cálculo da PP de diferentes condições ambientais, principalmente à incidência de ondas, da configuração geométrica do canal e da velocidade do navio; e parametrização do fator de segurança, definido pela comparação da PP calculada e a selecionada.

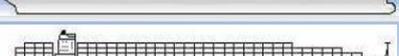
1.2. Contextualização histórica

Em 1980 foi realizado nos Estados Unidos da América (EUA) um estudo interdisciplinar sobre o projeto de vias marítimas de acesso portuários, coordenado pelo Comitê

Marítimo americano, onde foram identificados grandes problemas relacionados ao tema “segurança da navegação nos canais de acesso aos portos americanos”. Alertado sobre as conclusões do estudo, o Corpo de Engenheiros do Exército dos Estados Unidos (USACE) encomendou uma avaliação técnica mais profunda a respeito da adequabilidade dos critérios utilizados nos EUA para a determinação da “Profundidade de Projeto” dos canais dragados de acesso marítimo aos principais portos da costa americana, considerando ambiente costeiro, características do navio, sedimentação e efeitos de interação navio-ambiente costeiro.

Segundo NRC (1983, p. 5-1), o Comitê de Pesquisa Nacional americano concluiu que as características dos Navios de Projeto originalmente utilizadas nos Projetos de Navegação de grande parte dos portos dos Estados Unidos já não tinham correlação com as características dos navios que vinham operando em seus CN, indicando que os PCN americanos não haviam se atualizado nos últimos 30 anos¹. Como consequência, o dimensionamento do *Gross Underkeel Clearance (UKC)* para os quais haviam sido projetados já não era mais adequado e deixava de oferecer uma mínima margem de segurança (*safety sargin*) recomendada pelas organizações internacionais (NRC, 1983, p. 5-2).

Embora a percepção americana seja relativa ao ano da referida publicação, ou seja, 1983, o crescimento das dimensões dos navios continuou acentuado nas três décadas seguintes,

Geração (ano)		TEU	Comprimento (m)	Boca (m)	Calado (m)
1. (1972)		<= 1.500	225	24,5	9,0
2. (1980)		<= 3.000	275	27,5	10,0
3. (1987)		<= 4.500	300	32,2	11,5
4. (1997)		<= 6.600	320	40,0	14,3
5. (1999)		~ 8.300	347	42,6	14,5
6. (2005)		~ 9.400	340	46,5	15,0
7. (2006)		~ 15.500	397	56,4	16,0
8. (2015)		~ 21.000	400	59,0	16,0

¹ Trata de um estudo elaborado na década de 1980, que considerou o critério utilizado nos projetos portuários americanos “ultrapassados”, pois datavam da década de 1950.

conforme observa-se na Figura 3. Este crescimento foi consequência da evolução tecnológica da indústria de construção naval global, impulsionada pelo interesse econômico da indústria do transporte marítimo em reduzir custos, transportando mais carga, em menor espaço de tempo e em um número maior de vezes (GILMAN, 1999; PIANC, 2018).

Figura 3: Crescimento das dimensões dos navios porta-contentores ao longo dos anos (1972-2015)”. Fonte: ITF (2017. p. 21)

É possível traçar um paralelo entre a situação identificada na década de 80 nos Estados Unidos e a atual conjuntura da infraestrutura portuária brasileira de acesso marítimo aos portos. Os estudos realizados e publicados em NRC (1983) apontaram para a importância de atualizar “as regras de ouro” aplicadas ao dimensionamento dos PCN, com base nos estudos científicos que vinham sendo desenvolvidos à época, e, entre eles, os relacionados aos efeitos da restrição da seção reta do CN na estimativa do máximo “efeito *squat*². Naquele tempo, o “efeito *squat*” já era reconhecido com um dos principais fatores a serem considerados na seleção de uma adequada Profundidade de Projeto.

Muitos acidentes marítimos são tipificados com base em algum tipo de interação, seja ela entre navios ou entre um navio e outras coisas. A interação (em inglês: *interaction*) pode ter como causa um fenômeno hidrodinâmico e se manifestar sob inúmeras formas involuntárias, tais como alterações de velocidade e/ou incontroláveis mudanças repentinas do aproamento da embarcação.

A insuficiência de água abaixo da quilha é um dos principais aspectos relacionados a ocorrência de incidentes e/ou acidentes da navegação. O gerenciamento da folga abaixo da quilha é uma atividade estritamente operacional, conduzida individualmente em cada trânsito de interesse é desenvolvido a partir de um “Sistema de Gerenciamento da Segurança Portuária” (*Port Safety Management System*) (PARKER, HUFF, 1998).

Por tratar-se de aspecto operacional, não será tratado nesta pesquisa, uma vez que o seu parâmetro chave é o gerenciamento do calado do navio, e conseqüentemente das margens de segurança, aplicáveis a diferentes condições meteoceanográficas.

“Se o sistema de pressão atuando sobre as obras vivas do navio é de qualquer forma alterado, seu estado de equilíbrio será afetado. Ele pode ir mais rápido ou devagar, sair do seu curso, sua superfície pode afundar mais profundamente na água e menos

² *Squat* é o afundamento do navio devido a redução da pressão exercida pelo escoamento da água em torno do casco do navio em movimento e inclui o *sinkage* (afundamento médio) somado a um movimento induzido de *trim*. O “efeito *squat*” é caracterizado pela redução da coluna de água entre o casco do navio e o leito do canal. (USACE, 2006)

em outra (*squat*), ou causar um ‘*trim*’ diferente.” (THE NAUTICAL INSTITUTE, 1995, p.1-2).

Sob o aspecto de projeto, o valor considerado para o calado do navio é invariavelmente o valor do calado estático máximo (T) do Navio de Projeto, ou seja, aquele que é medido estaticamente em pleno carregamento, em águas salgadas, e remete à uma característica do projeto de construção do navio (USACE, 2008, v-5-6).

O risco da severidade das consequências é de difícil mensuração, pois há diversas variáveis envolvidas. Considerando o peso bruto dos atuais navios mercantes, mesmo um aparentemente leve “toque no fundo” pode representar um potencial grave acidente marítimo. Esta relação se dá pelo fato de que a quantidade de movimento e inércia de um navio de grande porte é imensa, mesmo quando navega a baixas velocidades ou é rebocado. Desta forma notificar esse tipo de ocorrência parece ser fundamental.

Na Europa, a Convenção de Proteção ao Ambiente Marítimo da Área do Mar Báltico, também conhecida como Convenção Helsinki, originalmente assinada em 1974 por todos os países costeiros daquele mar, vigorara desde 3 de maio de 1980. Seus países membros formaram um secretariado³, sediado na cidade de Helsinki, na Finlândia, denominado como “Comissão de Helsinki” (*Baltic Marine Environment Protection Commission*), ou HELCOM.

Segundo IALA (2018, p. 122), o Comitê IMO Helsinki estabeleceu um requisito de *Gross Underkeel Clearance (UKC)* entre 10% e 20% do calado do navio, que deve ser aplicado no PCN quando determinado setor do CN está mais exposto: onde maiores requisitos mínimos são exigidos. Em setores ou segmentos mais abrigados do CN, o requisito de *UKC* é menor.

Tal faixa de valores relacionava: (i) uma estimativa de requisito de *UKC*, considerando a velocidade do navio igual a zero, (ii) uma máxima estimativa para o efeito *squat* (para uma pré-determinada velocidade) em determinado nível médio de água (profundidade), (iii) uma estimativa para o movimento vertical do navio devido a ondas, e (iv) uma estimativa para o tombamento lateral devido ao vento e a guinadas, assim como tolerância para as incertezas relacionadas ao nível da água e da cota de fundo.

Conforme disposiçõesⁱ da Comissão de Proteção Ambiental Marítima do Mar Báltico, pertencente ao HELCOM, cada Estado Costeiro ou Autoridade Portuária pode estabelecer requisitos locais obrigatórios ou recomendados para o requisito de *UKC* ou o máximo calado permitido, que são abordagens completamente distintas. No entanto, os comandantes das embarcações devem agir adequadamente em circunstâncias nas quais o *UKC* de seus navios

³ IMO Helsinki Committee: informações disponíveis na página <<https://helcom.fi/about-us/>>. Acesso em 12 de janeiro de 2020.

fica reduzido, de modo a garantir a segurança do seu navio, sua tripulação e sua carga, a proteção do meio ambiente e quaisquer outras circunstâncias legítimas, uma vez que são responsáveis, em última instância, por adequadamente gerenciar o *UKC* de seus navios, durante toda a trajetória planejada da viagem (de berço a berço).

Visando registrar deficiências ou abusos no trato de gerenciamento *UKC*, o Reino Unido, desde 2016⁴, dispõe de dispositivo legal que obriga e padroniza os registros e notificações de “quase- acidentes” (em inglês: “*near-misses*”). A obrigatoriedade de notificar *Marine Accident Investigation Branch (MAIB)* vigora desde 2019 e é aplicável a todos os Comandantes de embarcações comerciais, excluindo apenas aquelas cujo comprimento total seja inferior a 8 metros.

Assim como a *MAIB*, a *International Maritime Organization (IMO)* também está interessada em ampliar conhecimentos sobre a relação causa-efeito deste tipo de ocorrência e solicita a membros governamentais que atendam o disposto na circular *MSC-MEPC.3/Circ.4/Rev.1*, p. 3, fornecendo informações similares através de uma plataforma denominada *Global Integrated Shipping Information System (GISIS)*, no módulo “*Marine Casualties and Incidents*” (*MCI*).

No Brasil, o “toque no fundo” (em inglês “*bottom touch*” ou “*bottom contact*”) com consequências mais graves, pode ser tipificado como um “encalhe”, que é um tipo de acidente da navegação.

Há subnotificação de incidentes do tipo “toque no fundo” uma vez que seu registro e notificação não são mandatórios em águas jurisdicionais brasileiras, sobretudo quando não resultam em aparentes danos materiais à embarcação (compartimentos localizados abaixo da linha da água), prejudicando uma melhor conscientização situacional respeito dos seus possíveis impactos negativos e possíveis consequências, muito menos o registro fático estatístico quanto à sua contribuição para a ocorrência de acidentes mais graves.

O risco que se buscou quantificar nesta dissertação diz respeito à escolha e seleção de uma determinada Profundidade de Projeto, em relação a um determinado Navio de Projeto, à luz de critérios pré-estabelecidos e sob a ótica da segurança da navegação.

Segundo *PIANC (2014)*, a análise do tráfego marítimo e dos riscos associados é necessária para verificar e garantir a utilização segura não só do canal projetado, mas de todo o

⁴ Informação obtida no site <https://www.gov.uk/government/publications/report-a-marine-accident#history>. Trata-se da padronização de um formulário de notificação de acidentes *ARF (Accident Report Form)*. Acesso em: 28 de março de 2019.

acesso náutico. Grande ênfase é dada ao método probabilístico de cálculo da profundidade navegável, em detrimento do método determinístico, que é taxado como ultraconservador.

A aplicação da presente metodologia utilizando uma regra estática e uma abordagem determinística para cômputo dos fatores componentes da “PP calculada” aplica-se exclusivamente à análise de Projetos de Sinalização Náutica, na qual um par de sinais laterais é utilizada para sinalizar os limites do Canal de Navegação (CN). Ela parametriza os riscos da seleção de uma determinada Profundidade de Projeto e tem caráter verificador. Também objetiva contribuir para futura padronização de níveis de segurança, que tem potencial função orientadora quanto à necessidade de tratamento de riscos especificamente relacionados à baixa profundidade, mediante a sua simples identificação e quantificação, possibilitando a avaliação quanto à compatibilização do CN existente com o Navio de Projeto selecionado.

A necessidade de fazer tal verificação não é uma novidade, uma vez que já era contemplada desde 1995 na ABNT:

“O dimensionamento geométrico... deve ser verificado para as condições de uso requeridas na instalação, de acordo com a função do porto para o horizonte de projeto, considerando-se as efetivas peculiaridades geomorfológicas e do meio ambiente locais, e exigências...dos navios de projeto”. (ABNT, 1995, p. 2)

No entanto, esta norma não mais vigora em território nacional desde 31 de julho de 2017, quando foi cancelada. Embora não seja diretamente afeta a aspectos técnicos envolvidos em Projetos de Sinalização Náutica, ela envolve aspectos gerais correlatos a Projetos de Navegação, exatamente como abordado por USACE (2006, 2008), inclusive quanto ao dimensionamento geométrico do CN, seja o seu canal de acesso ou o seu canal de aproximação.

A ABNT (1995, p.2) deixava claro que a verificação da geometria do CN estava relacionada à verificação quanto requisitos mínimos que devem ser atendidos. A Profundidade de Projeto, enquanto dimensão vertical, deveria ser, portanto, verificada e definida a partir de um parâmetro mínimo, mas que consideraria não só a referência o NR estabelecido pela DHN como nível *datum* da profundidade (h) como também pela condição de águas tranquilas, tendo deixado de definir o que seriam “águas tranquilas”.

“Para os efeitos do dimensionamento geométrico, a largura do canal é a distância entre as soleiras dos taludes laterais na profundidade de projeto do canal.” (ABNT, 1995, p. 4).

Segundo a norma ABNT 13246:1995, tal verificação implicaria:

- Que a profundidade mínima fosse de valor igual ao calado estático máximo do maior navio de projeto e incluísse fatores e folgas mínimas ou 10% do calado máximo, devendo ser adotado o maior destes dois valores;
- Que fosse considerado o movimento vertical induzido, devido à ação das ondas;

- Que fosse considerado o “efeito *squat*”;
- Que fosse considerado uma folga adicional, em função da natureza do fundo do canal.

“É difícil prever quando os benefícios da economia de escala, que levaram ao aumento do tamanho e calado dos navios, finalmente irão alcançar um limite...o principal fator proibitivo será a indisponibilidade de recursos para a maioria dos portos dragar adequadamente seus canais para acomodar esses grandes navios... até lá a determinação mais precisa possível da folga abaixo da quilha será crítica à segurança e economia portuária” (INTERNATIONAL HYDROGRAPHIC BUREAU, 1998, p. 144).

2. A IMPORTÂNCIA DA PROFUNDIDADE NA ANÁLISE DE PROJETOS DE SINALIZAÇÃO NÁUTICA

Segundo IHO (2020), apenas 5% das águas costeiras mundiais possuem informações de batimetria com alto grau de acurácia. Este dado demonstra a importância de se ter dados batimétricos de qualidade e de considerar os seus possíveis impactos sobre a segurança da navegação.

Ela pode variar não somente pela acurácia alcançada pelos levantamentos como também pela desatualização temporal destes. As informações batimétricas possuem diferentes qualidades, o que pode significar a representação cartográfica de um determinado perigo à navegação com uma acurácia horizontal da informação de posição variável entre 5 e 500 metros; assim como uma acurácia vertical da informação de profundidade variável de 0,5 a 7 metros, segundo IHO (2020).

Tendo em mente que a coluna de água abaixo da quilha tende a ser relativamente pequena em relação à profundidade nominal de um CN, este precisa ser regularmente dragado de modo a manter as mínimas profundidades admissíveis, visto que as profundidades internas estão sujeitas a variações temporais, relacionáveis tanto a processos humanos, naturais como operacionais do CN.

O estabelecimento de sinais náuticos contribui para a maior segurança, especialmente do trânsito dos navios mercantes de grande porte, cujo risco é maior devido às peculiaridades relacionadas à restrição da capacidade de manobra destes navios e aos custos para pagamento de seguros e resseguros dos navios e suas cargas.

A profundidade a ser defendida pelos sinais náuticos em um CN está intrinsecamente associada a: (i) ao estabelecimento das dimensões máximas dos Navios de Projeto e seu respectivo calado; (ii) ao estabelecimento do “requisito de UKC”; (iii) à qualidade dos sinais náuticos; e (iv) à necessidade de manter as informações de batimetria no CN atualizadas.

O emprego de uma adequada sinalização náutica muito contribui para a segurança da navegação. Trata-se de um auxílio visual à navegação marítima, cuja importância é internacionalmente reconhecida. Os sinais náuticos têm o propósito de auxiliar a navegação e comunicar visualmente a existência de profundidades proibitivas ou não recomendadas, alertando o navegante sobre a necessidade de uma ação proativa na condução do navio e

ampliação da sua consciência situacional, especialmente fundamental na navegação em águas restritas, tais como aos de acesso marítimo portuário.

A posição de projeto representada nos documentos náuticos oficiais deve estar materializada na posição geográfica de lançamento de sua poita no fundo do mar e objetiva defender uma profundidade de interesse (indicando águas seguras à navegação), ou sinalizar a existência de um perigo à navegação.

Segundo IALA (2011), sinais do tipo “Laterais” (fixos ou flutuantes), ao sinalizarem os limites horizontais do CN, devem preferencialmente formar “portões” e seus pares serem estabelecidos e posicionados de forma equidistante ao eixo transversal ao CN. O dimensionamento da Largura de Projeto (W) em uma determinada seção transversal do CN é um parâmetro primário para a adequabilidade da seleção de um NP. Sua fundamentalidade é mais facilmente demonstrável em situações naturais mais adversas e críticas que podem vir a colocar a navegação em maior risco, na qual sistemas e recursos eletrônicos de navegação e posicionamento embarcados deixam de funcionar e oferecer, mesmo que temporariamente, a acurácia posicional necessária ou se tornam indisponíveis, durante a navegação em águas restritas pela profundidade, quando a situação tende a ser ainda mais crítica.

Admite-se que a incerteza horizontal da posição de um sinal flutuante sobre a superfície da água é bem maior do que aquela associada a um sinal fixo (baliza, ou boia articulada, por exemplo), em função das incertezas posicionais do sinal náutico visualmente identificado somente na superfície da água.

Pode-se dizer que a incerteza horizontal associada a um sinal flutuante está especificamente relacionada à profundidade cartografada, uma vez que as recomendações da IALA e dos fabricantes destes sinais comumente apontam como um parâmetro indispensável ao dimensionamento da sua linha de fundeio, que a prende ao conjunto integrado pela sua poita.

O processo que mede a coluna de água e identifica o relevo do fundo do mar é a sondagem batimétrica. As sondagens, ao serem devidamente tratadas e qualificadas, indicam profundidades de uma área geográfica que, para serem representadas em uma carta náutica, precisam ser reduzidas a um mesmo nível de referência.

Segundo PIANC (2014. p.23), a profundidade navegável estaria associada a um determinado nível de água de projeto, sem citar especificamente o termo “Profundidade de Projeto”, apenas a necessidade de que todos os fatores da profundidade sejam relacionados a um mesmo nível *datum*.

“Nível *datum*” é um determinado nível ou cota vertical (z) cujo valor de referência é comum a todos os dados. Os dados batimétricos constantes nas cartas náuticas também são

designados profundidades cartografadas. A cota vertical de referência das profundidades cartografadas é o Nível de Referência (NR) da carta náutica local de maior escala.

Todos os dados batimétricos adquiridos em levantamentos aprovados são reduzidos a um mesmo nível ou cota de referência, conhecida como “Nível de Redução (NR)”. Este nível é exatamente o mesmo de todo e qualquer informação de profundidade existente na carta náutica e conhecido como “Zero DHN”.

Segundo a IALA, para fins de aplicação em Projetos de Sinalização Náutica, a profundidade máxima média (H) pode ser calculada da seguinte forma:

$$(1) \quad \begin{array}{l} H = \text{Profundidade cartografada} + \text{Máxima altura da maré} + \\ + 0,5 \times \text{altura máxima da onda incidente} \end{array}$$

Considerando as recomendações da IALA, para uma Profundidade de Projeto (PP) igual a 22,5 metros, o “raio de giro” máximo seria de 63 metros. Já para uma PP igual a 17,4 metros, o valor máximo possível do “raio de giro” seria igual a 49 metros.

Os valores acima superestimam a realidade uma vez que os fabricantes dos sinais flutuantes orientam, à luz das condicionantes ambientais locais comumente esperadas, os materiais e dimensões da linha de fundeio de forma que a catenária formada mantenha a boia o mais próximo possível da posição original de projeto. Tal quantificação revela apenas o fato de que sinais flutuantes quase nunca flutuam exatamente sobre a sua posição de projeto, ou seja, exatamente onde foram estabelecidos ou cartografados nas cartas náuticas. Segundo RODRIGUES (2019), tanto em canais dragados como em canais naturais, a incerteza devido à derivação do sinal flutuante sempre se configura como um risco potencial, gerando dúvidas para o navegante, o que pode o levar a um acidente de graves consequências.

Em PCN que contemplem a utilização de sinais flutuantes, por exemplo, a adição de sobre larguras (em inglês “*reserve*”) à faixa de manobras impacta diretamente no dimensionamento da Largura de Projeto (W) (IALA, 2011, p.13) e por esta razão IALA (2011, 2018) e PIANC (2014) recomendam o emprego de simulação como ferramenta de verificação da adequabilidade da Largura do CN, que é um cálculo mais sensível em trechos de curva.

Considerando que é notório o excesso de confiança sobre a navegação eletrônica e em alguns casos uma utilização desatenta ou irresponsável à luz dos fatores inerentes à condição humana de errar ou serem imprudentes no uso de ferramentas tecnológicas, a Organização Hidrográfica Internacional, em inglês, *International Hydrographic Organization*, (IHO) publicou um guia sobre como avaliar a acurácia e a confiabilidade de informações de profundidade e posição em cartas ENC, designada “S-67”.

Primeiramente, é importante considerar que as informações a respeito da acurácia das profundidades lançadas nas cartas náuticas em papel são diferentes das constantes nas cartas ENC. Nas cartas em papel, elas são basicamente providas através de “diagramas fonte”, pelos quais o usuário pode, no máximo, deduzir o grau de confiança das informações das profundidades cartografadas.

Segundo IHO (2020), nas cartas em papel, o “diagrama fonte” deve apresentar, entre outras informações, o tipo de levantamento que foi realizado, agrupado em três grupos distintos, classificados por aspectos relacionados à regularidade de atualização das informações, metodologia utilizada e principalmente pelo aspecto temporal da última atualização dos dados lançados.

Também de acordo com IHO (2020, p.5), um “Levantamento Hidrográfico (LH)”, propriamente dito, designado em inglês pelo termo “*survey*,” implica a regularidade, controle e sistematização de atualização temporal das informações, que ensejam, inclusive, a atualização das profundidades cartografadas. Este é tipo mais completo. Os dois outros tipos, designados por IHO (2020) como “*Sketch survey*” e “*Passage soundings*”, implicam que há significativo risco de perigos não detectados no leito submarino, mesmo se o levantamento batimétrico tiver sido recentemente realizado. Isto simboliza que a iniciativa temporalmente irregular e não-sistemática implica a aceitação da existência de significativo risco de não detecção de perigos.

Embora a informação de profundidade nas cartas náuticas (batimetria– em relação ao Nível de Referência) convencionalmente publicada em uma carta náutica impressa possa sugerir certa homogeneidade na acurácia espacial das informações disponíveis, ela não possibilita que o usuário-navegante tenha rigoroso detalhamento das informações. Isso ocorre por conta das limitações impostas pelo espaço disponível no papel.

Já nas cartas ENC, o registro de metadados relacionados à acurácia da informação de profundidade é registrado em termos um atributo designado pela IHO como “CATZOC”, que possui uma limitação: não há um registro automatizado quanto à data de realização do levantamento. Portanto esse dado pode não estar disponível.

CATZOC é um atributo de um objeto do formato “S-57” designado “M-QUAL” (*Quality of Data*), cuja categorização inclui seis diferentes níveis de acurácia: do “A1” – o mais alto, até “U” – o mais baixo (representando que qualidade do dado ainda não foi categorizada).

Os possíveis impactos relacionados às incertezas sobre a acurácia da posição e sobre a qualidade dos auxílios à navegação estabelecidos são ainda mais significativos quando envolvem profundidades médias imediatamente externas ao CN pequenas, indicando assim um grau risco ainda maior à navegação em águas restritas pela profundidade.

Tocar o casco do navio no fundo do CN representa indisponibilidade de coluna de água minimamente suficiente à navegação e, portanto, insegura, o que dificulta e até mesmo impossibilita o necessário controle da embarcação. (USACE, 2008, p. V-2-6).

Em CN encravados em solos mais consistentes, tais como argila dura ou arenitos, por exemplo, o gradiente do talude tende a ter maior atividade natural apresentando maior resistência à penetração e maior risco ao “toque no fundo”. A ocorrência deste tipo de incidente em solos mais rígidos, como pedra, representa maiores possibilidades de rasgar ou gerar sensíveis danos materiais ao casco, em caso de colisão com as margens ou o próprio fundo (RODRIGUES, 2019).

A “S-57: *IHO Transfer Standard for Digital Hydrographic Data*” cita que quaisquer obstruções subaquáticas tais como rochas e recifes são consideradas perigos à navegação tão relevantes quanto naufrágios. Fundos rochosos estão sujeitos à deposição de sedimentos mais finos e, assim, podem representar não só a indisponibilidade de toda a coluna de água esperada em um CN como também camuflar o real perigo existente logo abaixo de determinada camada de areia ou lama.

Além dos aspectos associados à acurácia batimétrica, a norma ABNT NBR 13246:1995 (cancelada em 2017) indicava que a necessidade indicativa de “sobredragagem” em relação à cota nominal da profundidade do canal fosse cumulativamente quantificada à luz dos seguintes fatores:

- (a) O assoreamento entre duas dragagens sucessivas;
- (b) A tolerância da dragagem.

(a) Sobredragagem do canal

Também designada manutenção preventiva, consiste em dragar o canal a uma cota batimétrica adicional à profundidade nominal do CN, considerando o acúmulo e armazenamento de sedimentos observável em determinados trechos mais específicos. Sua quantificação deve ser suficiente até que a realização de uma nova obra de dragagem de manutenção seja realizada, considerando a frequência em que é possível fazê-la.

Segundo USACE (2008), a sobredragagem deve ser dimensionada com base na análise custo-benefício dos incrementos de profundidade adicional à “PP selecionada” em relação ao custo total de manutenção prevista durante a vida útil do CN, cuja informação pode ser estimada com base na realização de estudos relacionados à quantificação da taxa de sedimentação.

Segundo USACE (2008, p. V-5-34), incrementos de 0,6 a 0,9 metros são normais para realização de sobre dragagens. PIANC (2014, p.34) designa este fator como sendo a margem

para sedimentação entre dragagens. Embora a designação seja diferente, o objetivo é o mesmo: aumentar o tempo em que uma profundidade mínima pode ser regularmente mantida, entre duas dragagens sucessivas.

(b) A tolerância de execução de dragagem

Segundo USACE (2008), a tolerância de execução de obra de dragagem também é considerada um fator adicional à profundidade nominal do CN e é inerente às incertezas mecânicas da obra de dragagem, tais como correntes adversas, flutuações do nível da água e heterogeneidade do material do fundo. Um valor tipicamente aceitável varia entre 0,3 e 0,9 metros.

De acordo com PIANC (2014, p.61), a margem típica atribuída a este fator varia de 0,2 a 0,5 metros, dependendo do fundo e do tipo de draga, recomendando a adição de uma margem de 0,1 metros para computar “incertezas batimétricas da cota do fundo”. Numericamente USACE (2008) e PIANC (2014) quantificam valores semelhantes ao fator “tolerância da execução de dragagem”.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

As diretrizes e as boas práticas internacionais são as principais fontes de conhecimento e referência para a realização deste trabalho. Dentre os manuais e trabalhos utilizados como referência, destaca-se o Manual de Engenharia do Corpo de Engenheiros do Exército dos Estados Unidos “EM 1110-2-1613” (USACE, 2006), que trata sobre Projetos de Navegação de Navios de grandes calados, cujo título é “*Hydraulic Design of Deep-Draft ships Navigation Projects*”.

O capítulo 5, parte V, intitulada “*Coastal Project Planning and Design*”, do Manual de Engenharia Costeira “EM 1110-2-1100” (USACE, 2008), trata especificamente sobre Projetos de Navegação e aplica-se ao PCN que serve ao trânsito de navios comerciais, com profundidades superiores a 4,6 metros.

Outra importante referência bibliográfica utilizada neste trabalho é o relatório nº 121/2014 da PIANC, “*Harbour approach channels design guidelines*”, cuja elaboração teve a participação da Associação Internacional de Portos e Marinas (IAPH), da Associação Internacional Marítima de Praticagem (IMPA) e da Associação Internacional de Autoridades de Faróis (IALA). PIANC (2014) descreve diversas formulações e metodologias de cálculo internacionalmente utilizadas no dimensionamento de PCN.

Comparando-a com a norma ABNT NBR 13246:1995 “Planejamento portuário - Aspectos náuticos – Procedimento”, publicada em 28 de fevereiro de 1995, muitas mudanças foram observadas. A norma ABNT NBR 13246:1995 foi automaticamente cancelada pela publicação de uma revisão: a norma ABNT NBR 13246:2017, que a substituiu com o intuito de acompanhar as novas diretrizes da PIANC (2014), mas que acabou também sendo posteriormente cancelada.

Segundo o site⁵ oficial da coleção de normas brasileiras, a ABNT NBR 13246:1995 teria fixado os estudos exigidos e os critérios que devem ser observados para a concepção e o dimensionamento geométrico do acesso e demais instalações para embarcações no que diziam respeito aos aspectos náuticos de um planejamento portuário. Já a norma ABNT NBR 13246:2017, que a substituiu, os estabelecia, dividindo-os em projetos conceituais e projetos detalhados de dimensionamento geométrico de canal de acesso, bacia de evolução, fundeadouros e demais instalações para navios, no que diz respeito aos aspectos náuticos para um planejamento portuário.

⁵ Disponível em <http://www.abntcolecao.com.br>. Acesso em 10 de fevereiro de 2022.

Uma das principais referências mundialmente reconhecidas e citada em PIANC (2014) é a Metodologia Espanhola (ROM, 2009), que consiste na utilização do Método dos Coeficientes e seus fatores de segurança. Na verdade, cada metodologia apresenta seus próprios critérios em relação à utilização de fatores de segurança. Uma outra metodologia mundialmente utilizada é a Metodologia Japonesa.

A Metodologia Japonesa (MLIT, 2007) foi desenvolvida pelo Comitê Institucional japonês de Padronização da Navegação e o Departamento de Gerenciamento do Instituto Nacional da Terra e Infraestrutura de Gerenciamento de Portos e Marinas japonês, e encontra-se compilada na publicação “*Technical Standards and Commentaries for port and harbour facilities*”⁶, apresentando dois diferentes métodos de tipos de verificação: Classe I e Classe II.

A “Classe I” é indicada para projetos em que nem o Navio de Projeto (NP) nem as condições ambientais são indicadas no projeto, sendo definida com base na utilização de um fator multiplicativo ao calado máximo estático (T) pré-estabelecido e muito similar ao Método dos Coeficientes citado em ROM (2007). Nos demais casos a verificação “Classe II” é aplicável.

Segundo MLIT (2007), no método de verificação “Classe II”, os parâmetros de entrada são: o NP selecionado e certas condições ambientais de navegação definidas em projeto.

Canal de Navegação: definições e a profundidade navegável

Segundo a NORMAM-17/DHN Rev.5, o Canal de Navegação (CN) é passagem marítima desimpedida, entre obstáculos ou restrições à navegação. No caso de a passagem conduzir a um porto ou terminal, denominar-se-á canal de acesso.

USACE (2006) define “*fairway*”, como:

“Caminho navegável em uma via marítima aberta ou desobstruída (...) geralmente orientando o acesso a um porto desde o mar aberto. Inclui a água útil para a navegação externa a um canal sinalizado, ordinariamente utilizado para o tráfego de embarcações, e assim designado por autoridade competente.” (USACE, 2006, p. *Glossary*-13).

Segundo USACE (2006), “*navigation channel*” é definido como:

“A mais profunda parte navegável de uma via marítima, geralmente demarcada e designada apropriadamente nas cartas de navegação, com larguras e profundidades conhecidas. É uma parte da via navegável utilizada como “*fairway*” para a passagem do transporte marítimo. Pode ser totalmente ou em parte formado por escavações ou dragagens.” (USACE, 2006, p. *Glossary*-8)

Também de acordo com a USACE, o termo “*fairway*” distingue-se do termo “*navigation channel*”, pelo fato de que o primeiro exige uma autorização formal do Congresso Americano

⁶ Disponível na página da OCDI (*The Overseas Coastal Area Development Institute of Japan*) <<http://ocdi.or.jp/en/technical-st-en>>. Acesso em 10 de janeiro de 2018.

e é basicamente definido mediante a aprovação de uma determinada profundidade no PCN: “*Design Depth*” (DD) ou “Profundidade de Projeto” (PP).

Até ser autorizada, a “Profundidade de Projeto” selecionada é designada como “*Nominal Depth*” ou “Profundidade Nominal”. Tal nomenclatura também era definida na norma ABNT NBR 12346:1995. Segundo USACE (2006), depois de verificada e autorizada, esta profundidade passava a ser designada como “*Authorized Depth*” ou “Profundidade Autorizada”.

PIANC (1985, p. 20) expressa que “sob uma abordagem determinística, a Profundidade Nominal do CN é a base de referência para o limite inferior do ‘requisito de *UKC*’”. Este é o mesmo entendimento presente na norma ABNT NBR 12346:1995. Ambas apresentam clara distinção da “Profundidade de Projeto” (ou Profundidade Nominal) e a “Profundidade de Dragagem” do CN

Já PIANC (2014) tem uma designação diferente. Ela designa a profundidade relativa a um determinado CN registrada nos documentos náuticos oficiais como “Profundidade Nominal”. Não há muitas menções específicas ao termo “Profundidade de Projeto”, apenas ao termo “Nível Nominal” do CN.

Ressalta-se que o “*fairway*” americano não está limitado apenas à parte mais profunda do CN (em inglês “*channel*”), mas por toda área transversal submersa a este, delimitada pela cota vertical relativa à “Profundidade de Projeto”. A profundidade do “*fairway*”, é definida pela Largura de Projeto e pela Profundidade Nominal (ou Autorizada), que deve ser minimamente mantida, em determinado trecho ou segmento.

Segundo PIANC (2014, p.23), a profundidade pode ser representada por três distintos agrupamentos de fatores contribuintes: (a) fatores relacionados ao nível da água; (b) fatores relacionados ao navio; e (c) relacionados ao fundo. O “requisito de *UKC*” basicamente comporta “Fatores relacionados ao navio” (Fs). Alguns desses fatores, tais como “efeito *squat*” e “movimento vertical induzido por ondas” terão maior destaque. Tais fatores serão mais profundamente apresentados nesta dissertação.

O termo “Folga Abaixo da Quilha Líquida” (FAQ líquida) é a melhor tradução em português para o termo “*Net UKC*”, que com frequência é confundida pela sigla “*UKC*” também comumente expressa como “*Gross Underkeel Clearance*” ou simplesmente “*Gross UKC*”. No Brasil, é comum fazer-se confusão entre o termo em inglês “*Net UKC*” e o termo em português “Folga Bruta Abaixo da Quilha (FAQ)”.

Seguindo uma regra estática determinística, PIANC (1985, p. 4) definiu o fator “*Net UKC*” como: “a mínima margem restante entre a cota vertical da Profundidade de Projeto e a

quilha do navio em sua posição mais desfavorável sob as condições de projeto.”. A definição apresentada por PIANC (2014) refere-se a um fator cujo valor é residual dinâmico, de caráter operacional.

O fator “*Net UKC*” tal como tratado pela PIANC (2014) contribui para dar maior ênfase à abordagem probabilística para a composição e quantificação da profundidade (h), em relação às disposições contidas em PIANC (1985), que atribuíam maior ênfase e segurança à utilização de abordagem determinística, a qual deve estar atrelada à aplicação de um auxílio à navegação.

USACE (2006) e USACE (2008) sugerem que seja atribuído à “Margem de Segurança” um valor minimamente superior à menor distância em relação ao fundo, ou seja, o dobro do valor associado à sobredragagem. Sob quaisquer situações, ROM (2007) estabelece que a menor coluna de água admissível deve ser igual a 0,5 metros.

Segundo MCCARTENEY *et al.* (2005), uma margem de segurança de pelo menos 0,61m (61cm) deve ser atribuída para evitar danos ao motor do navio provenientes de pedaços de madeira e detritos afundados, redução do deslocamento de material do fundo e a obstrução de bombas e condensadores por esses materiais. Em fundo duro, formado por rochas, areia consolidada ou argila, MCCARTENEY *et al.* (2005) sugere que esta margem seja aumentada para pelo menos 0,92 m (92 cm).

No Brasil é comum associar-se o termo “FAQ” a um valor estático, quando é notório que seu caráter é dinâmico e variável. Dessa forma, a equivocada utilização das siglas “*UKC*” ou “FAQ” pode gerar dúvidas de interpretação e induzir equivocadas percepções relacionadas à aplicação de margens e fatores de segurança. Será mantida, portanto, a utilização dos termos originais em inglês.

A Figura 4 abaixo apresenta graficamente os três principais grupos de fatores em que PIANC (2014) agrupa a composição de fatores componentes da profundidade navegável. A figura foi adaptada para apresentar o conceito de “profundidade de projeto (PP)” no contexto da publicação PIANC (2014).

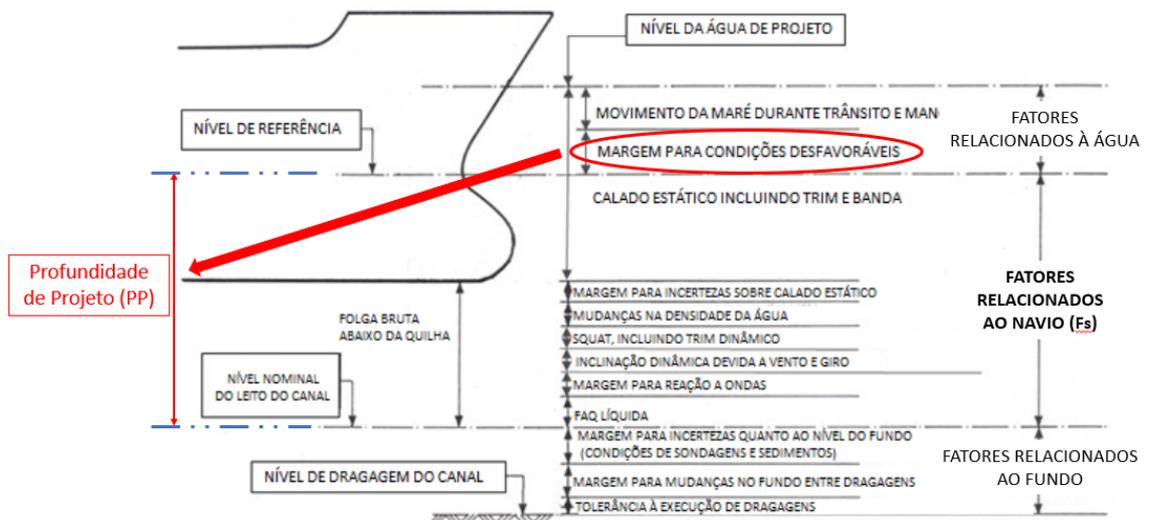


Figura 4: Fatores relacionados ao nível de água de projeto. Fonte: adaptada de PIANC (2014, p. 23).

Dentre os fatores constituintes do agrupamento “fatores relacionados à água” são citados: (a) nível de referência ou *datum* vertical; (b) nível de água selecionado; (c) efeitos da maré astronômica e meteorológica no nível da água.

Segundo PIANC (2014, p.34), os fatores relacionados ao fundo fazem parte da composição da diferença entre a cota vertical da Profundidade Nominal do CN, em determinado trecho e o fundo propriamente dito. A cota vertical associada à sobredragagem é associada ao nível de dragagem do canal (*channel dredge level*) e representa a cota vertical na qual determinado trecho do CN foi efetivamente dragado.

Para PIANC (2014) compõem os fatores relacionados ao fundo: (a) margem para sedimentação entre dragagens; (b) tolerância de execução de dragagem; e (c) margem para incertezas da batimetria. Embora a Profundidade de Projeto não considere fatores relacionados ao fundo, demonstrar-se-á no desenvolvimento deste trabalho a importância de fazer referência a tais considerações, também relacionadas à sua ordem de grandeza.

A fração do tempo total em que o trânsito de determinado navio no CN não é possível determina o “*downtime* vertical”. “Para alguns *hup ports*, a acessibilidade operacional a níveis de água bem baixos é de importância econômica primária.” (PIANC, 2014, p. 24). Decisões relacionadas à aceitabilidade das janelas de maré deveriam se basear na segurança e, somente secundariamente, em considerações econômicas.

O tamanho das “janelas de maré” é função da disponibilidade do tempo em que a vantagem oferecida por determinado nível adicional da maré astronômica em relação à profundidade cartografada está efetivamente disponível para a operação e trânsito do navio. Se o nível adicional da maré fosse sempre adicionado à Profundidade de Projeto, esta deveria

fundamentar-se na análise na probabilidade de ocorrência de determinados níveis de água, custos e benefícios do projeto (USACE, 2008, p. V-5-20), o que não é abordado tecnicamente em Projetos de Sinalização Náutica. Isto seria bastante útil em um estudo relacionado à acessibilidade portuária e convergente em relação a aspectos de gerenciamento do *UKC*, que não serão abordados na metodologia proposta.

A adição do efeito resultante da maré à profundidade cartografada poderia então resultar em diferentes valores representativos para mesma profundidade de interesse, sob o aspecto da segurança da navegação.

Segundo USACE (2008), a profundidade navegável seria a composição de uma Profundidade de Projeto adicionado a determinado nível resultante da maré. A Profundidade de Projeto é uma seleção e por esta razão será também designada nesta dissertação como “PP selecionada”, devido à necessidade de claramente diferenciá-la em relação à “PP calculada”.

$$(2) \quad \text{Profundidade (h)} = \text{Profundidade cartografada} + \text{efeito da maré } (\xi)$$

“PP calculada” é uma profundidade mínima, parametrizada à luz dos fatores selecionados em USACE (2006), e que associa determinadas características geométricas do NP a certas condições ambientais e que permitiram quantificar o “requisito de *UKC*”, que será oportunamente apresentado. Se considerarmos que determinada profundidade mínima é mantida permanentemente no CN, então pode-se afirmar que:

$$(3) \quad \text{“Profundidade de Projeto”} = \text{Profundidade Nominal}$$

De modo geral, a componente astronômica da maré sempre representa um aumento da coluna de água, ou seja, uma adição de determinado nível à profundidade cartografada. Já a componente não astronômica da maré pode representar tanto o aumento como a diminuição da coluna de água esperada, o que representaria uma diminuição da profundidade (h), com impactos na segurança da navegação.

A composição dos níveis de maré astronômica e não astronômica pode anular ou reduzir a expectativa de utilização de vantagem de um determinado nível adicional de maré astronômica, em relação a uma determinada profundidade cartografa em documento náutico oficial.

Em uma coluna de água em que o nível associado à componente astronômica da maré é relativamente baixo tal como ocorre em estuários dominados por micro marés. Nenhuma significativa adição à profundidade cartografada pode, portanto, ser eventualmente observada

e acabar frustrando a expectativa comercial do uso da vantagem da maré, representando assim a assunção de riscos à navegação, que não podem ser ignorados.

No Brasil, as profundidades cartografadas são cotas verticais (z) referenciadas ao Nível de Referência (NR) da carta náutica oficial da DHN, cujo valor é aproximadamente igual ao nível médio das baixa-mares de sizígia registrado continuamente por uma régua de maré, que sob o aspecto da segurança da navegação é extremamente útil.

Em termos conceituais, as diferenças na definição da profundidade (h) giram ao redor do aspecto da composição dos fatores selecionados e a sua combinação. Tal aspecto reflete a necessidade de, objetivamente, parametrizá-la, considerando fatores de maior relevância e contribuição. Segundo PIANC (2017) existem duas formas conhecidas de abordar a parametrização da profundidade (h): através da utilização de regras estáticas ou através de regras dinâmicas.

USACE (2006, p. 6-9), cita por exemplo, o seguinte: “a resposta do navio à ação das ondas deve ser obrigatoriamente considerada no projeto da profundidade e da largura do canal de navegação. O movimento do navio abaixo da superfície da água causado pelas ondas irá afetar a profundidade de projeto do canal.”.

PIANC (2017) é bastante crítica sobre a utilização de regras estáticas, pois, embora admita a possibilidade de fazer a estimativa de alguns fatores, estas não permitiriam calcular a previsão de resposta a ondas em tempo real, devido à indisponibilidade de dados ambientais e da capacidade de processá-los, também em tempo real. No entanto, o aspecto da utilização da regra dinâmica está totalmente associado ao aspecto operacional da acessibilidade marítima, mais especificamente relacionado ao gerenciamento do *UKC*, que em última instância sempre é uma responsabilidade do Comandante da embarcação ou navio.

O Código Internacional de Gerenciamento da Segurança (*ISM Code*) indica que a pessoa ou empresa proprietária do navio, ou aquela que tenha assumido responsabilidade pela sua operação (reconhecida no meio marítimo pela designação “*charterer*” ou fretador), também deve prover ao comandante da embarcação, por escrito, orientações relacionadas ao gerenciamento do *UKC*, as quais devem ser discutidas inclusive entre o comandante e o prático embarcado. Este último deve concordar com o plano de viagem.

Sob o aspecto operacional, PARKER e HUFF (1998, p.148), destacam o seguinte: “a determinação do *UKC* tornou-se um fator crítico na navegação, pois modernos navios tornaram-se tão grandes a ponto de não poderem operar em determinados portos, mesmo em curtas janelas de acessibilidade e níveis mínimos de maré.”.

A falta de acurácia na determinação do *UKC* pode ter sérios impactos na segurança e economia e, desta forma, muitos portos estabeleceram suas próprias diretrizes de margens de segurança, que refletem seu julgamento e capacidade de determiná-la em seus canais de acesso navegáveis”.

Regras estáticas são classicamente utilizadas para a fazer a seleção da Profundidade de Projeto e são derivadas a partir dos piores cenários admissíveis para a quantificação desses fatores. Nesta abordagem, segundo PIANC (2014, p.33), o fator “*Net UKC*” “é o que resta como margem de segurança ao navio após terem sido computados todos os demais fatores relacionados ao navio, em relação à profundidade.”

Segundo PIANC (2017, p.48), “os registros históricos da OMC Internacional indicam que há evidências que, em 95% das ocasiões, os trânsitos realizados sob regras estáticas são conservadores.”. Os princípios de estabelecimento de um sinal náutico estão inseridos na definição de um auxílio à navegação marítima (*Marine Aids to Navigation – AtoN*):

“Um dispositivo, sistema ou serviço, externo aos navios, desenvolvido e operado para aumentar a segurança e eficiência da navegação individual dos navios e/ou do tráfego de embarcações.” (IALA, 2018).

De acordo com a Regra 13, do capítulo V da Convenção SOLAS, cada governo signatário deve agir de modo a prover o quanto for necessário e prático, de forma individual ou em cooperação com outros governos signatários, tais auxílios à navegação justificados pelo volume de tráfego e pelo grau de risco requerido.

No escopo de um Projeto de Sinalização Náutica, a Profundidade de Projeto é a profundidade a ser efetivamente defendida pelo estabelecimento de um par de sinais laterais, que definem os limites laterais de um CN. O estabelecimento destes sinais exige a utilização de uma regra estática para materializar a profundidade mínima a ser defendida, a qual é completamente distinta da profundidade de lançamento para efeito de cálculo da linha de fundeio.

Considerando que a cota vertical (*z*) que apresenta a informação de profundidade na carta náutica é referenciada ao próprio Nível de Referência (NR) da carta náutica, então conclui-se que tal profundidade é a própria Profundidade de Projeto.

O efeito de águas rasa é considerado aquele de maior impacto na navegação dos navios. Uma das formas de caracterizá-lo é através da razão entre profundidade (*h*) e o calado máximo estático (*T*) do NP. Quanto menor a razão “*h/T*” maior será o efeito de águas rasas, ou seja, menor será a segurança do trânsito.

Segundo USACE (2008, V-5-24), a Profundidade de Projeto pode ser compreendida como “incrementos de profundidade para cada um dos fatores que afetam os requisitos estabelecidos para o “*UKC*”, adicionais ao calado do navio de projeto.”.

A verificação quanto à segurança intrínseca desta seleção pode ser quantificada através da parametrização da profundidade em função do calado estático máximo (T) do NP somado a determinado “requisito de *UKC*”, à luz da consideração dos efeitos de águas rasas.

3.1. “Critérios de Projeto” e o “requisito de *UKC*”

O estabelecimento de um “requisito de *UKC*” sob uma abordagem determinística da composição desses fatores é mais adequada à análise de Projetos de Sinalização Náutica devido à necessidade prioritária no zelo pelo aspecto da segurança, na análise quanto ao estabelecimento de sinais náuticos. A utilização de uma regra estática e de uma abordagem determinística parece ser suficiente para este fim.

O “requisito de *UKC*” é uma estimativa do “*UKC* minimamente necessário” e advém das disposições constantes em USACE (2006, p. 6-15), onde o termo “*UKC*” é definido como: “a menor margem remanescente entre a quilha do navio e a Profundidade Nominal, quando o navio está movendo-se a uma velocidade planejada e sob a influência das condições de vento e ondas no projeto.”.

Segundo PIANC (2017, p. 47), “a grande maioria de autoridades regulatórias no mundo utiliza regras estáticas para determinar o requisito de *UKC*...”, simplesmente pelo fato de serem estatisticamente mais seguras.

De acordo com PIANC (1985, p. 12), sob uma abordagem determinística, o evidente critério de segurança aplicável é a mínima folga abaixo da quilha, o que foi designado nesta dissertação como “requisito de *UKC*”. Pressupõem-se que as incertezas, imprecisões, erros e variações já estão todos incorporadas nos fatores identificados, que determinam sua quantificação.

Também segundo PIANC (1985, p. 14), informações sobre a “sobredragagem” podem representar o mesmo potencial benefício relacionado ao nível da coluna de água presente (atual) e o esperado para a previsão da composição das “janelas de maré”. A confiabilidade dessas informações está diretamente associada à frequência e regularidade com que são realizados levantamentos batimétricos nos Canais de Navegação, com a mínima qualidade e acurácia requerida.

O “requisito de *UKC*” pode ser então uma aproximação quantitativa dos fatores para aspectos normativos e regulatórios, tais como nos envolvidos em Projetos de Sinalização

Náutica, pois a aplicação de regras estáticas para o seu objetivo estabelecimento são suficientes, o que é totalmente diferente da questão relacionada à acessibilidade operacional.

PIANC (1985, p. 18) apresenta a descrição individual de fatores, que combinados determinam o “requisito de *UKC*” sob a abordagem determinística. Entre eles, pode-se citar: (a) folga líquida abaixo da quilha; (b) resposta às ondas; (c) *squat* e adernamento dinâmico (“efeito *squat*”); e (d) variações da densidade da água.

Segundo PIANC (1985), sob a abordagem determinística, soma-se ao “requisito de *UKC*” o calado estático máximo (T), considerando as incertezas das medidas e/ou cálculos deste calado, além das incertezas relacionadas ao fator “nível de água” em forma de “margem”, tais como marés negativas, incertezas quanto ao nível astronômico (se houver).

Para prever o movimento dos navios durante o trânsito, informações sobre a direção da onda, altura e período são necessárias. Basicamente dois parâmetros medidos são mais relevantes em um espectro de onda: a altura significativa (H_s) e o período significativo (T_p) do *swell*, que são difíceis de prever.

Esta parametrização do valor da profundidade foi designada nesta dissertação como “PP calculada”. Seu cômputo implica o aprofundamento das estimativas de dois fatores de grande contribuição para o “requisito de *UKC*”: (i) a estimativa do máximo “efeito *squat*” “ $S(m)$ ” e (ii) o movimento vertical induzido por ondas “ $Z(m)$ ”, tal como já era previsto em ABNT (1995) e demonstrado na Figura 5:

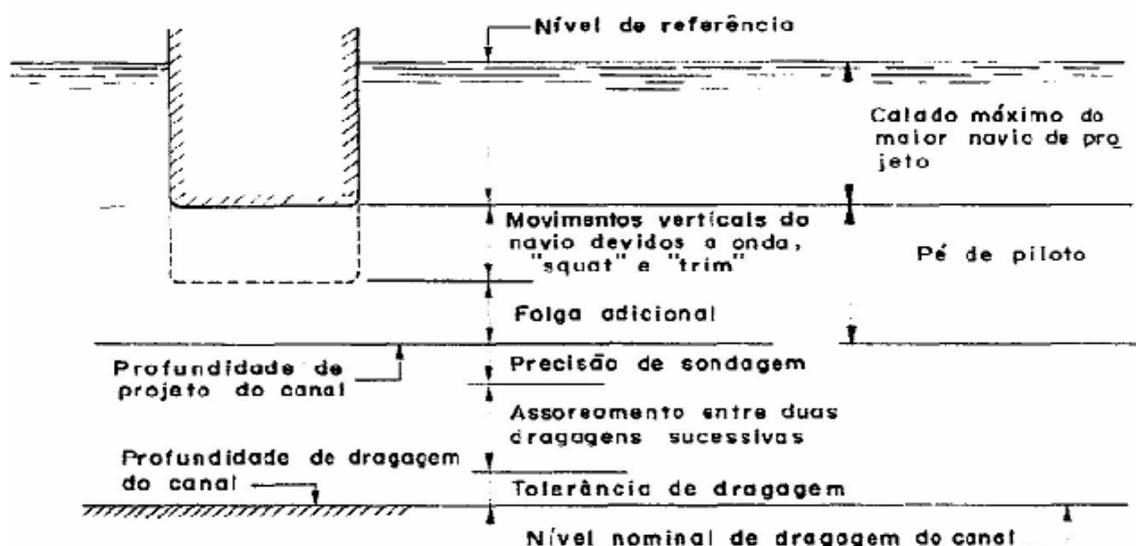


Figura 5: Folgas e margens selecionadas para verificar a profundidade mínima, de acordo norma ABNT NBR 13246:1995. Fonte: extraída de ABNT (1995, p.4).

Segundo USACE (2006, p. 6-9), a resposta do movimento do navio às ondas é um fator que deveria ser sempre considerado no cálculo da Profundidade de Projeto, devido ao seu

potencial de impacto na definição da profundidade navegável nos primeiros trechos ou segmentos do CN, por estarem mais diretamente expostos à ação das ondas de origem oceânica (remota), mais especialmente ao *swell*. Neste caso, o movimento vertical induzido tende a ser tão grande quanto à própria altura da onda incidente.

3.2. Estimativa para o máximo “efeito *squat*” “S(m)”

O “efeito *squat*” é causado pelo movimento do navio, ou seja, é um efeito hidrodinâmico que induz o rebaixamento do nível médio de água. Esse efeito é maior quanto maior a velocidade da água (escoamento) que passa pelo navio. O *trim* dinâmico é o efeito da combinação entre “afundamento” e “*trim*”. Tal rebaixamento é acompanhado por um movimento angular longitudinal do navio denominado “*pitch*”, resultante da atuação de uma força vertical para baixo, sobre o casco, provocando um movimento vertical do seu centro de massa, denominado “*heave*”, paralelo ao plano longitudinal do navio.

A depressão do nível médio da água também conhecida como *sinkage* (ou afundamento) geralmente é acompanhada por um *trim* induzido ao navio. Por esta razão, segundo ROM (2007), o *trim* dinâmico, ou *squat*, deve ser adicionado ao calado máximo (T) do navio, uma vez que produz uma alteração na distribuição de pressões hidrodinâmicas no entorno do casco.

Segundo PIANC (2014, p.210), o “efeito *squat*” é tanto maior quanto maior o grau de restrição de um canal, e o efeito de margem é considerado insignificante a distâncias superiores a 3 vezes a largura do navio (B). Em canais do tipo “restrito (R)” esse efeito se dá nas seguintes condições: (i) com a redução do *UKC*, ou seja, com a redução da profundidade; (ii) com a diminuição da distância entre a linha de centro do navio e os bancos laterais submersos; e (iii) quanto maior é a Largura da Boca (B) do navio.

Em águas mais rasas e em seções transversais submersas mais restritas, se observa uma amplificação da corrente de retorno, que produz um “efeito *squat*” de magnitude superior ao observado em mar aberto (maiores profundidades). Tal efeito não depende tão somente do quadrado da velocidade, mas também das características no navio e da seção transversal submersa do CN.

Quanto mais próxima é a navegação aos taludes do CN mais significativa é a resistência hidrodinâmica, pois grande parte da água precisa escoar em torno do navio através de espaços bastante confinados abaixo da quilha e entre o casco do navio e os taludes laterais do canal (USACE, 2008, p. V-5-15).

DE KONING GANS; BOONSTRA (2007) *apud* PIANC (2014) empregaram ou modelos numéricos para averiguação do máximo “efeito *squat*”, considerando diferentes

posicionamentos de um navio porta-contentores da classe “Post-Panamax” em relação à linha de centro do CN e diferentes derivas. A Figura 6 indica as características do navio e do CN que foram considerados no estudo citado:

Navio conteneiro Post-Panamax	
Lpp (m) =	302
B (m) =	42.9
Calado (T) =	14
CB =	0.65
Canal de navegação	
Largura (W) (m) =	300
Profundidade (h) (m) =	16
h/T =	1.14
UKC (m) =	2

Figura 6: Parâmetros utilizados nos testes realizados por DE KONING GANS; BOONSTRA (2007). Fonte: DE KONING GANS; BOONSTRA (2007) *apud* PIANC (2014).

DE KONING GANS; BOONSTRA (2007) demonstraram que mesmo pouco afastado da linha de centro do CN, a cerca de 20m e com ângulo de deriva inferior a 15°, o máximo “efeito *squat*” observado foi o quadrado daquele estimado inicialmente, quando o navio navegava no cento e alinhado ao CN.

Na prática, uma estimativa inicial desse fator que era de 0,9 metros e considerava a navegação sobre a linha de centro do CN), na verdade representou uma variação de 1,71 metros, sob as condições acima identificadas, representando uma grande subestimação em relação à estimativa inicial, que é feita se assumindo que o navio navega sempre sob a linha central do CN, conforme descrito em PIANC (2014, p.209). Outra condição essencial para atribuir melhor qualidade das formulações matemáticas citadas em PIANC (2014) é que a condição inicial de *trim* do navio seja nula.

Cada formulação matemática foi empiricamente desenvolvida à luz e limitação de determinados parâmetros-limite de emprego, que obrigatoriamente precisam ser observados para que a razoabilidade estimativa de cada formulação seja válida e seu resultado possa ser confiável.

Analisando todas as formulações matemáticas descritas em PIANC (2014), dentre as principais condições que podem influenciar a estimativa de cálculo para o máximo “efeito *squat*” destacam-se:

- I. A profundidade (h) utilizada neste cálculo: quanto menor, ou seja, quanto mais raso, maior o efeito;

- II. As principais dimensões características no Navio de Projeto: quanto maior o Coeficiente de Bloco (CB), maior o grau de bloqueio de uma determinada seção transversal submersa ao trecho ou segmento do Canal de Navegação;
- III. A velocidade máxima de trânsito permitida ao navio (v): quanto maior, maior o efeito;
- IV. Geometria idealizada da seção transversal submersa do Canal de Navegação: quanto mais restrita e confinada, maior este efeito;
- V. A relação e/ou combinação entre dois ou mais fatores acima relacionados e seus parâmetros associados;
- VI. A combinação entre todos os fatores acima relacionados e a escolha da formulação matemática e sua complexidade, utilizada para realizar esta estimativa.

A profundidade (h)

Segundo PIANC (2014, p. 28), para razões entre profundidade (h) e calado estático máximo “h/T” superiores a 1,5, a magnitude do efeito *squat* poderia ser negligenciada, desde que houvesse uma suficiente coluna de água passando por debaixo da quilha do navio. Teoricamente, nesta situação, o navio deixaria de “sentir” o fundo.

Segundo PIANC (2014), estudos experimentais revelaram um aumento médio do efeito *squat* entre 16 e 47% para razões “h/T” no intervalo [1.1 a 1.2], para navios com Coeficientes de Bloco (CB) entre 0,7 e 0,85.

Dimensões características do NP e seu Coeficiente de Bloco (CB)

O calado estático máximo (T) e a Largura da Boca (B) do Navio de Projeto são as principais dimensões que impactam no cálculo da área da seção transversal submersa do navio “As”. De acordo com USACE (2006), o valor da área pode ser calculado da seguinte forma:

$$(4) \quad A_S = 0,98 * B * T$$

Na formulação matemática acima, “B” é o valor da Largura da Boca medida na seção a meio navio e “T” é seu calado estático máximo. O valor “0,98” é um fator de ajuste correlacionado às obras vivas do casco do navio (formato da parte submersa do casco).

Segundo a teoria formulada por Dr. Barrass (PIANC, 2014), um navio com Coeficiente de Bloco inferior a 0,7, ou seja, um navio porta-contentores típico, faria *squat* pela popa, enquanto um navio com CB superior a 0,7 (tipicamente navios-graneleiros e navios-tanques) faria *squat* pela proa.

Segundo PIANC (2014), a proposição feita por Dr. Barrass, embora não tenha acurácia para todos os tipos de navio, é razoavelmente empregada, pois exige poucos recursos e revela que o “efeito *squat*” tanto pode ser observado pela proa como pela popa de determinado navio, principalmente em função do seu Coeficiente de Bloco (CB).

PIANC (2014) cita que estudos de pesquisadores alemães demonstraram que, em velocidades superiores a 11 nós, o navio começa a produzir um grande efeito *squat*, acompanhado por *trim*, diretamente condicionado à condição inicial de *trim* (pela proa ou pela popa).

A velocidade máxima permitida ao trânsito do navio

O emprego de velocidades mais altas é uma forma eficaz de minimizar o efeito de deriva produzida, por exemplo, por fortes ventos. Em geral, a magnitude das velocidades relativas é modulada pela velocidade do navio, principalmente quando as correntes locais não são de grande magnitude.

A construção de navios de grande porte vem priorizando arranjos de máquinas focados na eficiência da navegação oceânica e não costeira, sobre a qual são empreendidas altas velocidades em longos períodos, e assim minimizar os custos relacionados ao transporte marítimo em rotas internacionais transoceânicas.

A alta potência de máquinas e propulsores instalada nesses navios, aliada às suas características de distribuição de cargas no convés, impõe certas dificuldades para que esses navios possam navegar a baixas velocidades, por meios próprios.

Ao longo dos últimos anos, muitos estudos vêm sendo realizados, ajudando a melhor compreender o efeito da velocidade do navio sobre o *squat* (PIANC, 2014; LATAIRE *et al.*, 2015; SERBAN, PANAITESCU, 2016) e seu efeito sobre a controlabilidade e manobrabilidade, principalmente em águas mais restritas. A resposta desses navios em águas rasas costuma ser mais lenta à ação de leme e aos controles da propulsão convencional, quando comparada às de mar aberto.

Segundo PIANC (2014, p.81), a aproximação de bancos submersos, mais frequentemente observada em águas restritas, provoca uma variação assimétrica natural do escoamento de água que passa pelo casco do navio, gerando forças hidrodinâmicas ao redor do casco em deslocamento. Estas podem dificultar a manutenção de posição central no CN, sob determinadas condições ambientais.

Em navegação em mar aberto, o máximo “efeito *squat*” é proporcional ao quadrado da velocidade relativa entre o navio e a água. O envelope de velocidades empregáveis ao longo da

navegação deve ser adicionado à magnitude das correntes máximas e ser conjuntamente analisado, à luz das características do navio. (PIANC, 2014)

A escolha da formulação matemática

É fato que seção transversal submersa real, obtida a partir da análise de perfis batimétricos, pode representar substancial variação ao longo de uma mesma via navegável. Desta forma, para efeito de análise de um projeto, é importante entender a importância de associá-la a uma geometria idealizada, cuja área possui valor igual a “Ac”.

Segundo PIANC (2014, p. 28), o segmento de um CN pode ser caracterizado por um ou mais tipos de seções transversais submersas idealizadas, cuja qualificação dá origem à denominação do tipo de canal. Na literatura são identificados três tipos básicos: canais do tipo “irrestrito (I)”; “restrito (R)”; e “artificial (C)”, identificados na figura na Figura 7:

- a) *Fairway*: passagem sem restrições laterais, também chamado de canal do tipo “irrestrito (I)”;
- b) *Trench*: passagem aprofundada com bancos submersos (*overbanks*) em quaisquer dos lados, também designado por “restrito (R)”;
- c) *Canal*: passagem cuja seção transversal possui área exposta de terra em ambos os lados do canal, também designado como “artificial (C)”.

Uma seção transversal submersa do tipo “*trench*” ou “restrita (R)” pode ter basicamente duas configurações: dragado ou “*open-type*”. Canais de geometria trapezoidal são mais comuns, devido à melhor representação à existência natural de taludes formados pelo material e sedimentos que formam os bancos submersos existentes em suas margens.

Segundo USACE (2006), o canal do tipo “restrito (R)” apresenta uma seção transversal submersa intermediária em termos de grau de restrição, entre a seção do tipo “artificial (C)” e o CN do tipo “irrestrito (I)”, pois, a depender da Profundidade de Projeto selecionada, os taludes podem representar uma obstrução à coluna da água e, portanto, uma limitação à Largura Efetiva do CN, no fundo.

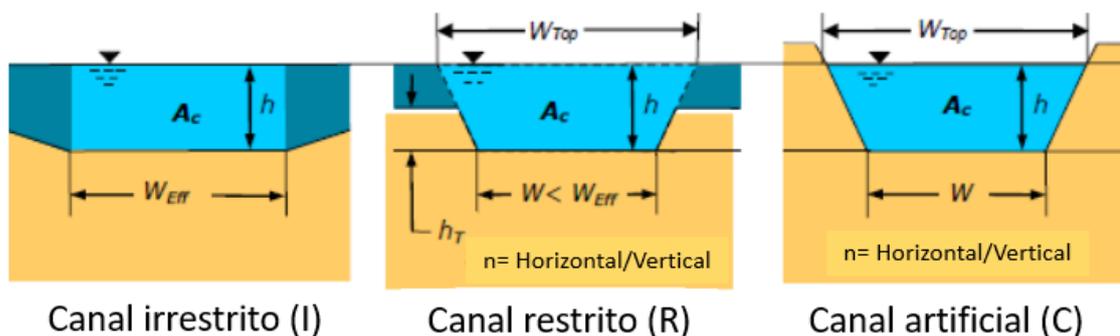


Figura 7: Tipos de seções transversas submersas, de geometria trapezoidal, idealizadas. Fonte: adaptada de PIANC (2014)

O tipo de canal foi primeiro requisito a ser analisado quanto à seleção de uma das formulações matemáticas citadas em PIANC (2014), para a realização de uma adequada estimativa para esse fator. Um segundo parâmetro classicamente encontrado nessas formulações e de muita relevância é a razão entre profundidade (h) e o calado máximo estático (T) do NP “ h/T ”.

Algumas formulações somente são aplicáveis a canais do tipo “irrestrito (I)”, por exemplo. Existem diversos outros parâmetros a serem consideradas em função das dimensões do CN, das características físicas do Navio de Projeto, ou de ambos. Tais parâmetros condicionam e restringem a possibilidade de sua aplicação, no tocante à relevância dos resultados.

A Tabela 1 consolida as principais limitações das formulações matemáticas para a estimativa do máximo “efeito *squat*”, descritas em PIANC (2014) e os parâmetros que condicionaram a sua formulação. As informações foram consolidadas a partir dos dados constantes em PIANC (2014, p.192).

Tabela 1: Formulações matemáticas indicadas em PIANC (2014). Fonte: PIANC (2014, p.191).

CÓDIGO ID	Configuração			Restrição							
	U	R	C	F_{nh}	C_B	S	B/T	h/T	h_T/h	L/B	L/T
Tuck (1966)	Y	Y	Y	F_{nh2+}							
Huuska/Guliev (1976)	Y	Y	Y	$\leq 0,7$	0,6 - 0,8		2,19 - 3,5	1,1 - 2,0	0,22 - 0,81	5,5 - 8,5	16,1 - 20,2
ICORELS (1980)	Y	(Y)		$\leq 0,7$ V_{cr}	0,6 - 0,8		2,19 - 3,5	1,1 - 2,0	0,22 - 0,81	5,5 - 8,5	16,1 - 20,2
Barras3 (2004)	Y	Y	Y	V^2	0,5 - 0,85	0,1 - 0,25		1,1 - 1,4			
Eryuzlu2 (1994)	Y	Y		F_{nh2+}	$\geq 0,8$		2,4 - 2,9	1,1 - 2,5		6,7 - 6,8	
Römisch (1989)	Y	Y	Y	V^{2+} , V_{cr}			2,6	1,19 - 2,25		8,7	22,9
Yoshimura (1986).	Y	Y	Y	V^2	0,55 - 0,8		2,5 - 5,5	$\geq 1,2$		3,7 - 6,0	

Dentre os parâmetros que relativizam o grau de restrição do CN, pode-se destacar o Fator de bloqueio (S) e a Razão de bloqueio (Br), que são relevantes parâmetros indicativos do grau de restrição do CN e estão presentes na maioria das formulações estimativas do máximo “efeito *squat*”, demonstrando sua importância para refletir os efeitos hidrodinâmicos atuantes no casco do navio, durante o trânsito (USACE, 2008, p. V-5-14).

Tais parâmetros indicam o comprometimento da seção transversal submersa idealizada do CN “Ac” em relação à seção reta transversal submersa do Navio “As” e vice-versa. Tal “bloqueio parcial” da seção transversal submersa do CB influencia o fluxo hidrodinâmico de água que passa pelo navio, matematicamente denotado pela presença de tais fatores nas formulações matemáticas, empiricamente formuladas para estimar o máximo “efeito *squat*”.

Das sete formulações matemáticas indicadas em PIANC (2014), três delas foram pré-selecionadas, por atenderem a maior parte dos requisitos à sua utilização: HUUSKA -GULIEV (1976), ICORELS (1980) e YOSHIMURA (1986).

Além destas, também foi selecionada a formulação BARRASS3 (2004) para apresentação das estimativas, pois, embora atenda apenas três requisitos, ela é uma fórmula bastante utilizada e bastante semelhante à formulação de HUUSKA-GULIEV (1976), que, apesar de ser bem mais antiga, recebeu alguns aprimoramentos produzidos por BRIGGS *et al.* (2006, 2013), tendo demonstrado ser bastante útil para melhor representar o grau de restrição de determinada seção transversal submersa do CN, como será visto mais adiante.

Razão de Bloqueio (Br) e Fator de Bloqueio (S)

Conforme descrito na literatura, existem duas formas para quantificar o grau de bloqueio de um canal em relação ao Navio de Projeto: através do **Fator de Bloqueio (S)** (em inglês: *channel blockage*) ou o inverso desta relação, a **Razão de Bloqueio (Br)**. Típicos valores do parâmetro “Br” em canais do tipo “artificiais (C)” muito restritos e estreitos variam entre 2 e 3. Em canais do tipo “*trench*” e “*open channels*”, o valor do parâmetro “Br” pode ser superior a 20 (USACE, 2006; USACE, 2008)

A razão A_s/A_c é conhecida como fator de bloqueio (S) ou *channel blockage*. O inverso dessa relação é conhecido como Razão de Bloqueio (Br) ou *channel blockage ratio*. Os parâmetros “S” e “Br” são facilmente correlacionáveis, pois o valor de um é exatamente a razão inversa do outro:

(5)

$$\text{Fator de Bloqueio (S)} = A_s/A_c$$

(6)

$$\text{Razão de Bloqueio (Br)} = A_c / A_s$$

A razão “ h_T/h ”

A razão entre a altura média das margens laterais submersas “ h_T ” e a profundidade (h) “ h_T/h ”, é um outro importante significativo parâmetro do grau de restrição da seção transversal submersa idealizada. Bem menos destacada na literatura do que a anterior, este parâmetro demonstra ser útil para analisar o grau de restrição relacionada a efeitos hidrodinâmicos relacionados à proximidade de bancos submersos e talude.

Destaca-se que, entre todas as formulações presentes em PIANC (2014), o parâmetro “ h_T/h ” somente está explicitamente presente na formulação de HUUSKA-GULIEV (1976). Dada a importância deste parâmetro contida exclusivamente neste parâmetro, a formulação de HUUSKA-GULIEV (1976) foi escolhida para quantificar a estimativa do fator máximo “efeito *squat*” e sua aplicação será detalhada no capítulo “Metodologia”.

3.2.1. Formulação de HUUSKA-GULIEV (1976)

As pesquisas de Huuska orientaram a necessidade de serem adicionados dois fatores adimensionais à sua formulação original: um para a correção do tipo de Canal (K_s), desenvolvido por GULIEV (1971) *apud* PIANC (2014), e um outro para um Fator de Bloqueio corrigido (S_1).

O Fator de bloqueio corrigido (S_1) é função da razão normalizada entre a altura dos bancos laterais ou “Altura do *overbank*” (h_T) e a profundidade local (h), variando entre [0.2;1] para canais do tipo “restrito (R)”, ou seja, quanto maior a razão “ h_T/h ”, maior é o grau de restrição do canal e, conseqüentemente, maior será o máximo “efeito *squat*”.

É importante observar que a formulação de HUUSKA-GULIEV (1976) foi produzida para estimar o máximo “efeito *squat*” ($S_{m\acute{a}x}$) na proa (*bow squat*) do navio:

(7)

$$S_{m\acute{a}x} = C_s \frac{\nabla}{L_{pp}^2} \frac{F_{nh}^2}{\sqrt{1 - F_{nh}^2}} K_s$$

Onde:

$$C_s = 2.4$$

∇ é o deslocamento de volume de água produzida pelo navio (m^3)

O fator $\frac{\nabla}{L_{pp}^2}$ é equivalente a $\frac{C_B * B * T}{L_{pp}}$, onde “Lpp” representa o valor do comprimento

do navio entre perpendiculares.

Segundo PIANC (2014), a Formulação de HUUSKA-GULIEV (1976) produz estimativas mais consistentes para números de Froude de Profundidade (F_{nh}) não superiores a 0,7.

$$(8) \quad K_s = \begin{cases} 7.45s_1 + 0.76 & s_1 > 0.03 \\ 1.0 & s_1 \leq 0.03 \end{cases}$$

$$(9) \quad s_1 = \begin{cases} 0.03 & \text{U} \\ \frac{S}{K_1} & \text{R} \\ S & \text{C} \end{cases}$$

Para um coeficiente “ K_1 ” aproximadamente igual a 1 e para $S \leq 0.03$, o canal é essencialmente considerado como “irrestrito (I)”, devido ao seu baixo Fator de Bloqueio (S).

O coeficiente “ K_s ” reflete um fator de correção relacionado ao grau de restrição imposta pela existência de significativos bancos na seção transversal submersa do CN (parâmetro “ h_T/h ”, desenvolvido por GULIEV (1971) *apud* PIANC (2014)).

A Figura 8 apresenta um gráfico que possibilita identificar o valor do parâmetro “ K_1 ” com duas entradas: (i) a curva representativa “ h/T ” e o valor do Fator de Bloqueio (S) de determinada seção transversal submersa idealizada do CN.

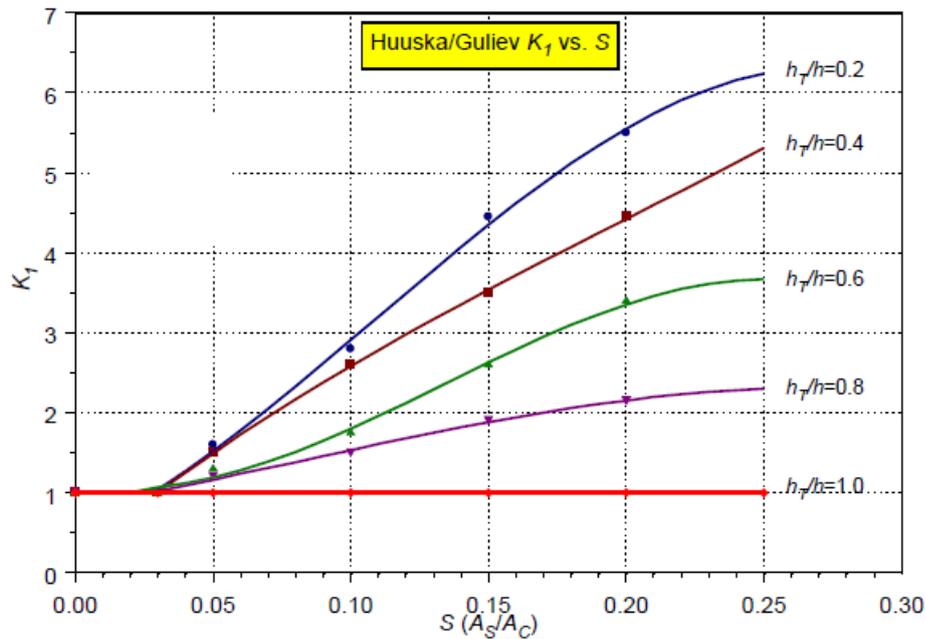


Figura 8: Método gráfico de obtenção do parâmetro “K1” necessário ao cálculo do parâmetro “Ks”. Fonte: PIANC (2014, p.193).

BRIGGS *et al.* (2013) *apud* PIANC (2014) desenvolveu um polinômio de ajustamento pelo método de mínimos quadrados para estabelecer a relação entre ($K_1 \times S$) gráfica, a qual havia desenvolvido em 2006, que representou uma grande facilidade na obtenção do coeficiente “ K_1 ” através do cálculo de coeficientes polinomiais mais adequados para representar cada uma das curvas representativas das razões “ h_T/h ”.

Tabela 2: Polinômio de ajustamento desenvolvido por BRIGGS *et al.* (2006, 2013) para calcular o parâmetro “K1”. Fonte: adaptada de PIANC (2014, p 194)

h_T/h	R^2	Polynomial Coefficients $K_1 = a_0 + a_1S + a_2S^2 + a_3S^3$			
		a_0	a_1	a_2	a_3
0.2	0.9985	0.46	15.85	124.06	-380.04
0.4	0.9998	0.21	28.20	-53.17	87.97
0.6	0.9961	1.10	-5.55	167.76	-417.72
0.8	0.9976	0.82	6.11	16.90	-70.86
1.0	1	1	0	0	0

Considerando uma maior incidência de ondas pelo setor Sul, onde está localizada a embocadura da Baía de Sepetiba, pode-se dizer que, no trânsito de entrada, o ângulo de incidência das ondas “ ψ ” se dá no setor “través - popa” da embarcação, o que representa um ângulo de incidência no intervalo $90^\circ \leq \psi \leq 180^\circ$ para ambos os bordos da embarcação. Já no trânsito de saída, o ângulo “ ψ ” se dá no setor através - proa do navio, ou seja, no intervalo $0^\circ \leq \psi \leq 90^\circ$ também para ambos os lados da embarcação.

O emprego do software J-FAIRWAY (2013) permitiu a introdução de diferentes valores discretos para “ ψ ”, como parâmetros de entrada, na realização dos cálculos estimativos para

quatro parâmetros: parâmetros: Z_1 , Z_2 , Z_3 e Z_4 e $Z(\max)$. Para a estimativa do fator máximo movimento vertical induzido por ondas “ $Z(m)$ ”, apenas interessam os parâmetros “ Z_2 ” e Z_3 ”.

3.2.2. Metodologia de cômputo da área da seção transversal submersa idealizada “ A_c ” do canal e principais parâmetros

Como visto anteriormente, a estimativa do fator Máximo “efeito *squat*” é substancialmente afetada pelo cálculo do fator de Bloqueio (S). Desta forma, além da área da seção transversal do navio “ A_s ” é necessário calcular a área da seção transversal submersa do CN “ A_c ”.

Segundo PIANC (2014, p.186), a área “ A_c ” é a área molhada da seção transversal do canal ou área equivalente da seção transversal submersa idealizada, após projetado o talude dos bancos laterais até o Nível de Referência (NR), considerado uma aclividade “ n ” estimada.

Largura e profundidade são parâmetros essenciais e correlacionadas. Suas ordens de grandeza são muito diferentes: o valor da profundidade está da ordem de poucas dezenas de metros, já a Largura do CN tem ordem de grandeza de poucas centenas de metros. Portanto, a representação gráfica de uma área “ A_c ” qualquer pode induzir a falsas percepções. A Largura efetiva do CN é validada pela Profundidade de Projeto selecionada.

Além da profundidade, determinada área “ A_c ” pode ser basicamente definida pelos seguintes parâmetros:

- Largura do Canal na Profundidade de Projeto ou Largura de Projeto (W);
- Largura projetada na superfície (W_{top}); e
- Aclividade dos taludes das margens laterais (n).

Matematicamente, a área “ A_c ” pode ser calculada a partir da seguinte formulação matemática:

(10)

$$A_c = W * h + n * h^2$$

A menor profundidade que poderia ser encontrada em determinado segmento de um CN é a Profundidade Nominal do CN. Nesse caso a profundidade “ h ” é igual ao valor da Profundidade de Projeto ($h = PP$), permitindo quantificar a área “ A_c ”.

Desta forma, a formulação matemática para o cálculo da área da seção transversal submersa idealizada, passaria a ser a seguinte:

(11)

$$A_c = W * PP + n * PP^2$$

Conforme demonstrado na Figura 9, a composição geométrica da área “Ac” pode ser representada três subáreas distintas: Na figura, a fórmula de PIANC (2014) para o cálculo de “Ac” pode ser representada pela soma algébrica de três áreas, delimitadas pelas linhas na cor roxa tracejadas.

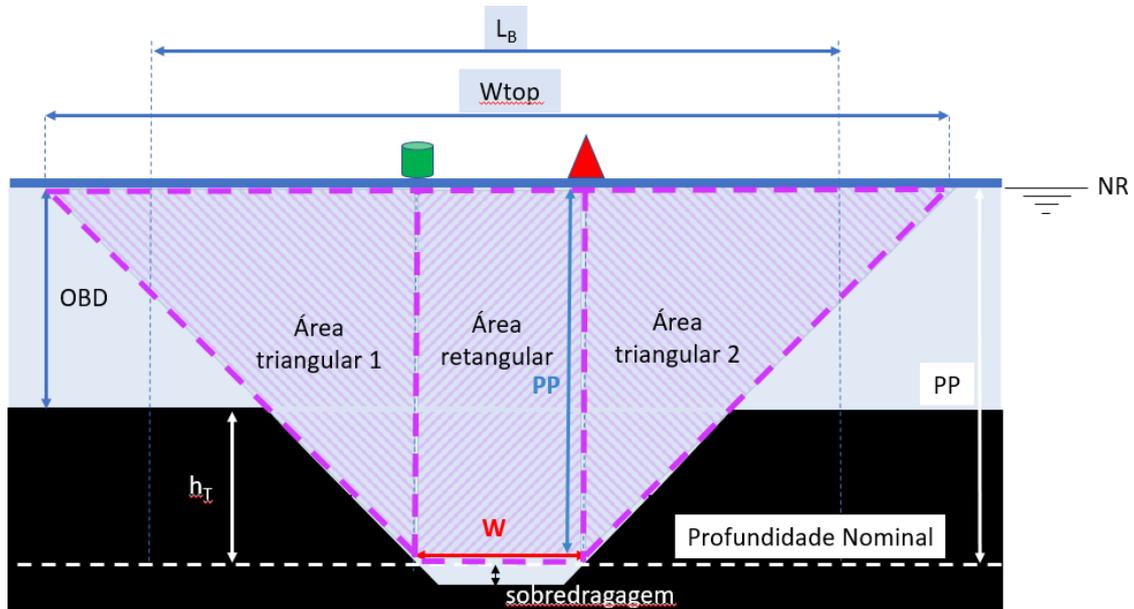


Figura 9: Representação geométrica da Fórmula de PIANC (2014) para o cálculo de “Ac”

De acordo com PIANC (2014), a área da seção transversal submersa idealizada (Ac) de um canal do tipo “irrestrito (I)” é definida a partir do cálculo do parâmetro “WEff”, que substituiria o valor “W” na formulação já apresentada, cujo valor seria igual à “Largura de Influência (LB)”, que pode ser calculada substituindo-se o valor de valor “n” pelo valor “zero”.

Os principais parâmetros de interesse para o cômputo da área “Ac” são definidos a seguir:

(a) Largura do Canal ou Largura de Projeto (W)

Segundo USACE (2008),:

“A Largura do Canal ou Largura de Projeto é definida como a distância medida na base dos taludes laterais do canal na profundidade de projeto.” Esta dimensão deve servir para caracterizar quaisquer tipos de canais idealizados: do tipo “irrestrito (I)”, do tipo “restrito (R)” ou do tipo “artificial (C)”. (USACE, 2008, p. V-5-39)

Na prática há algumas especificidades. Para um canal idealizado do tipo “artificial (C)”, por exemplo, a Largura do Canal (W) seria sempre igual à sua Largura no Fundo.

(b) Largura projetada na superfície (Wtop)

“Wtop” é o parâmetro calculado de uma seção transversal submersa idealizada, que delimita superiormente uma área “Ac” e é definida pela projeção das margens laterais ao canal, até a linha de referência da superfície da água.

Especificamente para seções transversais submersas de canais idealizados do tipo “restrito (R)”, o valor de “W” deve ser sempre inferior à “ W_{Eff} ”, ou seja, “ $W < W_{Eff}$ ”.

Utilizando a seguinte formulação matemática, disponível em PIANC (2014, p.186), foi possível calcular a largura projetada na superfície “ W_{top} ” das seções transversais submersas idealizadas “Ac”:

$$(12) \quad W_{top} = W + 2 * n * h$$

Considerando que a profundidade “h” é a própria “PP selecionada”, então a fórmula acima pode ser descrita da seguinte forma:

$$(13) \quad W_{top} = W + 2 * n * PP$$

(c) Aclividade do talude ou dos bancos laterais (n)

Em inglês significam “*bank slope*”. O valor de “n” é matematicamente definido pela relação H:V, ou seja:

$$(14) \quad n = \frac{\text{"corrida horizontal"}}{\text{"corrida vertical"}}$$

A aclividade do talude “n”, um canal exclusivamente esculpido pela natureza, depende das características combinadas entre sua composição física (partículas de diferentes materiais) e das condições hidráulicas, podendo variar de 1:2 a 1:15.

Valores mais baixos de “n” identificam taludes mais íngremes e são observados em fundos com areia mais compactada, solo rugoso (silte e lama), fortemente coesivos, com formações mais rígidas e firmes de argila, e mais comumente observados em pequenas profundidades (até 10 metros). Maiores valores para “n” identificam aclvidades mais suaves dos taludes, geralmente encontrados em áreas com solos classificados como não coesivos a fracamente coesivos (silte a argila leve).

O valor da aclividade “n” certamente faz parte do projeto de obra de dragagem, mas com o passar do tempo tal aclividade pode vir a sofrer pequenas alterações devido à natural acomodação das partículas, alcançando valores potencialmente diferentes daqueles inicialmente pretendidos.

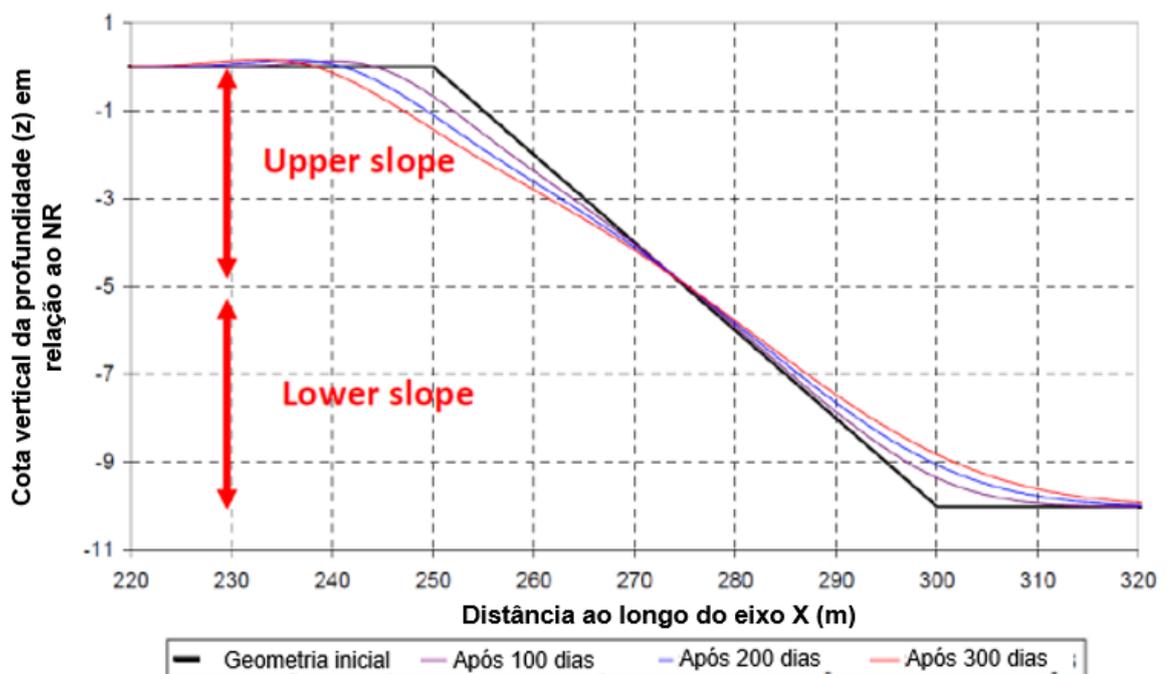
A leitura do texto de Van Rijn (2018) demonstra que, teoricamente, o talude de um canal pode ser representado pela composição equilibrada no tempo de um talude superior e um talude inferior, passível de sofrer alterações e acomodações naturais e que dependem da ação e ângulo

de incidência de agentes ambientais, tais como a corrente de maré, em relação ao alinhamento do CN, conforme representado na Figura 10.

Em princípio este equilíbrio está associado à natureza do material pelo qual o fundo é formado, mas pode ser interrompido em função da frequência, intensidade e persistência da determinados agentes ambientais, que podem contribuir para o acúmulo ou erosão de sedimentos que dinamicamente conduzem a uma nova situação de equilíbrio, e possivelmente resultando em uma sensível alteração da morfologia do fundo.

A deposição e a erosão de sedimentos, originados por escoamentos de entrada e saída de correntes de marés, associados a ondas de superfície e/ou a diversos outros mecanismos naturais podem causar as seguintes consequências:

- (a) Redução da capacidade de transporte, devido à redução das velocidades no escoamento (geralmente observados em segmentos do canal perpendiculares ao escoamento); e
- (b) Assoreamento do canal, devido a efeitos da ação da gravidade, induzindo um movimento de descida de partículas localizadas no talude (geralmente observado em canais cujo escoamento é paralelo ao canal).



Desenvolvimento da atividade das margens do canal devido a processos morfológicos no escoamento da maré

Figura 10 - Desenvolvimento do equilíbrio dinâmico do talude do canal de navegação, sujeito a processos morfodinâmicos, ocasionado pelo fluxo das correntes de maré.

Fonte: Van Rijn (2018).

Em estuários dominados pela maré, normalmente o fundo consiste na mistura entre areais, argila e material orgânico. A composição de areia fina, silte, argila e materiais orgânicos, com partículas inferiores a $62\mu\text{m}$, é definida como lama. Segundo o texto de Van Rijn (2018, p.3), um fundo que apresente propriedades coesivas geralmente é aquele que apresenta frações de partículas de lama ($< 62\mu\text{m}$) superiores a 30% da amostra. Tal fração é designada como “conteúdo crítico de lama”.

Efeitos coesivos de misturas de lama e areia tornam-se importantes quando partículas de areia são cercadas por partículas finas coesivas. Um fundo (solo) coesivo é completamente diferente de um solo não coesivo, pois a densidade do fundo não é constante ao longo do tempo devido a processos de deposição e consolidação que ocorrem em regiões próximas ao solo. A interação entre partículas bem finas coesivas resulta em agregação e floculação destas partículas que se depositam e se consolidam no fundo.

A estabilidade de grãos coesivos nos taludes das margens laterais do canal é relacionada ao ângulo de repouso entre estas partículas. Quando o talude supera determinado valor, os grãos começam a se mover, descendo em direção ao centro do canal e estabilizando em determinado ângulo, designado por Van Rijn (2018, p.5), como “ângulo de repouso”.

De acordo com Van Rijn (2018, p.5), grãos de areia apresentam ângulo de repouso de, aproximadamente, 30° e grãos de cascalho apresentam ângulos de repouso de, aproximadamente, 35° . Obras de dragagem podem induzir à mudança de aclividade deste talude, também designado aclividade das margens laterais (n).

Com o passar do tempo, a passagem de navios, assim como a ação de processos naturais, pode estabelecer novas condições de equilíbrio que vão depender do material do leito submarino. Este tipo de equilíbrio das margens somente pode ser mensurado com a realização de estudos geotécnicos específicos.

De acordo com PIANC (2014, p. 28), os bancos submersos dos canais do tipo “restrito (R)” e “artificial (C)” são geralmente representados por um único valor para a aclividade dos bancos laterais submersos (n). Tal simplificação poderia fazer com que diferentes alturas de bancos submersos (h_T) não refletissem diferentes estimativas para o “efeito *squat*”, por não serem tradicionalmente captadas pelo parâmetro clássico “fator de bloqueio (S)”.

3.2.3. Parâmetros de aferição do grau de restrição

Nem toda formulação matemática empiricamente formulada para estimar o máximo “efeito *squat*” explicita os mesmos parâmetros e capacidades de distinguir diferentes graus de

restrição em uma mesma seção transversal submersa, o que permitiria uma melhor e mais apurada estimativa para esse importante fator parametrizador da profundidade.

Como visto, o “fator de bloqueio (S)” é um importante parâmetro presente em quase todas as fórmulas matemáticas citadas por PIANC (2014). No entanto, uma mesma área “Ac” pode oferecer diferentes graus de restrição e conseqüentemente representar diferentes comportamentos hidrodinâmicos do navio que influenciam a magnitude do seu efeito.

Considerando a metodologia de estimativa da área “Ac” descrita em PIANC (2014), a Figura 11 ilustra nove diferentes representações gráficas de áreas transversais submersas do CN, colocadas lado a lado, de modo a facilitar a comparação mútua. Todas elas ilustram canais de navegação, cuja Largura de Projeto (W) é exatamente a mesma:

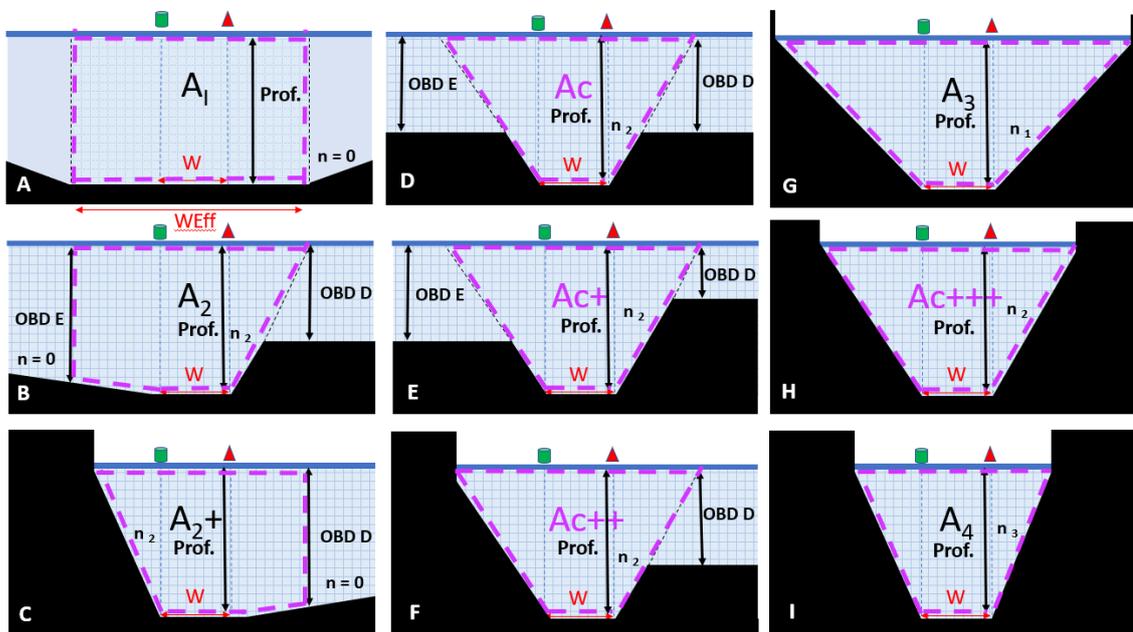


Figura 11: Representação gráfica de nove diferentes graus de restrição (o tamanho da área “Ac” não é suficiente para diferenciar graus de restrição). Fonte: elaboração própria

As ilustrações “A”, “B”, “C”, “G”, “H” e “I” apresentam diferentes tamanhos de área para a seção transversal submersa idealizada. As ilustrações “D”, “E”, “F” e “H” apresentam diferentes graus de restrição para uma mesma área “Ac”. Quanto maior o número de sinais de “+”, maior o grau de restrição indicado por cada ilustração.

As ilustrações “G”, “H” e “I” ilustram canais do tipo “artificial (C)” em que diferentes graus de restrição são observados principalmente em função das acilividades dos taludes (n_1, n_2, n_3), sendo $n_1 < n_2 < n_3$. Diferentemente do que ocorre como canais do tipo “restrito (R)”, em canais do tipo “artificial (C)”, maiores áreas estão diretamente associadas a menores valores para as acilividades dos taludes “n”, pois impactam diretamente no valor calculado para a largura

projetada na superfície “Wtop”, e conseqüentemente, no tamanho da área da seção transversal submersa do CN.

Um dos parâmetros que ajudam a descrever o grau de restrição de determinada seção transversal submersa idealizada é a altura dos bancos submersos (h_T). Como cada perfil batimétrico possui duas margens laterais e, portanto, alturas individuais para cada um dos bancos, estaria a uma determinada profundidade “OBD”.

Assim, para fazer a adequação de um dado perfil batimétrico (real) a uma determinada seção transversal submersa idealizada, foi necessário inferir o valor da profundidade média imediatamente externa ao CN, ou seja, o valor do parâmetro “Dout”, de modo que este valor representasse, de forma aproximada, um único valor para a profundidade dos bancos (*overbank depth* - OBD) nas duas margens: esquerda e direita, de um determinado perfil batimétrico.

Para tal demonstrou-se fundamental o estabelecimento de um critério que pudesse abranger possíveis diferenças numéricas entre o valor do parâmetro “OBD” e o parâmetro “Dout” por ocasião da correlação de um determinado perfil batimétrico a uma determinada área da seção transversal submersa idealizada do CN “Ac”, de modo que a altura das margens ou bancos submersos “ h_T ” pudesse ser adequadamente inferida.

O parâmetro “Dout” foi inferido com base na observação das profundidades cartografadas. Uma boa seleção de perfil batimétrico tinha que ser capaz de adequadamente identificar a cota vertical (z) associada a este parâmetro.

Como já demonstrado, o parâmetro “ h_T ” é fundamental para exprimir o grau de restrição de uma determinada seção transversal submersa idealizada, através da aplicação da formulação matemática de HUUSKA-GULIEV (1976). O polinômio desenvolvido por BRIGGS *et al.* (2006, 2013) permite adequadamente diferenciar cinco diferentes níveis de grau de restrição (cinco diferentes razões h_T/h) de modo a obter os parâmetros “S1” e “Ks” daquela formulação.

Matematicamente, em uma determinada coluna de água (h), os parâmetros “OBD” e “ h_T ” são complementares, ou seja, sua soma resulta na profundidade (h):

(15)

$$h = OBD + h_T$$

Para alcançar o objetivo de determinar o valor do parâmetro “ h_T ”, assumiu-se que os valores inferidos para o parâmetro “Dout” e do parâmetro “OBD” obtível a partir da análise de um perfil batimétrico deveriam ser aproximadamente iguais. Sendo assim:

$$(16) \quad h = D_{out} + h_T$$

Considerando que um dos objetivos deste trabalho é avaliar a seleção da Profundidade de Projeto, então seria natural que o valor da profundidade (h) passasse a ser representado pelo valor da “PP selecionada”. Conseqüentemente o parâmetro “ h_T ” passaria então a ser:

$$(17) \quad \begin{aligned} PP &= D_{out} + h_T \\ h_T &= PP - D_{out} \end{aligned}$$

No entanto, a equação acima indicaria a subordinação do valor do parâmetro “ h_T ” a uma eventual seleção inadequada para a seleção da Profundidade de Projeto, o que prejudicaria o desenvolvimento da análise. Como consequência, o grau de restrição poderia ser subestimado e assim tornar a estimativo do fator Máximo “efeito *squat*” menos adequada à utilização da fórmula de HUUSKA-GULIEV (1976).

Matematicamente, para efeitos de cômputo do parâmetro “ h_T ” a profundidade (h) foi substituída pela profundidade máxima média “H” identificada no perfil batimétrico analisado, a qual também pode ser designada como “*dredged depth*”. Sendo assim:

$$(18) \quad h_T = H - D_{out}$$

O aspecto observado acima garante que a análise de perfis batimétricos em seções transversais ao CN possa identificar a altura dos bancos submersos (h_T) à luz não só da profundidade média imediatamente externa ao CN (D_{out}) como também à profundidade em que determinado trecho foi efetivamente dragado, considerando a “sobredragagem” adicional à cota vertical (z) da Profundidade Nominal do CN em determinado trecho ou segmento.

As Figura 12, Figura 13 e Figura 14 ilustram o valor atribuído para o parâmetro “ D_{out} ” nos trechos “Inicial”, “Intermediário” e “Final” do CN. Notoriamente, essas três figuras apresentadas demonstram que a profundidade média imediatamente externa ao CN diminui quanto mais interior é o segmento ou trecho analisado do CN. Como implicação seria natural esperar que a altura do banco (h_T) em cada um destes setores também fosse ser maior no trecho “Final” do que no trecho “Inicial” do CN.

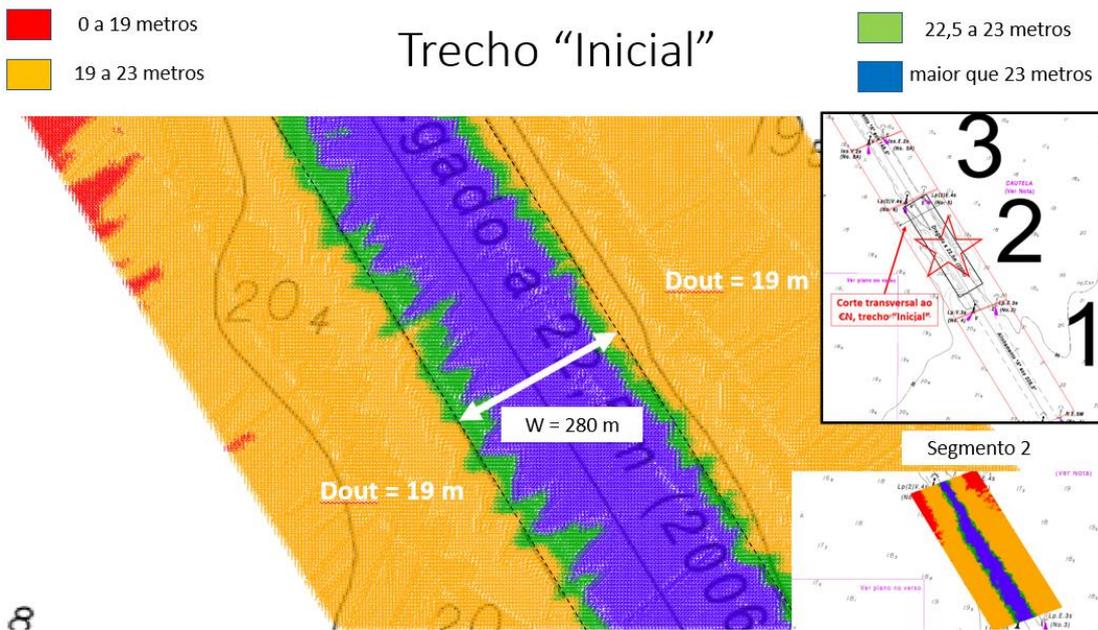


Figura 12: Batimetria de um trecho “Inicial” do canal de navegação de acesso ao Porto de Itaguaí-RJ, com base nas profundidades cartografadas na carta náutica 1623, da DHN.
 Fonte: elaboração própria⁷

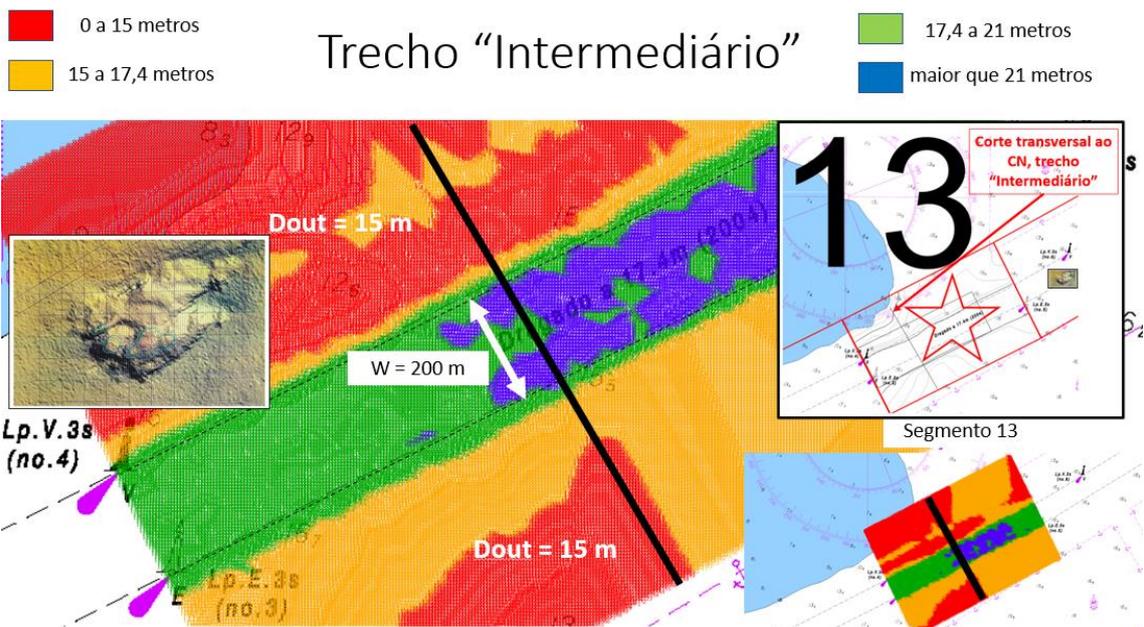


Figura 13: Batimetria de um trecho “Intermediário” do canal de navegação de acesso ao Porto de Itaguaí-RJ, com base nas profundidades cartografadas na carta náutica 1623, da DHN. Fonte: elaboração própria⁸

⁷ A profundidade média imediatamente externa ao CN (Dout) inferida foi de 19 metros, as profundidades inferiores a 19 metros estão destacadas na cor vermelha.

⁸ A profundidade média imediatamente externa ao CN (Dout) inferida foi de 15 metros, profundidades inferiores a 15 metros se encontram em destaque em vermelho.

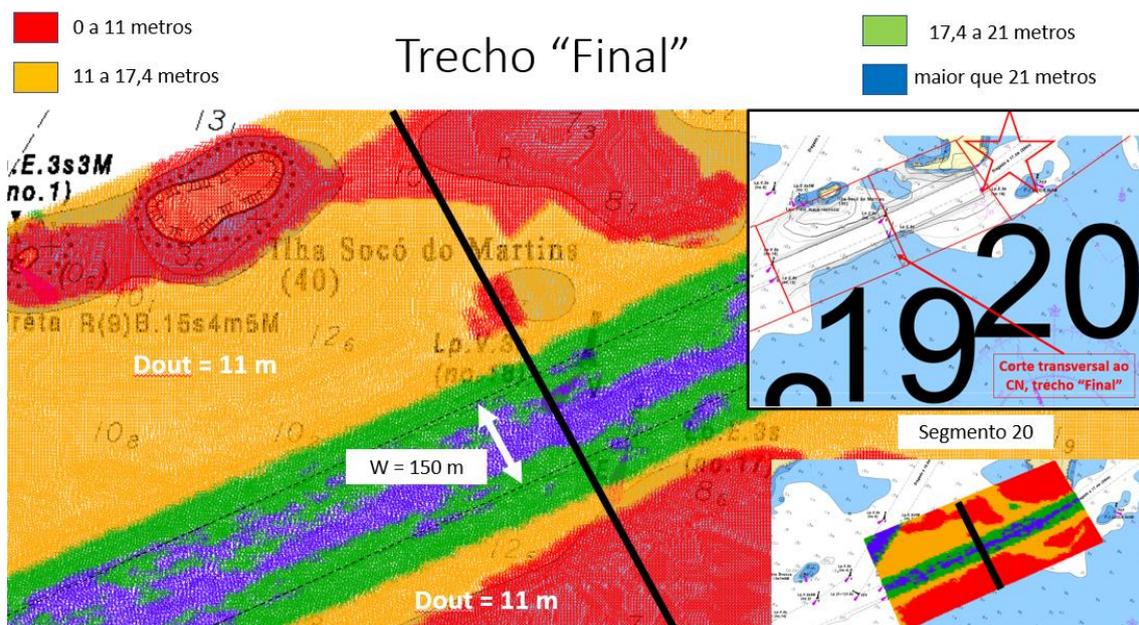


Figura 14: Batimetria de um trecho “Final” do canal de navegação de acesso ao Porto de Itaguaí-RJ, com base nas profundidades cartografadas na carta náutica 1623, da DHN. Fonte: elaboração própria ⁹

Na prática, o valor individual do parâmetro “ h_T ” identificado no perfil batimétrico selecionado para análise geométrica da área da seção transversal submersa idealizada do CN representativa para cada um dos três trechos analisados do CN destoou desta expectativa. Isto será oportunamente comentado nesta dissertação, embora não tenha comprometido a aplicação da metodologia apresentada.

Além disso, valor inferido para o parâmetro “Dout” para cada trecho analisado do CN foi fundamental à aplicação da metodologia japonesa de estimativa do máximo movimento vertical induzido por ondas “Z(m)”, que, juntamente com o fator Máximo “efeito *squat*”, representa os dois fatores de maior magnitude na composição do “requisito de UKC” e consequentemente o cômputo do parâmetro “PP calculada”.

3.3. Estimativa para o máximo movimento vertical induzido por ondas “Z(m)”

Segundo USACE (2008, V-5-28), não está disponível uma solução fácil e com grande acurácia para bem estimar o movimento vertical induzido por ondas envolvendo navios de grande calado, o que é preocupante. Os movimentos de um navio possuem seis graus de

⁹ A profundidade média imediatamente externa ao CN (Dout) inferida foi de 11 metros, as profundidades inferiores a essa medida estão destacadas em vermelho.

liberdade (três verticais e três horizontais). Esses movimentos induzidos podem ser influenciados por diversos agentes ambientais.

USACE (2008) afirma a importância da quantificação deste fator tendente ao lado conservador, incorporando, sempre que possível, medições para torná-la mais realista uma vez que maiores magnitudes de movimento vertical, quando medidos, não necessariamente são observados em navios com maior calado. Especificamente para navios de grande calado, a ação de resposta à incidência das ondas é aquela que revela maior iminente perigo ao toque no fundo.

Segundo PIANC (2014, p. 49), a resposta às ondas deve ser calculada para as condições limites e não para condições extremas. A análise do movimento vertical em resposta às ondas deve se limitar às condições estabelecidas no projeto. Tais condições foram designadas nesta dissertação como “Condições de Projeto”.

Em geral, para a navegação em águas oceânicas “as respostas de um navio sob a ação de ondas irregulares (mar real) podem ser determinadas pela sobreposição de respostas resultantes da ação de ondas regulares” (MOTA, 2019, p. 3.10).

O *RAO* (*Response Amplitude Operator*) é a relação entre o espectro da ondulação e a resposta do navio e, em geral, é assumida como linear. Segundo MOTA (2019, p. 3.11), “para um particular navio, os *RAOs* podem ser obtidos a partir de considerações teóricas, ensaio de modelos e provas de mar”.

A observação e registro de ondas no mar são uma combinação simultânea da ação de ondas locais e de origem oceânica (remota), como o *swell*. O *swell* geralmente possui mais longo período do que ondas geradas localmente, e, por esta razão, maiores amplitudes aos movimentos verticais induzidos estão associadas a ele.

Navios mercantes de grande calado não costumam ser influenciados pela incidência de ondas cujo período seja inferior a 6 segundos, pois o período natural dos seus movimentos (*pitch*, *heave* e *roll*) é maior do que este valor. Já as respostas à incidência de ondas cujo período seja superior a 8 segundos podem ser mais significativas (USACE, 2008), pois este valor se aproxima do período natural de algum destes movimentos.

Medições em campo demonstraram que, em regiões desabrigadas da incidência direta de *swell*, maiores excursões verticais podem ser medidas em navios de médio e grande porte, cujo comprimento (L_{pp}) seja aproximadamente igual ao comprimento da onda incidente (λ).

Segundo MCCARTNEY *et al.* (2005, p. 52), mesmo pequenos movimentos angulares de seus principais eixos (*pitch* ou *roll*) podem representar um grande movimento vertical e um significativo aumento do calado a meio navio. Operacionalmente isto representa uma diminuição do *Net UKC* e, portanto, maior possibilidade de toque no fundo.

Sob a ótica de projeto, trata-se de um fator de peso na elaboração de “requisitos de *UKC*”. Segundo USACE (2008) um único grau de ângulo de *pitch* pode significar um movimento vertical de 2,7 metros, para um navio com 300 metros de comprimento. apenas cinco graus de movimento angular de *roll*, pode significar um movimento vertical de até 2,1, para em um navio com 46 metros de Largura (B).

3.3.1. Metodologia japonesa

Essa metodologia se baseia nas pesquisas realizadas por OHTSU *et al.* (2006). PIANC (2014, p. 51) descreve a metodologia japonesa para realizar esta estimativa, que é aplicada dentro do escopo de um processo de verificação da seleção de uma Profundidade de Projeto classe II, descrita em MLIT (2007).

A metodologia japonesa é composta pelos seguintes passos:

1. Descrição das Condições de projeto relacionadas à descrição das características geométricas do Navio de Projeto e das características da onda incidente: altura significativa (H_s ou $H_{1/3}$) e período (T_p ou $T_{1/3}$);
2. Cálculo do movimento vertical induzido por ondas na proa do navio – estimativa do parâmetro “ Z_2 ”;
3. Cálculo do movimento vertical induzido por ondas na quilha do navio – estimativa do parâmetro “ Z_3 ”;

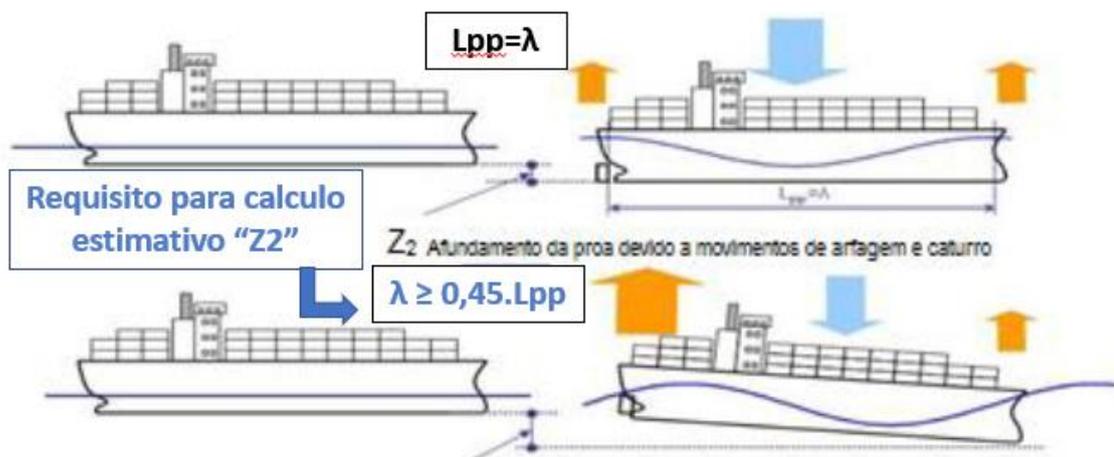
Comparação e seleção do maior valor estimado – Comparação entre o valor dos parâmetros calculados “ Z_2 ” e “ Z_3 ”: o maior entre eles representa o máximo movimento vertical induzido por ondas “ $Z(m)$ ”:

(20)

$$Z(m) = \text{MAIOR} [Z_2 ; Z_3]$$

Outros parâmetros de entrada são: a velocidade do navio (V_s) em m/s, a profundidade (h) do CN e (iv) o ângulo de encontro (ψ) entre a proa e a direção da onda incidente e a profundidade média imediatamente externa ao Canal de Navegação (Dout).

As Figura 15 e Figura 16 indicam as situações de interesse à aplicação da Metodologia Japonesa. A primeira pressupõe como requisito que máxima resposta de um navio à incidência de onda, ocorre quando comprimento da onda incidente (λ) é aproximadamente igual ao comprimento do navio (L_{pp}).



Z_2 : Afundamento da proa devido ao movimento acoplado "heave" e "pitch"

Figura 15: Condições de interesse para o cálculo do parâmetro " Z_2 " - aplicação da metodologia japonesa de estimativa do fator "Máximo movimento vertical induzido por ondas": (i) quando $L_{pp} = \lambda$; (ii) quando $\lambda \geq 0,45 \times L_{pp}$. Fonte: adaptada de PIANC (2014, p. 51)

Especificamente na Figura 15, são apresentadas duas situações distintas, em que o cômputo do parâmetro " Z_2 " é significativo. A primeira é uma situação clássica, em que o navio navega alinhado à direção de propagação da onda incidente, cujo comprimento é aproximadamente igual ao comprimento do navio ($\lambda = L_{pp}$), que é representada graficamente pela proa e popa do navio sendo apoio por duas cristas consecutivas da onda incidente.

A segunda é representada pela passagem de uma onda cujo comprimento da onda incidente (λ) é maior ou igual a $0,45 \times L_{pp}$. Para a metodologia japonesa, este valor corresponderia à situação em que a popa do navio é alcançada e fica "apoiada" pela crista da onda incidente, enquanto a proa da embarcação fica "apoiada" ou próxima ao cavado subsequente. Desta forma, a metodologia japonesa estabelece como requisito para cômputo do parâmetro " Z_2 " o seguinte:

(21)

$$\lambda \geq 0,45 \times L_{pp}$$

Em situações em que o comprimento de onda incidente (λ) não é maior que $0,45 \times L_{pp}$, ou seja, quando $\lambda \leq 0,45 \times L_{pp}$, este requisito não é alcançado e o cômputo do parâmetro " Z_2 " é considerado insignificante, e o valor dele computado como "Zero".

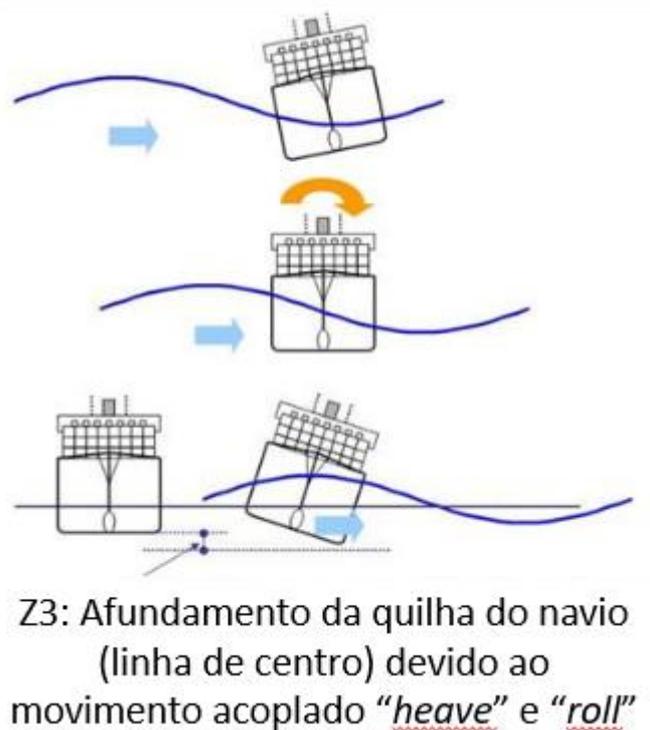


Figura 16: Condições de interesse para o cálculo do parâmetro “Z₃” - aplicação da metodologia japonesa de estimativa do fator “Máximo movimento vertical induzido por ondas”: (i) quando $T_e \approx T_r$. Fonte: adaptada de PIANC (2014, p.52)

Os maiores movimentos verticais seriam fruto da maior combinação entre o movimento vertical “*heave*” e outros dois movimentos angulares: *pitch* (longitudinal ao navio) ou *roll* (transversal ao navio), em localidades distintas do navio:

- a) **Na proa do navio:** pela combinação de movimentos “*heave*” e “*pitch*”, sendo numericamente designados pelo parâmetro “Z₂”; ou
- b) **Na quilha de Bombordo ou Boreste do navio:** pela combinação de movimentos de “*heave*” e “*roll*”, graficamente representado na Figura 16, sendo numericamente designado pelo parâmetro “Z₃”.

Na Figura 16 encontra-se o diagrama padrão utilizado pela metodologia japonesa, em seu segundo passo, para computar o valor do parâmetro “Z₂”. Esse diagrama é utilizado como referência para a identificação das ordenada “Y” da função RAO padrão, que computa a razão entre o parâmetro “Z₂” e a amplitude média da onda incidente (Hm) e conseqüentemente o afundamento da proa do navio em função do ângulo de incidência da onda “ ψ ”. Já o eixo das abcissas (abscissa “x”) é calculado em função dos dados de entrada fornecidos que permitem o

cálculo do valor de $\sqrt{\frac{L_{pp}}{\lambda}}$.

Neste diagrama, cada curva é uma função do ângulo de incidência da onda “ ψ ”. O eixo das ordenadas “Y” corresponde a um fator de amplificação ou redução em relação à amplitude média da onda incidente.

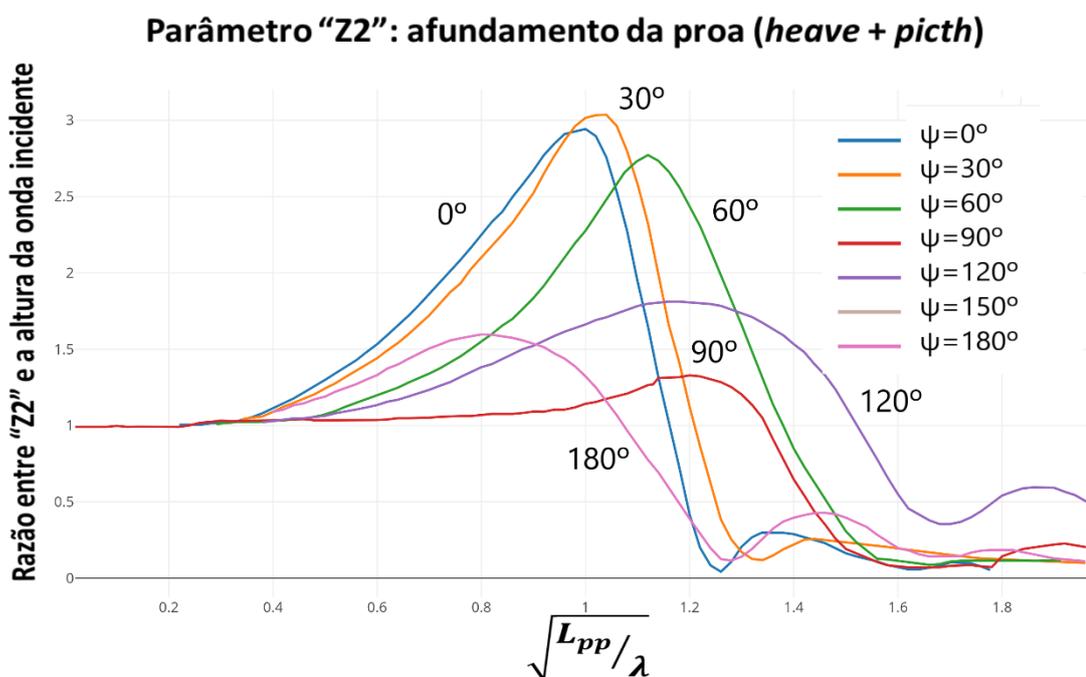


Figura 17: Curvas RAO padrão, em função do ângulo de incidência da onda sobre a proa do navio “ ψ ”, para cômputo do parâmetro “Z₂”. Fonte: elaboração própria¹⁰

“ $\psi = 0^\circ$ ” indica a incidência de ondas na proa da embarcação, seja no trânsito de entrada ou de saída; “ $\psi = 90^\circ$ ” indica a incidência de ondas pelo través do navio; e finalmente “ $\psi = 180^\circ$ ” a incidência de ondas pela popa do navio.

No terceiro passo, estima-se o máximo afundamento da quilha (extremos a bombordo e boreste), tomando por base os máximos movimentos possíveis devido à associação de *heave* e *roll*, na quilha de um dos bordos do navio: quantificado pelo cômputo do parâmetro “Z₃”.

Para um navio de grande porte, o movimento de “*roll*” é o movimento mais relevante sobre o aspecto da magnitude movimento (MOTA, 2019). Desta forma, espera-se que a magnitude do parâmetro “Z₃” seja naturalmente maior do que a do parâmetro “Z₂”. No entanto, o parâmetro “Z₃” só passa a ser significativo ao cômputo quando cumpre o seguinte requisito, estabelecido na metodologia. Segundo a metodologia, o parâmetro “Z₃” passa a ser significativo

¹⁰ Os dados foram extraídos da tabela “*RAO of bow sinkage Z2 of a cargo ship due to heave and pitch*”, de MLIT (2007), reproduzidas em PIANC (2014, p.53).

somente quando o período natural do movimento de *roll* (T_r) do navio é aproximadamente igual ao período de encontro com a onda incidente (T_e), ou seja, quando:

$$(22) \quad \boxed{T_r = T_e}$$

A relação matemática acima é um pré-requisito necessário ao cálculo do parâmetro “ Z_3 ”. Enquanto este pré-requisito não é alcançado, o valor calculado para o parâmetro “ Z_3 ” é igual a “Zero”, o que na prática representa que o movimento induzido pela onda é considerado pela metodologia japonesa como insignificante.

Segundo PIANC (2014), o valor do parâmetro “ Z_3 ” pode ser calculado da seguinte forma:

$$(23) \quad \boxed{\begin{aligned} Z_3 &= 0,7 * \frac{H_s}{2} + \frac{B}{2} \text{sen} \Phi_{max} \\ \Phi_{max} &= \mu * Y * \phi \\ \phi &= 360 * \left[\frac{0,35 * H_s}{\lambda} \right] * \text{sen}(\psi) \end{aligned}}$$

Onde:

$\mu * Y = 7$ (valor máximo, pois trata-se de um navio típico)

(μ) amplitude adimensional de movimento de “*roll*” em ondas regulares

(Y) coeficiente efetivo de esbeltez da onda.

No quarto passo da metodologia, a estimativa numérica para o Máximo movimento vertical induzido por ondas “ $Z(m)$ ” é a seleção entre o maior valor calculado entre os parâmetros “ Z_2 ” e “ Z_3 ”, ou seja, o maior deles.

MLIT (2007) reconhece as limitações inerentes à aplicação desta metodologia. O emprego do diagrama apresentado na Figura 16, demonstra limitada eficiência estimativa para o cálculo do parâmetro “ Z_2 ”, em situações em que:

$$(24) \quad \boxed{\sqrt{\frac{L_{pp}}{\lambda}} \geq 1,5}$$

Isto significa que, a presente metodologia apresenta resultados mais confiáveis quando:

(25)

$$\sqrt{\frac{L_{pp}}{\lambda}} < 1,5$$

Basicamente isto depende do comprimento do Navio “L_{pp}” e do comprimento da onda incidente “λ”. Além disso, a premissa utilizada para a inferência de possíveis resultados de “Z(m)” baseados em ângulos de incidência (ψ) pré-estabelecidos em sete diferentes curvas função RAO padronizadas existentes (ψ = 0°; 30°; 60°; 90°; 120°; 150°; e 180°) é uma significativa simplificação e representa uma limitação para a estimativa do parâmetro “Z₂”, mas que não chega a comprometer muito o cálculo estimativo para o parâmetro “Z₃” e conseqüentemente para “Z(m)”, quando “Z₃” > “Z₂”.

Apesar de “λ” ser uma característica da onda incidente, ele é um parâmetro de entrada calculado. Basicamente seu cálculo depende de apenas dois parâmetros: (i) da profundidade “Dout” e do período da onda incidente “Tp”. Quanto maior “Dout” e/ou “Tp”, maior o comprimento da onda (λ) calculado. Matematicamente, o valor do comprimento da onda incidente, pode ser calculado da seguinte forma:

(26)

$$\lambda = \frac{g \cdot T_p^2}{2\pi} \tanh(k \cdot h)$$

Onde:

g = aceleração da gravidade (g = 9,8 m/s²)

k = número de onda [$k = 2\pi/L$]

h = profundidade média local, sendo representada pelo valor da profundidade “Dout” inferida para cada trecho do CN, com base na análise das profundidades existentes na carta náutica oficial.

3.3.2. Climatologia das ondas incidentes na região de estudo

SOARES (2016) utilizou uma série de 60 anos de dados de reanálise (1948-2008) do modelo SMC-Brasil – Sistema de Modelagem Costeira, a partir da reconstrução dos ventos geradores de ondas, para caracterizar as condições estatísticas de onda, em águas profundas, enfatizando que tais dados contemplariam apenas um subconjunto de todas as possíveis ondas incidentes sobre aquela localidade.

Segundo SOARES (2016), estas simulações foram realizadas no modelo SMC-Brasil SMC em 17 malhas com 1 km de resolução. As séries reconstruídas, denominadas DOW (*Downscaled Ocean Waves*), foram obtidas no ponto de coordenadas geográficas Latitude

24,6189° S e LONG 044,4128° W, localizados em zona oceânica, próximo à entrada da Baía da Ilha Grande.

Para a realização da análise estatística, o autor separou os dados em 16 diferentes classes em intervalos de 22,5°. Foram considerados dados cuja ocorrência foi superior a 1% e representa dados estatísticos apenas de *swell*, que não sofreram refração em função da propagação em águas rasas. Aparentemente este procedimento eliminou a ocorrência de eventos ou dados esporádicos registrados na série temporal.

Tabela 3: Estatística de alturas e períodos de onda na posição geográfica LAT 24.6189° S e LONG 044.4128° W. Fonte: adaptada de SOARES (2016, p.57).

Climatologia de ondas						
Origem da onda	Sigla	Ocorrência por direção (%)	Hs (m) 50%	Tp (s) 50%	Hs (m) 99%	Tp (s) 99%
Leste-Nordeste	E-NE	1,7	1,4	7,7	2,5	10,1
Leste	E	20	1,7	8,2	2,8	11,3
Leste-Sudeste	ESSE	28,7	1,9	8,4	3,1	12,7
Sudeste	SE	18,7	2	9,5	3,4	14,1
Sul-Sudeste	S-SE	16,3	2,2	10,5	3,8	14,9
Sul	S	10,7	2,6	11,1	4,5	15
Sul-Sudoeste	S-SO	2,3	3	10,8	5	14,9

A Tabela 3 consolida alguns dados da climatologia de ondas presentes em SOARES (2016) que incidem na área oceânica ao Sul da Baía da Ilha Grande. Ela demonstra que o período das ondas incidentes (Tp) varia, basicamente, no intervalo entre [7,7 e 14,9 segundos] e que a altura significativa de ondas (Hs) possui valores médios variantes entre [1,4 e 3 metros].

Segundo SOARES (2016), a climatologia de ondas com frequência é expressa em função da altura significativa de ondas (Hs) e que isto pode tanto ser fonte de erro como uma representar grande margem de segurança para realização de cálculos estruturais em obras de engenharia costeira.

3.4. Caracterização do estuário Baía de Sepetiba

As diferentes Profundidades Nominais do CN encontram-se cartografadas nas cartas náuticas 1621 e 1623 da DHN e são registradas no espaço delimitado por linhas tracejadas, conforme identificado nas Figura 18, Figura 19 e Figura 20. Tais linhas indicam os limites geométricos associados à “Profundidade Nominal” do CN, estabelecida em um determinado ano.

Na Figura 18, observa-se que no trecho “Inicial” a “Profundidade Nominal” foi estabelecida no ano de 2006; já nas Figura 19 e Figura 20, observa-se que a “Profundidade Nominal” nos trechos “Intermediário” e “Final” do CN foi estabelecida no ano de 2004. Nota-se, portanto, que tais profundidades não são aparentemente atualizadas há pelos menos 18 anos na Carta Náutica.

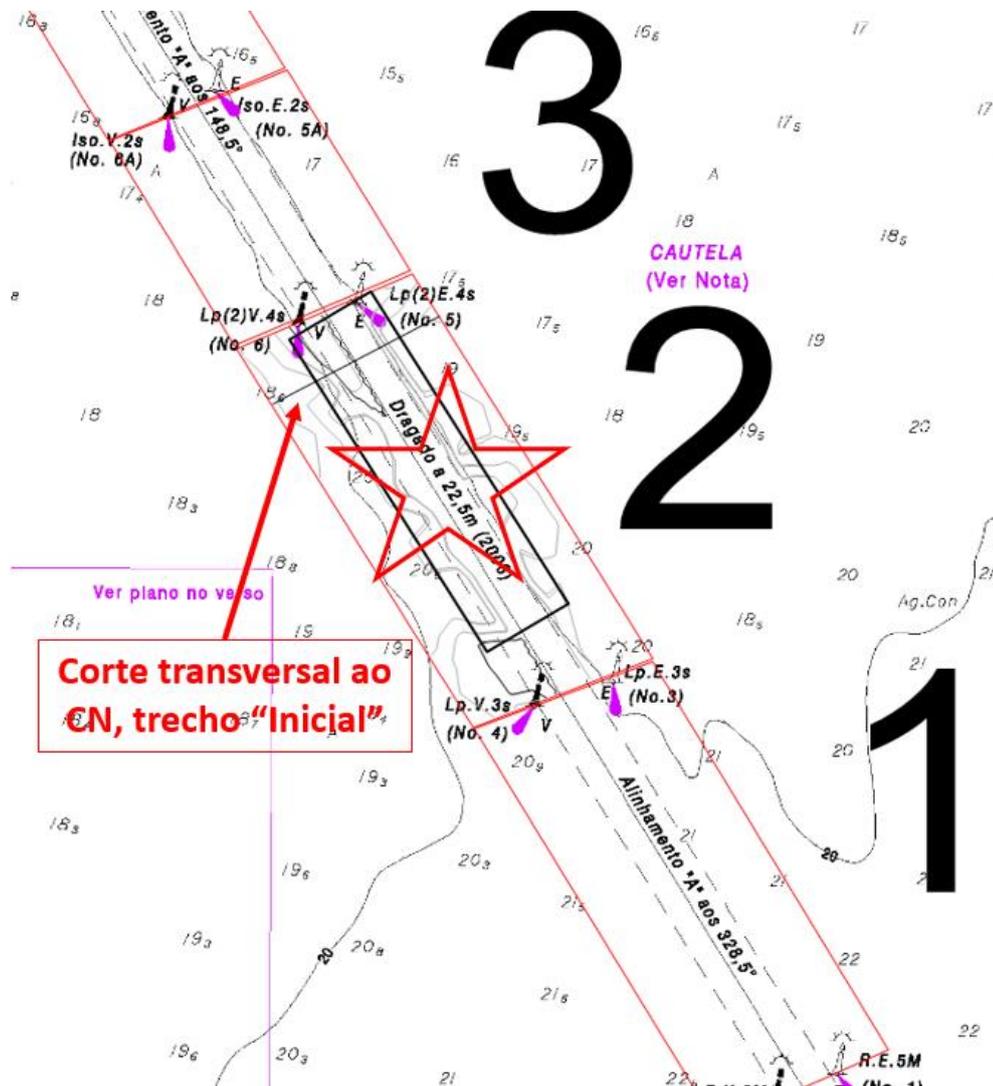


Figura 18: Indicação da Profundidade Nominal relativa ao trecho “Inicial” do canal de navegação. Fonte: extraída da carta náutica 1623 da DHN.

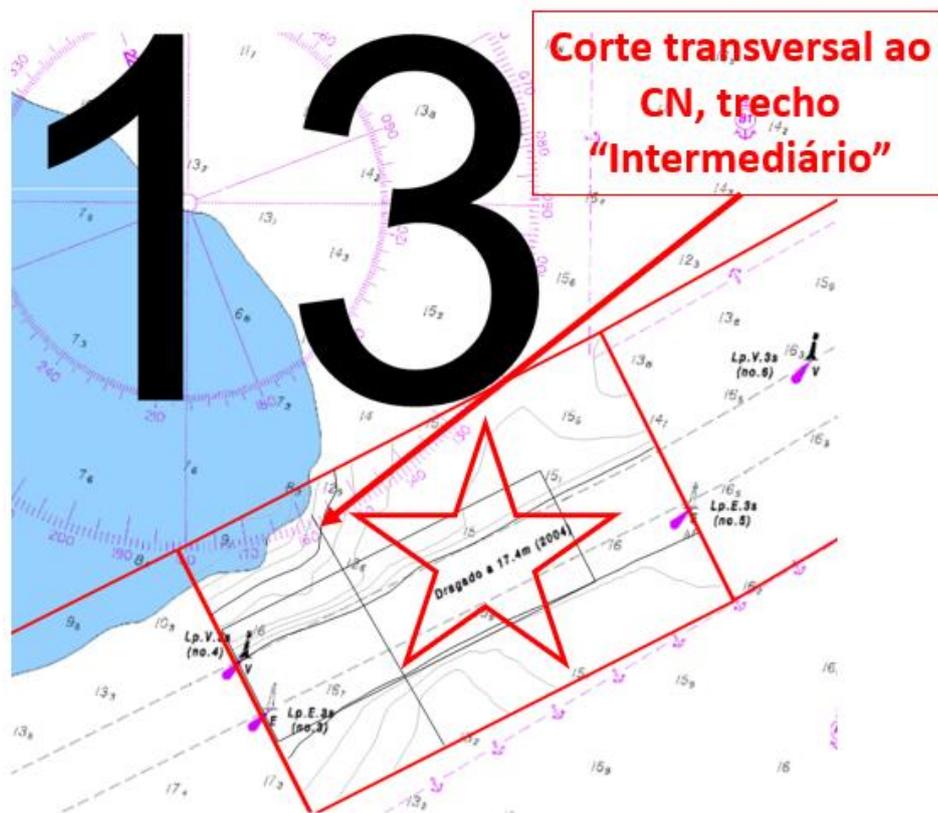


Figura 19: Indicação da Profundidade Nominal relativa ao trecho “Intermediário” do canal de navegação. Fonte: extraída da carta náutica 1621 da DHN.

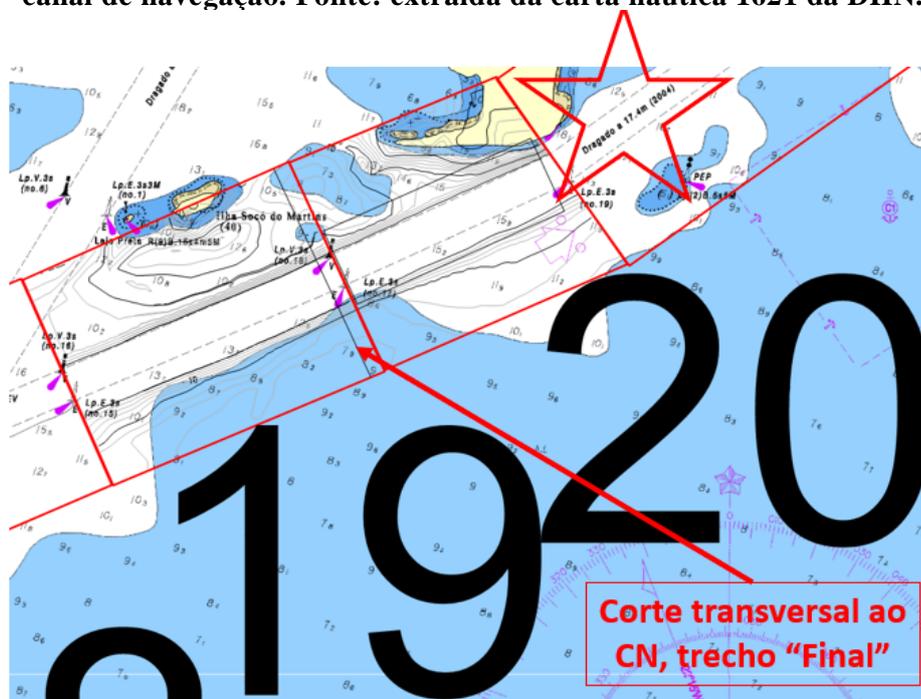


Figura 20: Indicação da Profundidade Nominal relativa ao trecho “Final” do canal de navegação. Fonte: extraída da carta náutica 1621 da DHN.

Os seguintes aspectos ambientais foram observados no estabelecimento “Condições de Projeto” assumidas nesta pesquisa.

MUEHE e VALENTINI (1998) verificaram que:

“a dragagem do canal de acesso aos portos de Sepetiba e da Ilha Guaíba, bem como os aterros para a implantação das diversas áreas de operação dos mesmos, são as principais obras de engenharia com consequências morfológicas e da qualidade de água neste recinto.” (MUEHE; VALENTINI, 1998, p. 82).

Embora esse CN tenha sido estabelecido sobre canal natural pré-existente, é provável que obras de engenharia sobre ele realizadas tenham contribuído para significativas mudanças da morfodinâmica do fundo daquela Baía ao longo do tempo.

Como consequência, a batimetria na região estuarina da Baía de Sepetiba não é homogênea, ainda que o CN tenha sido projetado sobre um canal natural, que vem historicamente sofrendo grande interferência humana.

Segundo MUEHE e VALENTINI (1998), foram verificados os seguintes padrões da ação dos principais agentes ambientais na região da Baía de Sepetiba:

- a) Maior frequência e predominância do vento Sul (S), em todos os meses do ano, com velocidades médias variando entre 3,78 e 4,56 m/s, alcançando com frequência velocidades iguais ou superiores a 10m/s, situação em que se observa a incidência de ondas com altura superiores a 2 metros;
- b) Circulação hidrodinâmica dominada pela maré nos canais principais, com correntes que podem ser superiores a 0,77 m/s;
- c) Amplitude média da maré de sizígia igual a 110 cm;
- d) Amplitude média da maré de quadratura igual a 30 cm;
- e) Cobertura no fundo da Baía predominantemente lamosa (silte com manchas de argila, associada à desembocadura dos Rios Guandu e São Francisco e a Leste da Ilha de Itacuruçá), com predominância de sedimentos arenosos (areia grossa) na entrada da baía e ao longo da restinga da Marambaia (PONÇANO (1976) *apud* MUEHE *et al.* (1998));
- f) Propagação das ondas para o interior da Baía de Sepetiba, e consequente transporte de sedimentos, condicionada à presença e proteção oferecida pela Ilha Grande. As ondas de origem S-SO são aquelas que mais penetram para seu interior, “submetendo as praias expostas a acentuadas alternâncias entre condições de baixa e alta energia” (MUEHE e VALENTINI, 1998, p.67).
- g) Incidência direta de ondas de origem SO-S-SE para interior da Baía, a partir da entrada localizada entre a Ilha grande e a Ilha da Marambaia.

MOREIRA SILVA (1969) *apud* MUEHE e VALENTINI (1998) teria apresentado estudo relacionado à transformação das ondas em águas rasas devido ao fenômeno da refração,

demonstrando a razoabilidade da incidência de ondas com alturas superiores a 2 metros na arrebentação, principalmente ao Sul da Ilha Guaíba, sob a ação de ventos Sul (S).

SOARES (2016) demonstrou a grande importância de um minucioso detalhamento das ondas incidentes, envolvendo uma análise de um Projeto possivelmente afetado pela incidência de ondas. Se estudo identificou a grande influência do nível médio do mar local na regional e sua variação, enquanto média móvel temporal. Destacou que certos níveis de água permitem o ingresso de ondas de grande altura para o interior da Baía, através da embocadura Sul, atingindo a Ilha Guaíba.

FONSECA e GUERRA (2012) analisaram dados coletados em diferentes posições ao longo do CN e desenvolveu um modelo bidimensional de circulação hidrodinâmica da Baía de Sepetiba analisando diferentes cenários de composição do nível de água. Concluiu haver dominância de enchente devido à significativa assimetria da maré, com mais curtos e intensos, que, portanto, estariam associados a maiores intensidades para a corrente local, cujo valor médio máximo seria de 1m/s.

As maiores intensidades das correntes na superfície estariam associadas à enchente, em ciclo de maré de Sizígia, possuindo a mesma direção do alinhamento longitudinal ao CN. Em marés de Quadratura, a intensidade máxima estimada para a corrente, segundo FONSECA e GUERRA (2012), seria de apenas 0,3 m/s.

Há ainda algumas lacunas de informação sobre a região como a falta de acompanhamento sistemático da evolução das feições submersas (morfodinâmica do fundo) junto à costa (MUEHE e VALENTINI, 1998, p. 93). No entanto, é pública a informação de que existe um afloramento rochoso localizado dentro dos limites do CN, situado a Noroeste (NO) da Ilha de Jaguanum, entre a localização das Boias nº 3 e nº 5 do CN, na região onde foi identificado o segmento “Intermediário” do CN.

3.4.1. O efeito da maré meteorológica no nível médio local

Na costa S/SE do Brasil há predominância de estuários dominados e influenciados por micromarés, caracterizadas por relativas pequenas amplitudes entre os níveis associados à maré astronômica. Na costa N/NE temos um cenário bem distinto, onde muitos estuários são principalmente influenciados por macromarés.

A costa S/SE do Brasil também é fortemente influenciada pelos efeitos da “maré meteorológica”, cuja amplitude pode se combinar ao nível da maré astronômica, produzindo condições tanto favoráveis quanto desfavoráveis ao acesso destes navios, mesmo em condições de aparente bom tempo para a navegação de navios de grande porte e dimensões.

CAMPOS *et al.* (2010), quantificou e analisou a ocorrência de eventos extremos positivos (sobre-elevação) e negativos (subelevação) do nível não-astronômico, o que inclui a contribuição do nível associado à maré meteorológica. Foi analisada uma série temporal de 40 anos de dados de nível coletados no Porto de Santos - SP. Neste estudo foram analisadas as variações sazonais e interdecadais das séries temporais de nível não astronômico de forma a identificar espacialmente padrões médios das composições (médias temporais de pressão e vento na superfície) e, posteriormente, padrões sinóticos associados aos casos mais extremos.

CAMPOS *et. al* (2010) identificou as seguintes estatísticas para eventos independentes de sobre-elevação e subelevação do nível médio do mar para a série temporal de dados obtidos entre 1951 e 1990, tendo sazonalidade dos dados representada pelos seguintes meses:

- Primavera: setembro, outubro e novembro;
- Verão: dezembro, janeiro e fevereiro;
- Outono: março, abril e maio;
- Inverno: junho, julho e agosto.

Tabela 4: Dados estatísticos coletados entre 1951 e 1990 no Porto de Santos-SP, sazonalidade de sobre-elevações e subelevações, por estação do ano, do nível médio do mar decadal. Fonte: elaboração própria¹¹

Santos (1951-1990)	Primavera	Verão	Outono	Inverno
Sobre-elevação média do nível do mar	14.5%	13.4%	40.2%	30.8%
Sub-elevação do nível médio do mar	47.2%	10.4%	10.0%	32.3%

CAMPOS *et al.* (2010) estabeleceu que uma variação de magnitude igual ou superior a dois desvios padrão em relação ao valor do nível médio do mar decadal, ou seja, 0,38 metro representaria um significativo evento de sobre-elevação ou subelevação na Costa S/SE do Brasil.

No outono há uma maior probabilidade de eventos de sobre-elevação, pois mais de 40% de eventos de sobre-elevações ocorreram nesta estação do ano. Neste mesmo período, a probabilidade de ocorrência de significativos eventos de subelevação do nível médio é relativamente pequena.

Na primavera, há uma menor probabilidade de ocorrência de eventos de sobre-elevação, mas uma grande probabilidade de ocorrência de eventos de subelevação em relação ao respectivo nível médio do mar decadal, nesta estação. Quase 50% dos eventos de subelevação ocorreram nesta estação do ano, conforme demonstram os dados apresentados na Tabela 4.

¹¹ Os dados para a elaboração da tabela foram retirados de CAMPOS *et al.* (2010).

Já no verão, variações ao nível médio decadal devido à maré não astronômica são bem menos frequentes. Isto significa que nesta estação do ano, de modo geral, o nível médio do mar costuma ser modulado pela flutuação da componente astronômica da maré.

No inverno há uma maior probabilidade de ocorrência de significativas variações em relação ao nível médio do mar decadal, tanto relacionadas a subelevações quanto a sobre-elevações. Este fato é intimamente ligado à grande frequência de passagem de frentes frias oriundas do Polo Sul, que afetam o Atlântico Sul nesta estação do ano, estando também intimamente ligado à percepção do efeito da componente da maré meteorológica na composição de nível associado à maré não astronômica.

MELO FILHO (2017, p.33-35) demonstrou que grande parte da energia total do nível não astronômico na costa S/SE do Brasil advém das variações de nível gerada pela maré meteorológica e bandas de frequências associadas. Segundo a referência, no ano de 2003, a contribuição da energia da maré meteorológica correspondeu a algo entre 65 e 80% do processo físico associado à variação de nível correspondente à componente “não astronômica” da maré.

Segundo CAMPOS *et al.* (2010), ao analisar a sazonalidade de eventos de subelevação do nível médio do mar, especialmente nas estações de inverno e primavera, são observadas máximas intensidades de altas pressões sobre o Atlântico Sul.

No inverno estes centros de alta pressão tendem a se localizar, em média, mais ao norte, com ainda maior intensidade. Na primavera, tendem a se localizar mais ao sul do Atlântico Sul, apresentando, contudo, menor intensidade.

“No outono e principalmente no verão, em geral, não se formam grandes pistas com ventos de nordeste a ponto de gerar casos importantes de ‘maré meteorológica negativa’” (CAMPOS *et al.*, 2010, p. 183).

O CN de acesso ao Porto de Itaguaí é extenso. O tempo necessário para realizar trânsito de entrada ou saída é da mesma ordem de grandeza do ciclo entre uma Preamar e uma Baixa-mar consecutiva do nível da maré astronômica. Isto quer dizer que determinado nível de maré astronômica está disponível apenas duas vezes ao dia na região. Caso este nível seja da mesma magnitude da contribuição da maré meteorológica no nível, determinada coluna de água pode se tornar insuficiente.

Pode-se afirmar, portanto, que a contribuição da maré meteorológica no nível é notória e significativa, sendo observada anualmente, principalmente nos meses relativos ao inverno e primavera. Sua previsibilidade é complexa, mas seus efeitos são significativos e frequentes ao longo de toda a costa Sul/Sudeste brasileira. Desta forma, também é relevante considerar a sua contribuição para a coluna de água e por isso foi incluída entre os fatores componentes do

parâmetro de referência “PP calculada”, mais especificamente na composição do “requisito de UKC”.

3.4.2. Critérios de Projeto assumidos

Segundo PIANC (2014, p.10), é importante que o engenheiro e/ou projetista concentre as suas estimativas de erro para o lado conservador, especialmente quando a situação ambiental não é totalmente compreendida ou limitada, situação que exige a assunção de determinadas premissa, condições ou critérios.

Um critério de engenharia, segundo MCNALLY (2008, p.21), é normalmente o resultado do histórico de performance, resultados de modelagem e julgamento de engenheiros com larga experiência e perspectiva. Uma baixa performance de um Projeto de Navegação pode levar muitos anos para demonstrar as suas fraquezas.

Minimamente, os seguintes parâmetros citados em USACE (2008) foram úteis à composição das “Condições de Projeto” nesta metodologia:

- (1) **Ondas e ventos locais:** assumiu-se que tal contribuição já se encontra computada nas estimativas para os fatores máximo “efeito *squat*” “S(m)” e “máximo movimento vertical induzido por ondas “Z(m)”. Este último é computado a partir do máximo valor esperado para a altura significativa da onda (Hs) e período (Tp) estabelecidos como limites para a característica da incidência das ondas.
- (2) **Magnitude das correntes:** as correntes contribuem de forma indireta nos cálculos estimativos do cômputo dos fatores selecionados, através do parâmetro velocidade. No cômputo estimativo do máximo “efeito *squat*” é considerada a velocidade relativa, enquanto no cômputo da amplitude máxima do movimento vertical induzido por ondas é considerada a velocidade resultante. A intensidade da corrente afeta diferentemente o cômputo destes dois fatores e é variável no tempo e no espaço, ao analisar seu comportamento em uma mesma coluna de água.

Optou-se por não estabelecer limites para os valores máximos para as correntes, uma vez não há efeitos diretamente correlacionáveis ao cômputo e avaliação da Profundidade de Projeto.

Para alcançar o objetivo proposto nesta dissertação, considerou-se que as intensidades das correntes são intrinsecamente computadas, embora não estejam explicitadas no cômputo individual dos fatores selecionados.

- (3) **Características das Ondas Incidentes:** as características das ondas incidentes de maior altura significativa (Hs) e período de Pico (Tp), foram assumidas a partir da

análise climatologia das ondas incidentes ao Sul da Ilha Grande, cujas informações foram extraídas de SOARES (2016).

O trecho “Final” do CN foi considerado totalmente abrigado da incidência direta do *swell*, enquanto os trechos “Inicial” e “Intermediário” foram considerados desabrigado da incidência direta do *swell*, conforme demonstra na Figura 21.

O trecho “Inicial” está bem mais “desprotegido” da incidência direta de ondas do que o trecho “Intermediário”, podendo inclusive receber a incidência direta de ondas de origem Leste (E). Já o trecho “Intermediário” está mais sujeito à incidência direta de ondas de origem Sudoeste-Sul (SO-S). O Trecho “inicial” está localizado próximo à embocadura da Baía de Sepetiba com o mar e foi assumido que o Trecho “Final” está totalmente abrigado da incidência de ondas.

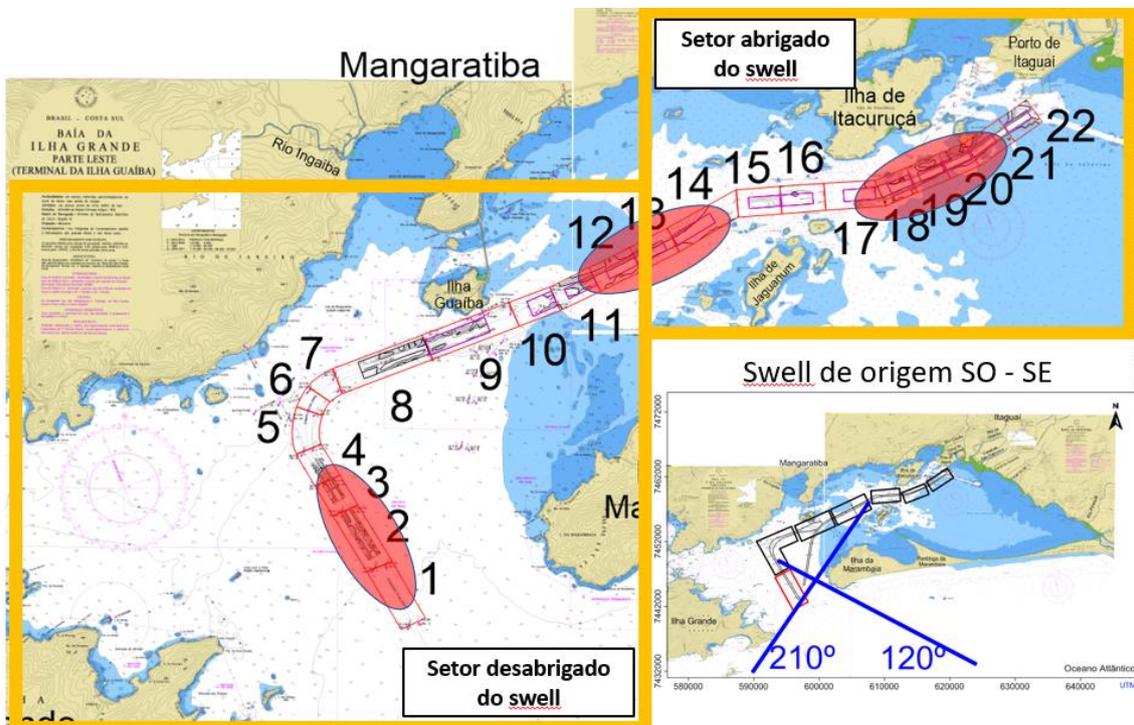


Figura 21: Localização dos trechos analisados pertencentes ao canal de navegação de acesso ao Porto de Itaguaí-RJ. Fonte: elaboração própria

Assumiu-se que a altura significativa “ H_s ” máxima incidente no trecho “Inicial” do CN é de 2 metros, 1 metro no trecho “Intermediário”, e insignificante no trecho “Final”, e estão contemplados nos valores médios apresentados na climatologia de ondas elaborada por SOARES (2016).

Segundo MUEHE e VALENTINI (1998), a incidência de ondas com altura significativa (H_s) igual a 2 metros ao Sul da Ilha Guaíba é comum. A Ilha Guaíba está geograficamente

localizada entre o trecho “Inicial” e o trecho “Intermediário” do CN de acesso ao Porto de Itaguaí-RJ.

Para a aplicação da metodologia japonesa, tão importante quanto o parâmetro “Hs” da onda incidente é o seu período “Tp”. Analisando a climatologia de ondas produzida por SOARES (2016), presente da Tabela 3, observa-se que o período “Tp” de 14,1 segundos está presente com significativa frequência de ocorrência associada a ondas oriundas do quadrante SO-S-SE.

Embora estejam presentes na climatologia períodos “Tp” ainda maiores que 14,1 segundos, assumiu-se que esse seria um valor-limite adequado a servir como “Critério de Projeto”, permitindo assim a quantificação do “requisito de UKC” que pudesse ser associado à seleção da presente “Profundidade de Projeto”, válida para os três trechos do CN.

Quando $\lambda \geq 0,45 \times L_{pp}$, ou seja, quando $\lambda \geq 144$ metros, o requisito para que o cômputo do parâmetro “Z2”, segundo a metodologia japonesa, é cumprido. Numericamente, grandes magnitudes podem ser computadas para o parâmetro “Z3”, mesmo quando o comprimento da onda incidente (λ) é inferior a 144 metros ($\lambda < 144m$).

A Tabela 5 consolida os valores máximos possíveis para o comprimento de onda incidente, que poderiam ser computados pelo programa “J-Fairway (2013)”:

Tabela 5: Maior comprimento calculável para a onda incidente “λ” varia em função da profundidade “Dout” e do maior período de onda incidente “Tp”

Maior "λ" calculado, por trecho selecionado do CN, para "Tp" = 14,1 s (0,45 x Lpp = 144m)		
Inicial Dout = 19m	Intermediário Dout = 15m	Final Dout = 11m
λ1 (m)	λ2 (m)	λ3 (m)
180,02	162,27	140,95

Considerando a incidência de uma onda com período “Tp” máximo igual a 14,1 segundos, estabelecida como “Critério de Projeto” e a profundidade “Dout” inferida, o maior valor possível para o comprimento da onda incidente “λ” para o trecho “Inicial” foi igual a 180,02 metros ($\lambda \leq 180,02$ m).

Para o trecho “Intermediário”, o máximo valor calculável para o comprimento da onda incidente “λ” foi igual a 162,27 metros ($\lambda \leq 162,27$ m). Já para o trecho “Final”, o máximo valor calculável para o comprimento da onda incidente “λ” foi igual a 140,95 metros ($\lambda \leq 140,95$ m). Levando em conta que o método japonês não considera significativo o cômputo do parâmetro “Z2” para valores “λ” inferiores a 144 metros, então o parâmetro “Z2” nunca pôde considerado significativo nos cálculos realizados, e passa ter valor igual a zero ($Z_2 = 0$).

(4) **Uso adicional de nível de maré astronômica:** A vantagem de altura da maré astronômica foi considerada dispensável.

(5) **Restrições de velocidade:** Quanto maior a velocidade relativa (navio-água), maior o efeito *squat* esperado. Sendo assim, o máximo efeito *squat* sempre é observado na maior velocidade relativa, entre o navio e a água. Quando a velocidade da corrente possui baixa magnitude então se pode afirmar que a magnitude desta velocidade é basicamente modulada pela velocidade do navio (V_s).

Sabe-se que o emprego de maiores velocidades é um instrumento imprescindível na garantia da mínima manobrabilidade do navio, permitindo a compensação de efeitos ambientais sobre a sua navegação, uma vez permite melhor manobrar o navio de modo a se manter na derrota correta, compensando influências de agentes externos, tais como ventos e/ou correntes.

Desta forma, as condições de projeto estão associadas a restrições de velocidade do navio e representam as velocidades limites para seu trânsito no trecho. Foi assumida que a máxima velocidade admissível do navio é de 12 nós em quaisquer trechos do canal de navegação de acesso ao Porto de Itaguaí.

Foi calculado o Número de Froude de profundidade “Fn_h” à luz desta velocidade limite ($V_s = 12$ nós) e da profundidade (H) indicada pra cada perfil batimétrico representativo dos trechos “Inicial”, “Intermediário” e “Final”.

A Tabela 6 apresenta o valor do parâmetro “Fn_h” calculado para velocidades do navio “ V_s ” até 16 nós, para cada trecho analisado. Observa-se na tabela o maior valor calculado.

O valor do parâmetro “Fn_h” sempre ficou abaixo de 0,7 ($F_{nh} < 0,7$). Desta forma, não foram identificadas limitações relacionadas a esse parâmetro para aplicação das quatro fórmulas empíricas estimativa para o máximo “efeito *squat*” pré-selecionadas.

Tabela 6: Número de Froude de Profundidade (Fn_h) para cada entrada discreta de velocidade “Vs” do navio e profundidade (h) relativa a cada trecho do canal.

Trecho "Inicial"			Trecho "Intermediário"			Trecho "Final"		
Vel (nós)	S(m) p/ h=	Fn _h	Vel (nós)	S(m) p/ h=	Fn _h	Vel (nós)	S(m) p/ h=	Fn _h
	22,5			17,4			17,4	
1	0,00	0,03	1	0,01	0,04	1	0,01	0,04
2	0,02	0,07	2	0,02	0,08	2	0,03	0,08
3	0,04	0,1	3	0,05	0,12	3	0,06	0,12
4	0,07	0,14	4	0,09	0,16	4	0,11	0,15
5	0,11	0,17	5	0,14	0,2	5	0,17	0,20
6	0,16	0,21	6	0,21	0,24	6	0,24	0,24
7	0,22	0,24	7	0,29	0,28	7	0,33	0,28
8	0,29	0,28	8	0,38	0,32	8	0,44	0,32
9	0,37	0,31	9	0,49	0,35	9	0,57	0,35
10	0,46	0,35	10	0,62	0,39	10	0,71	0,39
11	0,56	0,38	11	0,76	0,43	11	0,88	0,43
12	0,68	0,42	12	0,93	0,47	12	1,07	0,47
13	0,81	0,45	13	1,12	0,51	13	1,28	0,51
14	0,96	0,48	14	1,33	0,55	14	1,53	0,55
15	1,13	0,52	15	1,58	0,59	15	1,82	0,59
16	1,32	0,55	16	1,87	0,63	16	2,15	0,63

(6) **Margem de Segurança:** o fundo do Canal de Navegação foi considerado duro (rochoso) e compacto. Desta forma, tal como sugerido em ABNT (1995) e PIANC (2014), foi estabelecida que esta margem deveria ser minimamente igual a 1 metro.

Tal aspecto é justificado pelo notório conhecimento da existência de um grande afloramento rochoso, localizado no trecho “Final” do CN, entre as boias nº 5 e nº7. Assumiu-se como premissa que a taxa de assoreamento é insignificante, devido à falta de informações disponíveis.

A Tabela 7 apresenta os valores limites a cada um dos parâmetros indicados:

Tabela 7: Condições de projeto assumidas

Condições de projeto assumidas (somente aquelas podem afetar a avaliação da Profundidade de Projeto)	Trecho do canal		
	Inicial	Intermediário	Final
Magnitude das correntes	inferiores a 1 m/s (na superfície)		
Altura significativa das ondas (Hs)	<= 2 metros	<= 1 metros	insignificante
Período de Pico (Tp) das ondas incidentes (s)	<= 14.1 segundos		
Direção de incidência direta das ondas de swell	SO-S-SE	SO	QQ
Uso adicional de nível de maré astronômica (m)	0 (não é necessário)		
Condições de tráfego	via única (para o NP selecionado)		
Restrições de velocidade do navio	inferiores a 12 nós (na superfície)		
Margem de segurança ou FLAQ mínima aceitável	1 metro (fundo rochoso)*		

* considerando o fato de qualquer toque no fundo ser inaceitável, haja vista que o mapeamento do solo no fundo é insuficiente para bem caracterizá-lo espacialmente, em sua totalidade.

3.5. O Navio de Projeto

Para realização do cômputo do parâmetro “PP calculada” foram definidas características básicas do Navio de Projeto, também designado Navio-Tipo. Em tese, todas as dimensões do Canal de Navegação foram dimensionadas e projetadas para atendê-lo. Com o Navio de Projeto e a Profundidade de Projeto claramente definidos é possível verificar a adequação entre esses dois parâmetros.

As características geométricas e informações do Navio de Projeto selecionado encontram-se descritas na Tabela 8. Elas foram utilizadas como parâmetros de entrada, na realização de estimativa dos fatores selecionados para composição do “requisito de UKC”.

Tabela 8: Dados do “Navio de Projeto selecionado” inspirados no Navio “HYUNDAI LOYALTY”

Dados característicos do Navio de Projeto ou Navio-Tipo	
Comprimento do navio entre perpendiculares (Lpp)	320 metros
Comprimento total (LOA)	339,62 metros
Boca (B)	45,6 metros
Calado máximo estático (T)	14,5 metros
Capacidade de Containers	8562 TEU
Coefficiente de Bloco (CB)	0,72
Deslocamento máximo	152340,5 m ³

Nesta pesquisa assumiu-se que o Navio de Projeto selecionado possui o mesmo porte e dimensões do navio porta-contentores “Hyundai Loyalty”, pertencente à classe “Super Post Panamax” ou 5ª geração de navios deste tipo, apresentado na Figura 22. Cabe mencionar que o navio recentemente mudou de nome, passando a ser denominado “KOTOR BAY”



Figura 22: Foto de uma manobra real de atracação do Navio “HYUNDAI LOYALTI” no Terminal de Contêineres (TECON) do Porto de Itaguaí-RJ. Fonte: internet¹²

Este navio possui formato de popa achatada, em formato travessão, conhecida como “*Transom Stern*”. Tal formato diverge da tradicional forma elíptica, característica de navios deste tipo mais antigos e é encontrado nos mais recentes navios porta-contentores construídos.

Embora os navios possam navegar plenamente carregados (*fully loaded*), parcialmente carregados ou leves (*ballast conditions*), a condição estática de “pleno carregamento”, no verão, e em água salgada, em águas parelhas (ou seja, sem *trim* ou *even keel*) será a condição de referência para o estabelecimento do valor do calado estático máximo (T) do Navio de Projeto selecionado.

¹² Foto extraída do site <https://portosenavios.com.br/noticias/portos-e-logistica/sepetiva-tecon-se-prepara-para-o-novo-momento-da-navegacao>). Acesso ao site em 16AGO2018.

4. DESENVOLVIMENTO

A proposta neste trabalho para avaliação da Profundidade de Projeto fez uma análise comparativa entre fatores de segurança. Os fatores de segurança são representados pela composição de um parâmetro designado como “PP calculada”, servindo como um valor de referência de uma profundidade (h), que permitiu distinguir fatores de segurança, em diferentes trechos e para diferentes trânsitos do Navio Tipo, parametrizando assim a segurança advinda da Profundidade de Projeto selecionada.

Os fatores de segurança calculados são fatores multiplicativos ao Calado Estático Máximo (T) do Navio de Projeto selecionado, e podem ser calculados da seguinte forma:

$$(27) \quad \boxed{\text{Fator de segurança} = \frac{\text{"requisito de UKC"} + T}{T}}$$

Para cálculo do “requisito de UKC”, foram apuradas as contribuições dos fatores máximo “efeito *squat*”, com uso da formulação matemática de HUUSKA-GULIEV (1976), e o fator movimento vertical induzido por ondas, por meio da aplicação da metodologia japonesa, ambos descritos em PIANC (2014).

As estimativas foram realizadas à luz das “Condições de Projeto” assumidas; da análise das profundidades existentes na carta náutica oficial da DHN e da análise de três seções transversais submersas idealizadas, obtidas a partir de três diferentes perfis batimétricos pré-selecionados do CN de acesso ao Porto de Itaguaí.

Assumiu-se que os três perfis batimétricos e as respectivas seções transversais submersas representam adequadamente boa parte de três diferentes segmentos ou trechos retilíneos do CN: “Inicial”; “Intermediário” e “Final”, de onde tais perfis batimétricos foram selecionados.

Convencionou-se que o trecho designado como “Inicial” representa o seu trecho mais externo e desprotegido e, portanto, o mais sujeito à influência da incidência de *swell*. É onde se espera obter, naturalmente, o maior “requisito de UKC” em todo o CN.

Como dados de entrada, além das características do Navio de Projeto e dos Critérios de Projeto assumidos, considerou-se que a informação da Profundidade de Projeto se encontra presente, registrada e cartografada no interior dos limites geográficos do CN, em termos de uma “Profundidade Nominal”, conferindo assim ao navegante a informação de que há um compromisso permanentemente na manutenção de uma cota batimétrica mínima ao longo de todo um mesmo trecho ou segmento do referido CN, por meio de obras de dragagem.

Foi utilizada uma abordagem determinística *bottom-up* de composição do parâmetro “PP calculada”, identificada como mais adequada à ótica da segurança da navegação, iniciada por uma margem de segurança mínima, designada como “FLAQ”, associada ao tipo de fundo.

O cálculo dos fatores de segurança permitiu a comparação da segurança advinda de cada seleção da Profundidade de Projeto entre si, para o trânsito de entrada ou saída do NP selecionado, disponibilizando assim uma referência numérica para a segurança.

Nas Figura 23 e Figura 24, duas seções transversais submersas idealizadas idênticas são representadas. Elas indicam duas diferentes percepções quanto a níveis de segurança, com base na aplicação de coeficientes multiplicativos ao valor do calado estático máximo (T) do Navio de Projeto. As diferentes cores de fundo (vermelho, azul e verde listrado) representam diferentes profundidades referenciadas ao “Zero DHN” e facilitam a comparação entre as duas ilustrações.

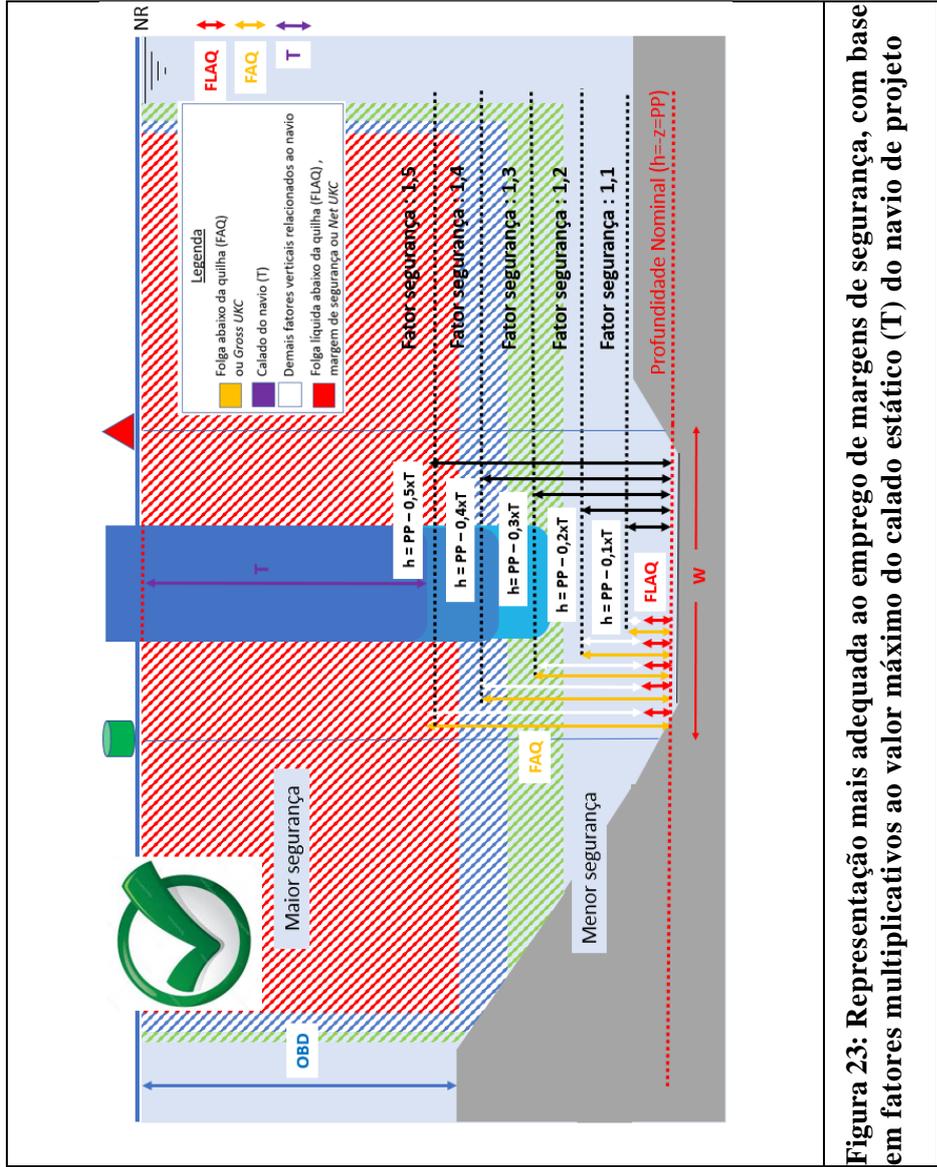
Comparando a Figura 24 com a Figura 23 e colocando-as lado a lado, é possível demonstrar o potencial prejuízo de uma percepção equivocada quanto à aplicação de fatores de segurança. Destarte, poder-se-ia dizer que, em ambas as figuras, o aumento de fatores de segurança está associado ao aumento do valor relacionado ao cômputo de uma profundidade.

Inicialmente, deve-se ter em mente que a FLAQ, enquanto margem de segurança, sempre faz parte da composição do *UKC*. A possibilidade de a FLAQ e o *UKC* serem inversamente proporcionais não é razoável. A Figura 24 demonstra que o emprego de menores fatores de segurança resultaria em um maior *UKC*.

A Figura 24, embora possa inicialmente parecer uma representação mais lógica, não é correta. O aumento do fator de segurança representa o aumento da “Profundidade de Projeto”; indica o aumento da Folga Líquida Abaixo da Quilha (FLAQ), o qual é ilustrado com setas na cor vermelha, e indica a diminuição do “*UKC*”, que é ilustrado com setas na cor amarela.

A Figura 23 está mais adequada à abordagem “*bottom-up*” de composição dos fatores relacionados à verificação quanto a uma profundidade mínima. O cômputo é iniciado na cota vertical “z” relativa à “Profundidade Nominal” de determinado trecho do CN, a partir da qual todos os fatores pré-selecionados para a composição do “requisito de *UKC*” são adicionados “de baixo para cima”.

Na ilustração da Figura 23, observa-se que o **aumento do fator de segurança** representa o **aumento do valor da “PP calculada”**. Além disso, também representa o **aumento do *UKC***, o qual é indicado pelas setas de cor amarela, enquanto o valor da **FLAQ permanece constante**, sendo indicado pela seta na cor vermelha.



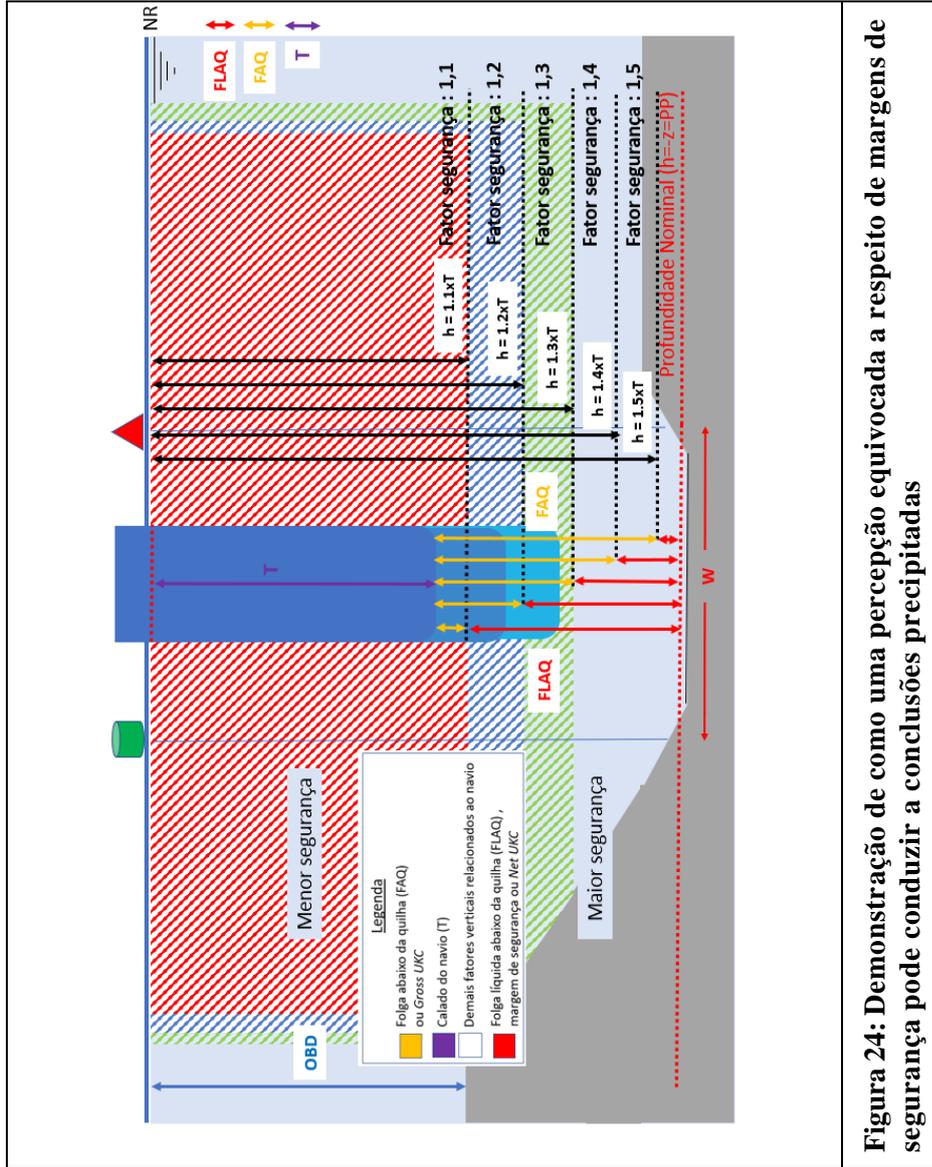


Figura 24: Demonstração de como uma percepção equivocada a respeito de margens de segurança pode conduzir a conclusões precipitadas

4.1. Os fatores selecionados

A “PP calculada” foi parametrizada por dois fatores macro: o calado máximo estático (T) do Navio de Projeto selecionado e o “requisito de *UKC*”. Para o cômputo do “requisito de *UKC*” foram considerados os principais fatores identificados: o máximo “efeito *squat*” e o máximo movimento vertical induzido por ondas. A velocidade do navio, por sua vez, representa significativo impacto na quantificação desses dois fatores.

Além disso, a introdução de uma margem de segurança igual a 1 metro representa as incertezas relacionadas ao tipo de fundo, uma vez que é notório o conhecimento de que há afloramentos rochosos dentro dos limites do CN. A presença de um fundo duro ou rochoso reforça a necessidade da aplicação de margens mínimas de segurança, já que o toque no fundo foi considerado inaceitável.

A seleção dos fatores baseou-se nos fatores descritos em USACE (2006, V-5-12). Adicionalmente, foi incluído o fator designado como “Contribuição desfavorável da maré meteorológica” como forma de contemplar fatores relacionados à água de sinal negativo afetos a um possível subelevação do nível do mar, que potencialmente poderia “cancelar” o efeito de um pequeno nível de maré astronômica prevista.

A relação dos fatores relacionados ficou a seguinte:

- Margem de segurança;
- “Efeito *squat*”;
- Resposta às ondas;
- Efeito de água doce;
- Condição desfavorável da maré meteorológica;
- Calado estático Máximo (T).

Foi utilizada uma regra estática de composição determinística dos fatores selecionados para o cômputo do “requisito de *UKC*” e consequentemente para a “PP calculada”. A Figura 25, inspirada na ilustração da p. V-5-12 de USACE (2006), ilustra esses fatores:

Metodologia da análise proposta: abordagem “bottom up”

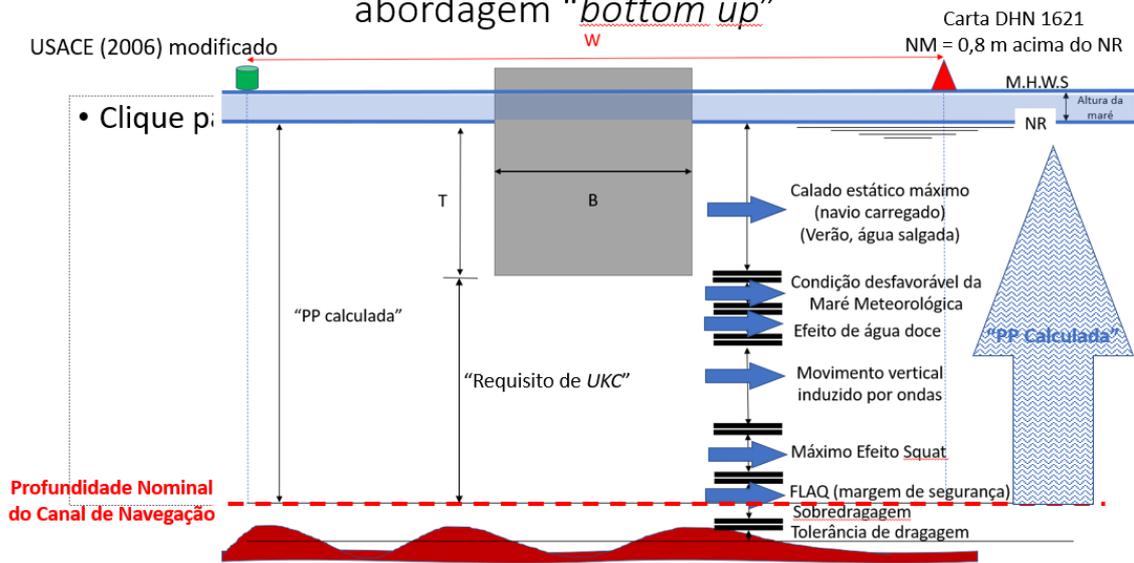


Figura 25: Fatores componentes do parâmetro “PP calculada” e a composição do “requisito de UKC”. Fonte: elaboração própria

Normalmente, o cômputo dos fatores que parametrizam a profundidade navegável é realizado “de cima para baixo”, numa abordagem designada como “top-down” de composição da profundidade (h) (PIANC, 2017).

A cota inicial “z = 0” nível de referência para o cômputo da profundidade (h).

Abordagem “TOP-DOWN” de cômputo dos fatores



Nível datum: z = 0 (NR da Carta Náutica)

PIANC (2017) sugere a utilização de uma abordagem “bottom-up” para realizar o cômputo desses fatores. Nesta abordagem, o nível de referência deixa de ser a superfície da água e passa a ser uma cota de referência sob a água, mais próxima e representativa do fundo do CN.

Esta cota passaria a ser uma nova referência, que em tese permitiria a aplicação de uma regra dinâmica para a composição da profundidade, mas que será utilizada como forma de verificar a adequabilidade da seleção da Profundidade de Projeto, parametrizando com fatores de interesse à segurança da navegação.

Nível *datum*: $z = -$ “PP selecionada”



Abordagem “**BOTTOM-UP**” de cômputo dos fatores

Observa-se que PIANC (2017, p.47), ao apresentar a abordagem “*bottom-up*” de composição de fatores, ilustra a composição do fator “*tidal residual fall*” no *UKC*, que analogamente à Figura 4, retrata um fator relacionado ao nível da água”, porém de sinal invertido (negativo).

Além disso, sob a nova abordagem, maior relevância é atribuída ao fator “Margem de Segurança”, pois ele passa a ser o primeiro, e não o último, fator a ser computado no âmbito dos fatores selecionados que integram o “requisito de *UKC*”, sendo a partir de então designado na aplicação desta metodologia como Folga Líquida Abaixo da Quilha (FLAQ).

A FLAQ pressupõe a necessidade de aplicação de uma mínima margem de segurança, representando a menor distância vertical de qualquer parte das obras vivas do navio aceitável em relação à cota vertical (z) referente à Profundidade Nominal do CN.

Será considerada uma condição de carregamento plena do Navio de Projeto, representada pelo seu calado máximo estático (T), cujo valor também é utilizado como dado de entrada para realizar a quantificação individual dos fatores componentes do “requisito de *UKC*”, revelando-se esta como uma limitação geral à metodologia utilizada.

Os fatores componentes do “requisito de *UKC*” selecionados para esta parametrização sugerida, observando a abordagem determinística de composição “*bottom-up*”, foram os seguintes:

(a) FLAQ (margem de segurança)

Assumiu-se como premissa que o fundo no Canal de Navegação de acesso ao Porto de Itaguaí é duro (rochoso) e que a taxa de assoreamento é desconhecida, sendo o fundo do Canal de Navegação coberto por areia média e fina com grande disponibilidade na região. Isto significa que o toque no fundo não pode ser admitido.

A FLAQ mínima aceitável foi pré-definida e assumida como sendo igual a 1 metro, pois se considera que a severidade das consequências de qualquer tipo toque seja inaceitável, além de indicativa de uma folga abaixo da quilha insuficiente para o trânsito do navio por meios próprios.

(b) Máximo “efeito *squat*”

De modo geral, toda e qualquer formulação matemática empiricamente formulada para a estimativa do fator máximo “efeito *squat*”, citada em PIANC (2014), assume que o NP sempre navega em condição de pleno carregamento. Esta abordagem não é conservadora, mas é comum a todas as formulações matemáticas empiricamente desenvolvidas para estimar o “efeito *squat*”, sendo considerada adequada ao propósito definido neste trabalho.

Esta condição, em teoria, proveria a melhor condição de estabilidade da manobra do navio em trechos de manutenção da rota, ou seja, em trechos retilíneos do Canal de Navegação (CN), que inequivocamente permitiria que o navio sempre navegasse exatamente sobre o centro do CN, isto é, em condição minimamente sujeita aos “efeitos de banco” e ao “efeito das margens”, o que na prática raramente é uma realidade.

O “efeito *squat*” depende de uma série de fatores, mas é fundamental que a área da seção transversal submersa idealizada seja calculada. Para isso foram pré-selecionados e analisados três diferentes perfis batimétricos, de modo a obter a geometria idealizada correspondente a cada trecho do CN.

Seguindo a recomendação da PIANC (2014, p.42), uma ou mais formulações matemáticas devem ser comparadas e examinadas para obter uma estimativa razoável do máximo efeito *squat*. No capítulo III, foi apresentada a importância da avaliação e consideração do grau de restrição.

A formulação de HUUSKA-GULIEV (1976) foi selecionada para representar o valor de “S (m)” pois cumpre todas as orientações acima e satisfaz as limitações de emprego e a aplicação a canais dos tipos idealizados. HUUSKA-GULIEV (1976) é considerada uma das fórmulas mais complexas recomendadas pela PIANC (2014).

A magnitude do efeito foi função direta da velocidade do navio (V_s), do tamanho da área da seção transversal submersa “ A_c ”, do seu fator de bloqueio (S) e o grau de restrição definido pelo parâmetro “ h_T/h ”, uma vez que a formulação matemática escolhida para compor esta estimativa foi a formulação de HUUSKA-GULIEV (1976). Foi assumido uma velocidade máxima “ V_s ” de trânsito no CN permitida ao navio igual a 12 nós.

As estimativas produzidas por outras três formulações matemáticas indicadas em PIANC (2014) também são apresentadas, apenas para efeito comparativo das estimativas: ICORELS (1980), YOSHIMURA (1986) e BARRASS (2006).

(c) Movimento vertical induzido por ondas “Z(m)”

Condição diferente a utilização do calado estático máximo (T) como dado de entrada para realização desta estimativa não é admitida pela metodologia japonesa. A condição de pleno

carregamento e máximo calado estático representa, em termos de possíveis amplitude de movimento de *roll*, uma situação conservadora.

Quando o navio está lastreado ou menos carregado, seu período natural de movimento *roll* tende a ser maior. Como consequência, o mínimo requisito para que o parâmetro “Z₃” passasse a ser significativo ao cômputo ficaria maior e seria mais dificilmente alcançado, exigindo assim parâmetros existentes nas “Condições de Projeto” mais abrangentes e/ou menos frequentes.

Estabelecer uma faixa para possíveis valores para os ângulos de incidência (ψ) em relação à proa da embarcação, interpolando o resultado para ângulos intermediários ($\psi = 15^\circ$; 45° ; 75° ; 135° ; e 165°), os quais poderiam produzir os maiores valores para “Z(m)”, foi a melhor abordagem encontrada para ampliar o leque de discretização de cálculos estimativos para o parâmetro “Z₃” uma vez que estes independem das sete funções RAO padronizadas existentes na metodologia, já descritas.

(d) Efeito de água doce

O calado máximo do navio aumenta de 2 a 3% em água mais doce, ou seja, mais próximo ao porto. Este aumento do calado somente poderia ser observado no trânsito de entrada, uma vez que seria natural dizer que é esperado que dentro do estuário a densidade da água seja menor do que a densidade da água do mar no oceano, mais próxima à embocadura do estuário.

O valor atribuído ao fator foi igual a 0,44 metros (ou 44cm), o que corresponde a 3% do valor do calado estático máximo do NP selecionado, que é de 14,5 metros. Pela razão exposta acima, esse fator somente foi aplicado ao cômputo da “PP calculada” para trânsitos de entrada no CN.

(e) Condição desfavorável de maré meteorológica

Marés meteorológicas negativas podem, inclusive, ser observadas em condições rotineiras de navegação, associadas a aparente bom tempo.

A previsão de certas colunas de água, que contam com a adição do nível astronômico às profundidades cartografadas, pode não se confirmar. Quando a componente não astronômica do nível de maré se iguala ou supera a magnitude da componente astronômica, então o potencial uso da vantagem de determinado nível de maré astronômica não se concretiza e pode, inclusive, ser totalmente anulado.

MELO FILHO (2017) indicou que a localização e o tempo de permanência de uma Alta Pressão no Atlântico Sul podem produzir eventos de significativa subelevação do nível do mar. Anualmente, tal evento é mais frequentemente observado nos meses de agosto e setembro e

induz ventos tipicamente oriundos de NE sobre o litoral S/SE, sendo associados a cavados no continente (centros de baixa pressão atmosférica).

Portanto, uma possível contribuição negativa da maré meteorológica foi incluída e a esse fator foi atribuído o valor 0,4 metros (ou 40 cm), válida para tanto o trânsito de entrada como para o trânsito de saída.

4.2. Análises iniciais e cômputo de parâmetros de interesse

A extensão do Canal principal de Navegação de acesso ao Porto de Itaguaí foi dividida em um total de 22 segmentos, sequencialmente numerados, iniciando a contagem pelo segmento que se encontra mais próximo ao mar e a encerrando pelo segmento imediatamente anterior à Baía de Evolução de acesso ao Terminal de Contêineres (TECON).

A divisão dos segmentos foi feita com base na disposição atual de pares consecutivos de boias luminosas, longitudinalmente dispostas ao longo do canal de acesso principal ao Porto de Itaguaí e permitiu regionalização da análise de diferentes trechos do canal de navegação, com base na seleção de perfis batimétricos representativos do mais alto grau de restrição que pôde ser identificado.

As três seções transversais submersas idealizadas associadas a cada um dos perfis batimétricos representativos do trecho “Inicial”, “Intermediário” e “Final” foram qualificadas como sendo do tipo “restrito (R)” devido ao significativo grau de restrição identificado, à luz do valor “Dout”, da região onde esse perfil foi selecionado.

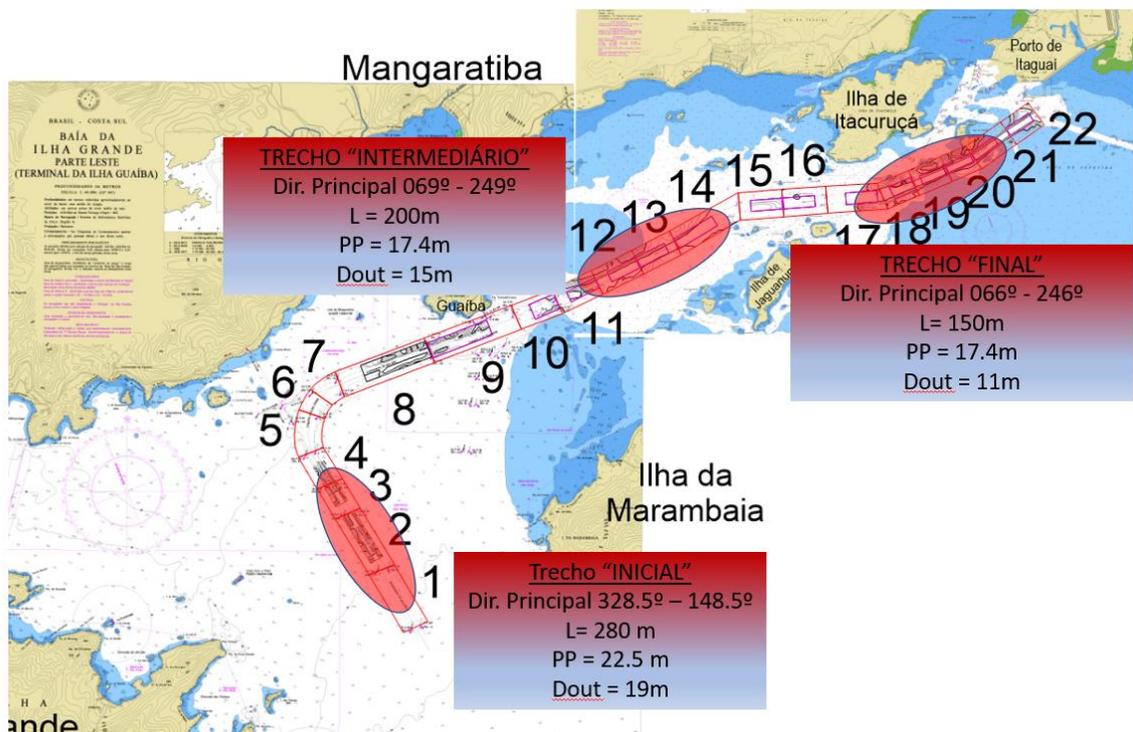


Figura 26: Identificação e localização geográfica dos três trechos, nas cartas náuticas 1621 e 1623. Fonte: elaboração própria

Diversos perfis batimétricos interiores aos 22 segmentos do CN foram analisados. A análise espacial de perfis relativamente próximos demonstrou grande flutuação nas profundidades dos bancos laterais submersos, em função da heterogeneidade batimétrica encontrada.

O tamanho da área “Ac” representativa de cada trecho foi estimado com base na pré-seleção de perfis batimétricos de significativo grau de restrição. O perfil batimétrico pré-selecionado, representativo de cada trecho, representa um dos mais altos graus de restrição obtíveis dentro deste mesmo trecho ou segmento, de onde foi selecionado.

Apenas três perfis, localizados nos três trechos indicados na **Erro! Fonte de referência não encontrada.**, foram selecionados para a correlação a uma área transversal submersa idealizada e obtenção de seus parâmetros geométricos, necessários ao seu cômputo individual de sua área. A **Erro! Fonte de referência não encontrada.** apresenta esses perfis. As cotas negativas (z) são referenciadas ao NR das cartas náuticas 1621 e 1623, da DHN:

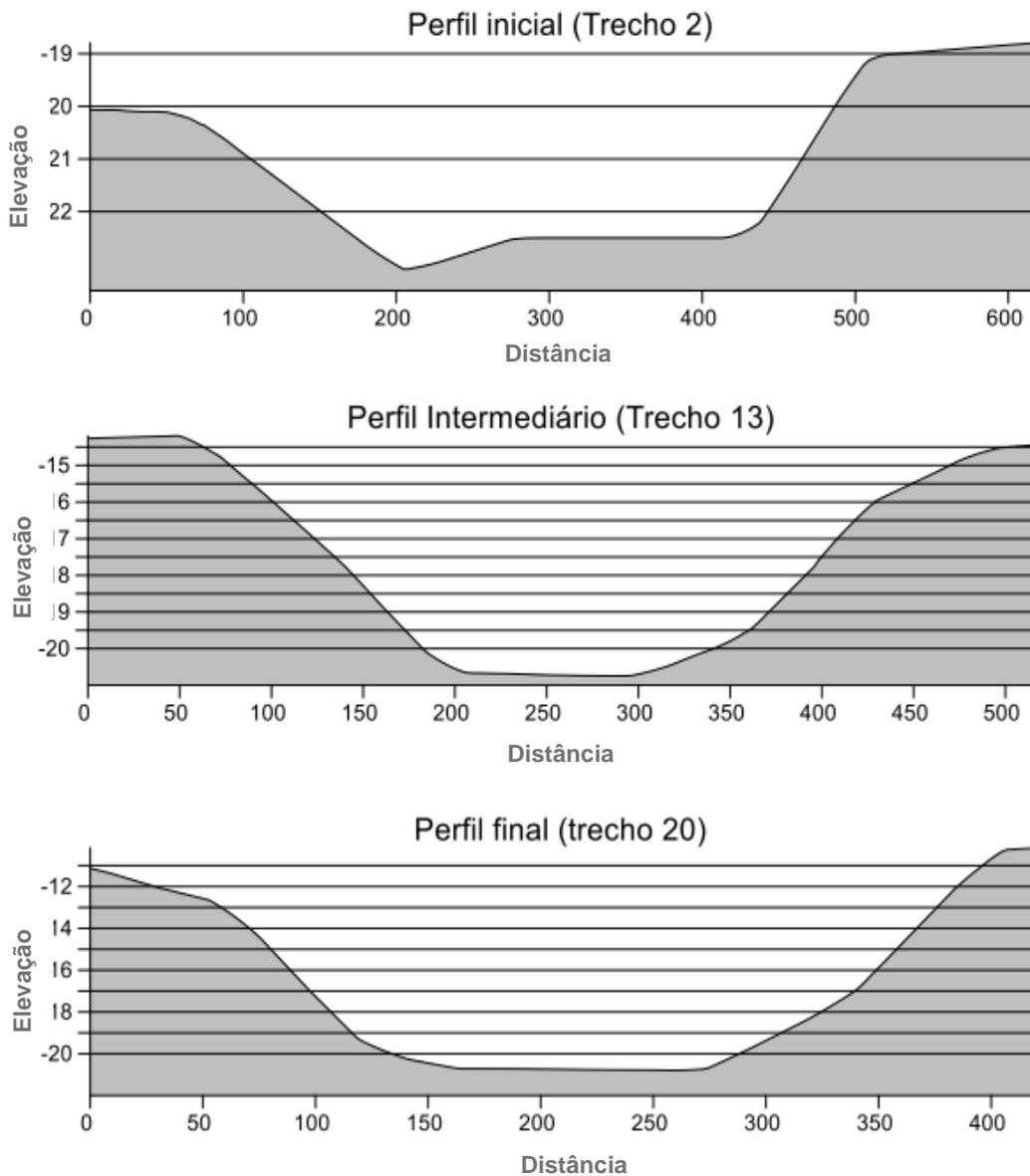


Figura 27: Perfis batimétricos selecionados, representativos de grande parte dos segmentos do canal de acesso ao Porto de Itaguaí (trechos 2 - “Inicial”, 13 - “Intermediário” e 20 - “Final”)

Inicialmente, as larguras das seções retas selecionadas, indicadas na **Erro! Fonte de referência não encontrada.**, variaram entre 430 e 620 metros em torno do eixo central do canal de navegação.

Posteriormente, conforme demonstrado na figura, foi necessário aumentar essa largura, pois o topo dos bancos submersos não identificava adequadamente as cotas (z) referentes à profundidade média imediatamente externa ao CN ($z = -D_{out}$), que haviam sido previamente identificadas para cada um dos trechos.

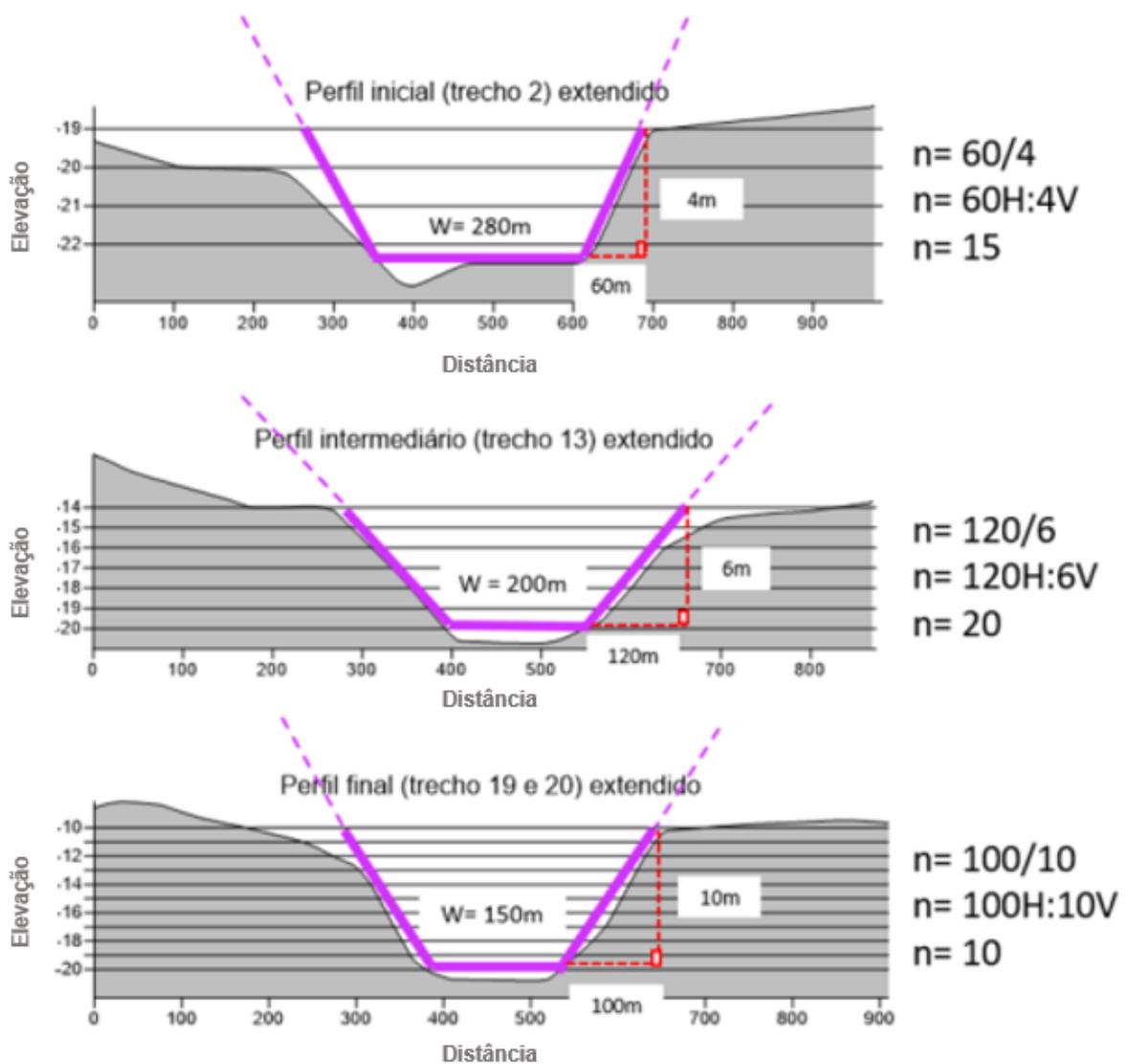


Figura 28: Perfis batimétricos, com largura de seção reta igual a 1000 metros, Identificação gráfica da Largura “W” e cálculo da acividade “n” do banco submerso. Fonte: elaboração própria.

Identificou-se que a largura da seção reta ideal deve ser igual ou superior ao maior valor calculado para o parâmetro “W_{top}”. Concluiu-se que a largura da seção reta deveria possuir largura igual ou superior a 1.000 metros, o que seria suficiente para correlacionar tais perfis a uma seção transversal submersa idealizada, conforme demonstra a **Erro! Fonte de referência não encontrada.**

Nos perfis batimétricos presentes na **Erro! Fonte de referência não encontrada.** foi possível identificar o valor da máxima profundidade média (H). No trecho “Inicial” a profundidade média indicada foi de 23 metros ($H = 23m$); no trecho “Intermediário” foi igual a 21 metros ($H = 21m$); e no trecho “Final” foi igual a 21 metros.

À luz das disposições apresentadas no item 3.3.1 desta dissertação, o valor da profundidade “H” em cada seção é fundamental ao cálculo da altura dos bancos laterais “ h_T ”, identificado na Tabela 9 como “ h_T (m) calculado”.

A Tabela 9 também apresenta a profundidade do banco lateral submerso (OBD), graficamente identificado na **Erro! Fonte de referência não encontrada.**, e designado na Tabela 9 como “OBD (m) identificado”. No trecho “Inicial”, o “OBD (m) identificado” foi igual a 19 metros; no trecho “Intermediário” foi igual a 14 metros; e no trecho “Final” foi igual a 10 metros.

Conforme previsto, o valor inferido para a profundidades “Dout” na Carta Náutica e a profundidade “OBD” obtida a partir da análise do perfil batimétrico não foram exatamente os mesmos nos trechos “Intermediário” e “Final”. Houve divergência de apenas 1 metro entre seus valores, o que foi considerado aceitável. Esta pequena diferença de 1 metro demonstra que os perfis batimétricos foram adequadamente selecionados.

Por fim, foi possível obter um valor aproximado para a razão “ h_T / h ”, onde ($h = H$). Os respectivos valores dessa razão encontrados foram arredondados para cima, de forma a se adequarem aos cinco graus de restrição pré-definidos para a aplicação da formulação de HUUSKA-GULIEV (1976), utilizado para a estimativa do fator máximo “efeito *squat*” “ $S(m)$ ”.

Tabela 9: Memória de cálculo dos parâmetros h_T e para a razão h_T / H correlacionados à inferência do parâmetro “Dout” e identificação das profundidades “H” e “OBD” nos perfis batimétricos selecionados para os três trechos considerando

$h_T = H - \text{Dout}$	Parâmetros, por trecho selecionado do CN		
	Inicial	Intermediário	Final
$h = H$ (m)	23	21	21
Dout inferido (m)	19	15	11
h_T (m) calculado	4	6	10
OBD (m) identificado	19	14	10
h_T / H calculado	0,17 (0,2)	0,29 (0,4)	0,48 (0,6)

A Figura 29 identifica visualmente todos os parâmetros de interesse que tiveram que ser calculados para realizar o cálculo do valor da área da seção transversal submersa idealizada “Ac” representativa, para cada um dos trechos do CN:

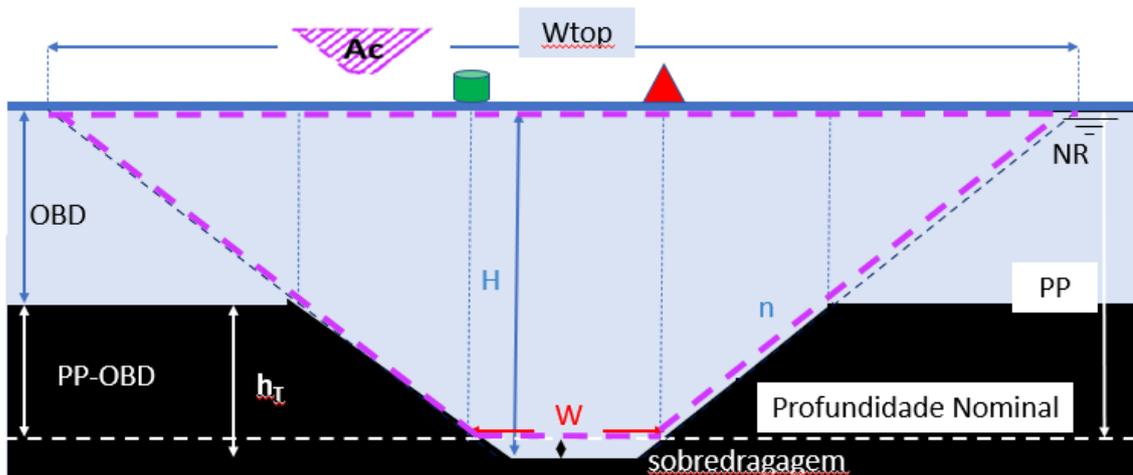


Figura 29: Representação gráfica de uma seção transversal submersa idealizada “ac” genérica e parâmetros de interesse

A Tabela 10 consolida os parâmetros obtidos a partir da análise dos três perfis batimétricos selecionados, na composição geométrica da área da seção transversal submersa idealizada “Ac” representativa dos três trechos de interesse do CN:

Tabela 10: Resumo dos parâmetros calculados necessários à aplicação da formulação de HUUSKA-GULIEV (1976) para estimativa do máximo “efeito squat”

Canal Restrito (R)	Trecho “Inicial”	Trecho “Intermediário”	Trecho “Final”
W (entrada)	280 m	200 m	150 m
W_{top} (calculada)	955 m	896 m	498 m
$h = PP$ (entrada)	22,5 m	17,4 m	17,4 m
h_T (entrada)	4 m	6 m	10 m
n (entrada)	15	20	10
Ac (calculada)	13894 m ²	9535 m ²	5638 m ²
H (prof. máx. média)	23 m	21 m	21m
h_T/H	0,17 (0,2)	0,28 (0,4)	0,48 (0,6)
$S1 = \frac{As}{Ac}$	0,05	0,07	0,11

4.2.1. Compuo do fator máximo “efeito *squat*” - “S(m)”

A Tabela 11 consolida os principais parâmetros e resultados para a estimativa para o fator máximo “efeito *squat*”, utilizando as quatro diferentes formulações matemáticas pré-selecionadas, para cada um dos trechos do CN:

Tabela 11: Principais parâmetros calculados e utilizados para estimar o fator máximo “efeito *squat*”

ENTRADAS			PARÂMETROS	TRECHO		
				Inicial	Intermediário	Final
1	Perfil batimétrico		H =	23 m	21 m	21 m
2	Características Navio de Projeto		As =	648 m ²		
1	Perfil batimétrico		Ac =	14375 m ²	13020 m ²	7560 m ²
3	Parâmetros combinados N-C		S = As/Ac =	0,05	0,05	0,09
4	Profundidade de Projeto		h = H =	23 m	21 m	21 m
3	Parâmetros combinados N-C		h / T =	1,59	1,45	1,45
5	Dout (Profundidade externa)		h _T =	4 m	6 m	10 m
3	Parâmetros combinados N-CN	Parâmetros Huuska/Guliev v (1976)	h _T / h =	0,17 (0,2)	0,28 (0,4)	0,48 (0,6)
			K ₁ =	1,39	1,49	1,59
			S ₁ = S / K ₁ =	0,032	0,033	0,054
			K _s = (7,45 x S ₁) + 0,76 =	1,00	1,01	1,16
			FÓRMULA	ESTIMATIVA MÁXIMO EFEITO SQUAT		
6	Velocidade do Navio (Vs) = 12 nós	Fnh < 0,7	ICORELS (1980) =	0,55 m	0,61 m	0,61 m
			Huuska/Guliev (1976) =	0,68 m	0,74 m	0,85 m
			Yoshimura (1986) =	0,76 m	0,81 m	0,88 m
			Barrass3 (2006) =	0,56 m	0,61 m	0,92 m

Entre os parâmetros de entrada necessários a realização dos cálculos destaca-se:

1 – O valor do parâmetro profundidade “H” e o tamanho da área “Ac” do CN obtidos a partir da análise do perfil batimétrico selecionados, assim como uma adequada correlação a uma seção transversal submersa idealizada “Ac”;

2 – O valor da área “As”, obtido pelas características de construção do Navio de Projeto (NP);

3 – O valor dos parâmetros: fator de Bloqueio (S); “h_T/h”; “K₁”; “S₁” e “K_s” necessários à aplicação da formulação de HUUSKA-GULIEV (1976); obtidos a partir das relações entre Dimensões do Navio x Dimensões do CN;

4 – O valor da Profundidade de Projeto selecionada, o qual foi assumido como sendo o valor da Profundidade Nominal, cartografada em cada trecho do CN;

5 – O valor da altura do banco submerso “h_T”, em cada área da seção transversal submersa idealizada do CN, à luz da inferência da profundidade média imediatamente externa ao CN “Dout” com base na observação das profundidades cartografadas;

6 - A velocidade máxima “Vs” de trânsito permitida ao navio, presente nos “Critérios de Projeto” assumidos.

Na Tabela 11, observa-se que, embora o trecho “Inicial” apresente um Razão de Bloqueio (S) relativamente pequena ($S= 0,05$), a altura dos bancos submersos (h_T) possui valor bastante significativo ($h_T = 4$ metros) comparada ao valor do calado máximo estático (T), representando, aproximadamente, 28% deste valor e 18% da “PP selecionada” para o trecho “Inicial” do CN.

Também é notório que o valor da altura dos bancos submersos (h_T) vai aumentando, entre o trecho “Inicial” e o trecho “Final”, respeitando a inferência feita para a profundidade média externa ao CN (D_{out}). No trecho “Final” o valor do parâmetro “ h_T ” já representa cerca de 69% do valor do calado estático máximo (T) e 58% da “PP selecionada” para o trecho “Final” do CN.

O cálculo dos parâmetros “ S_1 ” que corrige o fator de Bloqueio inicialmente calculado, considerando o efetivo grau de restrição do CN, exige o cálculo prévio do parâmetro “ K_1 ”, para canais do tipo “restrito (R)”. Para isso foi utilizada o método gráfico e cálculo polinomial, que consiste no cálculo dos seus coeficientes polinomiais desenvolvido por BRIGGS *et al.* (2006, 2016), apresentados na Figura 30:

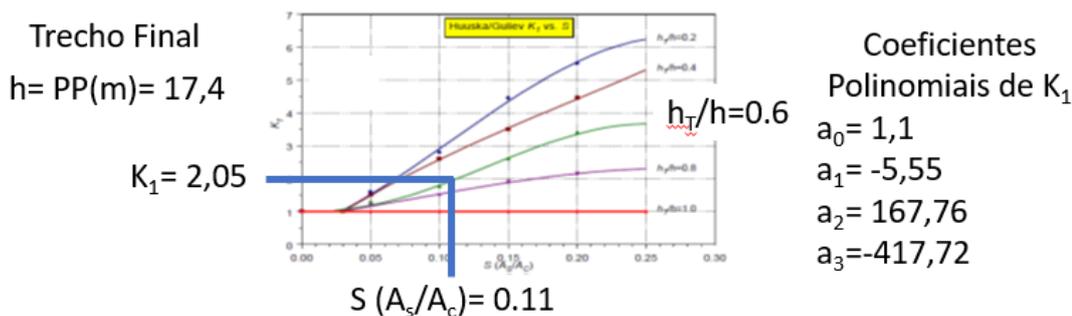
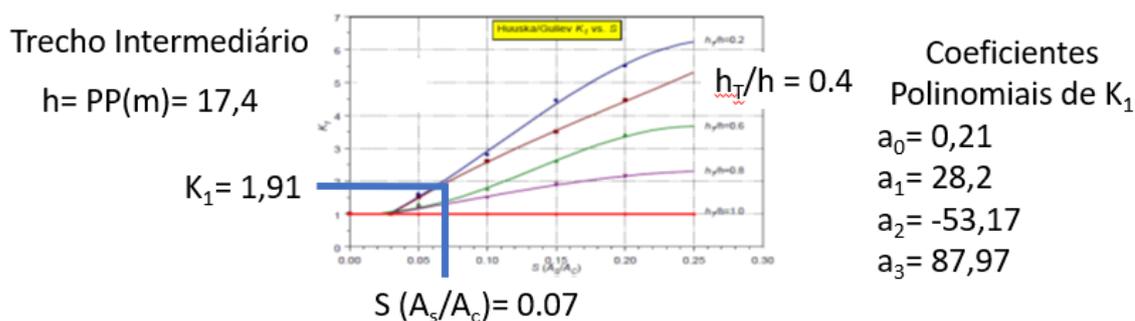
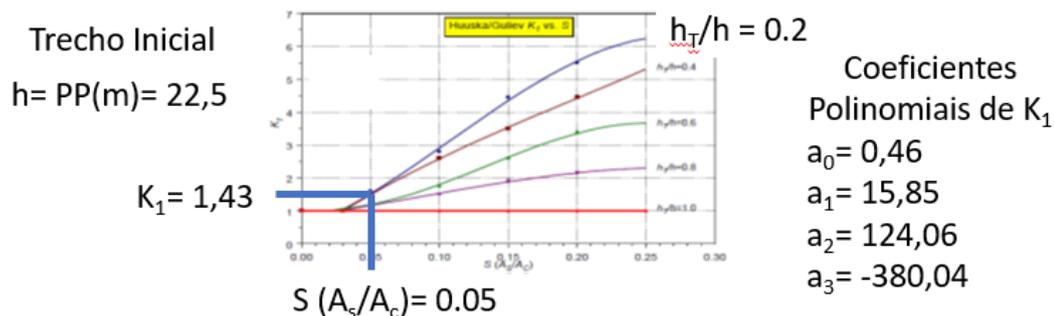


Figura 30: Método gráfico e de ajuste polinomial para obtenção do parâmetro “K1” necessário à utilização da formulação HUUSKA-GULIEV (1976)

Para os três trechos, o valor calculado para o parâmetro “S1” foi superior a 0,03 ($S_1 > 0,03$), permitindo assim o posterior cálculo do parâmetro “Ks”.

4.3. Cômputo da estimativa do fator máximo movimento vertical induzido por ondas “Z(m)”

A Figura 31 consolida os principais parâmetros de entrada utilizados pela metodologia japonesa para o cômputo do fator “Z(m)” e que são exigidos pelo software “J-Fairway (2013).

Entre os parâmetros de entrada necessários a realização dos cálculos destaca-se:

1 – As principais características de construção do Navio de Projeto:

- Classe: Navio Porta Contêiner (TEU);
- Largura total “Loa” (em metros);
- Largura entre perpendiculares “Lpp” (em metros);
- Largura da Boca “B” (em metros);

- Calado máximo estático “T (em metros);
 - Coeficiente de Bloco (Cb).
- 2 – A velocidade do navio “Vs” (em nós);
 - 3 – Os dados característicos da onda incidente: “Hs” (em metros) e “Tp” (em segundos);
 - 4 – A profundidade imediatamente externa ao CN “Dout” (em metros);
 - 5 – O ângulo de incidência da onda “ ψ ” em relação à proa do navio (em graus);
 - 6 – A Profundidade de Projeto selecionada (profundidade que se deseja verificar).

Figura 31: Tela do software “J-Fairway (2013)” utilizado para realizar o cálculo dos parâmetros de interesse na metodologia japonesa de estimativa de “Z(m)”

Um dos principais parâmetros de entrada diz respeito ao ângulo de incidência das ondas em relação à proa do navio (ψ). A proa do navio foi associada a um rumo coincidente aos rumos principais (Dir) dos trânsitos de “entrada” e “saída” do Canal de Navegação, em cada trecho avaliado, considerando que tais rumos são defasados em 180° .

Conseqüentemente, cada ângulo de incidência de onda “ ψ ”, agora relacionado ao rumo principal de entrada ou saída no navio, foi associado a uma direção de propagação (direção de origem) de uma onda de *swell*.

A Figura 32 indica, sobre as cartas náuticas 1623 e 1621, da DHN, as direções principais consideradas em cada trecho para os trânsitos de “entrada” e “saída”:

Principais rumos nos trânsitos de entrada e saída do Canal de Acesso ao Porto de Itaguaí

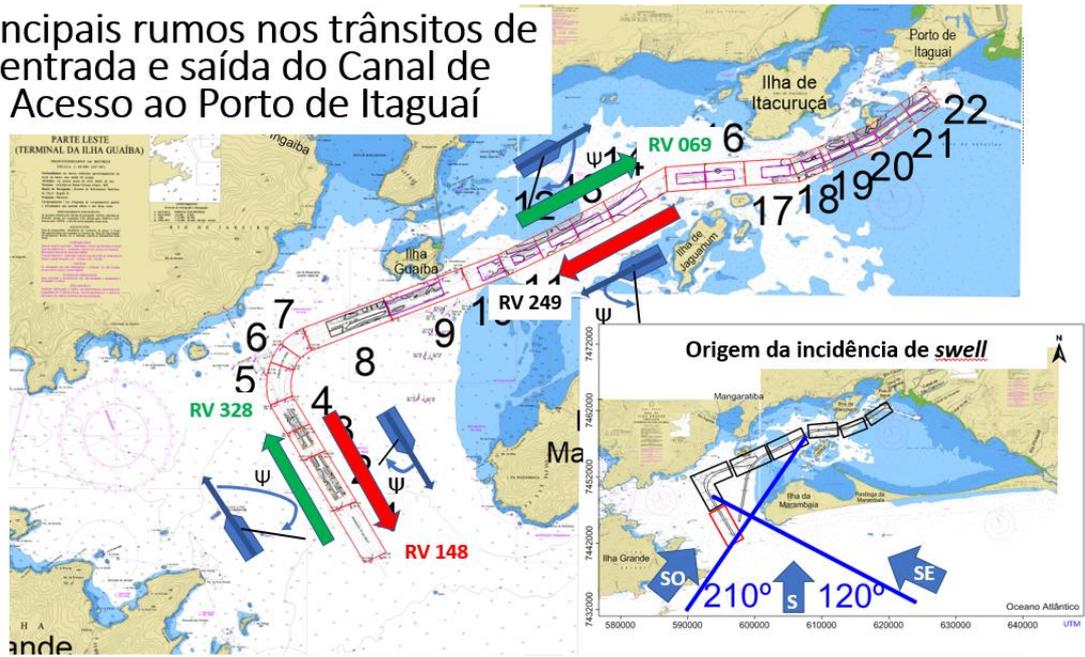


Figura 32: Principais rumos dos trânsitos de entrada e saída do CN; e principal origem das ondas incidentes de origem remota oceânica (*swell*)

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são apresentados os resultados estimativos para os fatores: o máximo “efeito *squat*” $S(m)$ e máximo movimento vertical induzido por ondas $Z(m)$, utilizando formulação HUSSKA-GULIEV (1976) e a metodologia japonesa presente em MLIT (2007), respectivamente.

Após apresentadas estas estimativas, sob uma abordagem determinística e uma composição de cima para baixo dos fatores selecionados, estes dois fatores foram adicionados aos demais para obtenção da “PP calculada”.

Por fim, o valor da “PP calculada” foi parametrizado em função do calado máximo estático (T) do Navio de projeto, de modo a obter quantitativamente um fator de segurança para os trânsitos de “entrada” e “saída” para os trechos “Inicial”, “Intermediário” e “Final” do CN.

5.1. Máximo movimento vertical induzido por ondas “ $Z(m)$ ”

Não há, aparentemente, correlação entre os cálculos dos parâmetros “ Z_2 ” e “ Z_3 ”, apenas uma dominância de valores. Por esta razão, sempre que o parâmetro “ Z_3 ” passou a ser significativo também superou o parâmetro “ Z_2 ”, passando a governar a estimativa “ $Z(m)$ ”.

Desta forma, os resultados apresentarão as estimativas para os parâmetros dominantes em cada trecho e diferente trânsito (entrada ou saída).

Considerando que o quadrante Sul é a principal origem das ondas de *swell*, então os trânsitos de “entrada” basicamente refletem ângulos de incidência: $90^\circ < \psi \leq 180^\circ$. Já trânsitos de saída basicamente refletem ângulos de incidência: $0^\circ \leq \psi < 90^\circ$.

Especificamente para o trânsito de “entrada”, além do maior valor estimado para “ $Z(m)$ ”, que serviu para a composição determinística da “PP calculada”, também foi realizada análise de sensibilidade e significância numérica para condições mais comuns e simples, que também poderiam representar significativa amplitude de movimentos verticais induzido pelas ondas, tal como:

- O menor período de onda incidente “ T_p ”;
- A menor velocidade “ V_s ” do navio; e
- Influência da velocidade do navio “ V_s ”.

A) Trânsito de entrada

No trânsito de entrada, as ondas incidem sobre o navio no setor través-popa. O aumento da velocidade do navio (V_s) determina o aumento do valor do Período de Encontro “ T_e ”, pois

neste caso pois as ondas passam a incidir no setor través-popa com menor frequência. Isto significa que neste trânsito o navio “corre” da onda.

No trânsito de “entrada”, o requisito “ $T_e = T_r$ ” é mais facilmente alcançado para:

- Mais modestas velocidades do navio “ V_s ”;
- Para ondas incidentes de menor Período “ T_p ”;
- Para maiores ângulos de incidência na faixa $90^\circ < \psi \leq 180^\circ$.

A combinação dos parâmetros acima e ainda uma grande altura significativa da onda “ H_s ” determinam o máximo valor para o parâmetro “ Z_3 ” e conseqüentemente para “ $Z(m)$ ”, uma vez que o requisito “ $T_e = T_r$ ” é alcançado. Para o “NP selecionado” o valor do parâmetro “ T_r ” calculado foi igual a 19,1 segundos.

Quando o valor calculado do parâmetro “Período Natural de *Roll* (T_r)” é superado, o movimento acoplado “*Heave + Roll*” na quilha do navio (Z_3), passa a ser significativo e, em geral, possui magnitude bem superior do que a calculada para o parâmetro “ Z_2 ”, que quantifica a expectativa de amplitude do movimento acoplado “*Heave + Pitch*” na proa do navio.

No entanto, a superação do requisito mínimo ao cômputo do parâmetro “ Z_3 ” não basta para que sua estimativa seja a maior. A combinação de um ou mais fatores acima mencionados: velocidade do Navio “ V_s ”, ângulo de incidência da onda (ψ) e período “ T_p ”, aliada à altura significativa da onda incidente “ H_s ” utilizada como parâmetro de entrada, determina a sua magnitude, e conseqüentemente a magnitude de “ $Z(m)$ ”, condicionadas aos “Critérios de Projeto” estabelecidos.

Isto quer dizer que, dependendo do ângulo de incidência (ψ) e do período (T_p) da onda incidente, um significativo movimento vertical induzido por pode ser alcançada, mesmo quando a velocidade do navio “ V_s ” é um pouco mais baixa.

Considerando que é mais comum observar a incidência de ondas com menor período “ T_p ”, maiores velocidades “ V_s ”, associadas a um outro ângulo de incidência de onda (ψ), também podem ser suficientes para produzir uma significativa magnitude de movimento induzido por ondas.

O emprego de maiores velocidades “ V_s ” no trânsito de “entrada”, de forma geral, representa a maior possibilidade de significativos valores para o parâmetro “ Z_3 ” mesmo quando o período da onda incidente “ T_p ” não seja tão grande.

A.1 TRECHO INICIAL

A.1.1 Máxima amplitude “ $Z(m)$ ”

Para uma onda incidente com altura significativa “Hs” igual a 2 metros, estimou-se que o valor do parâmetro Z(m) foi igual a 3,4 metros. Tal valor foi encontrado para uma velocidade “Vs” máxima igual a 12 nós, estabelecida como “Critério de Projeto” e um ângulo de incidência (ψ) igual a 150°, conforme demonstra a Figura 33.

Dout (m)= 19
 Vs (nós)= 12
 squat (m) = 0,71
 Hs (m)= 2

Trânsito de Entrada: trecho “Inicial” Cômputo da “PP calculada”

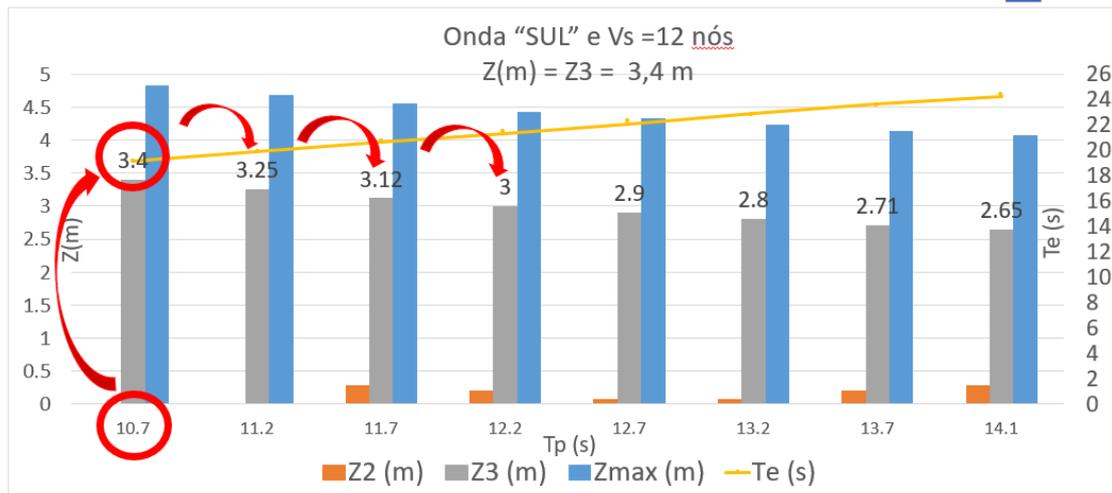
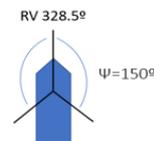


Figura 33: Máxima estimativa para movimento vertical induzido por ondas “Z(m)” = Z₃ = 3,4 metros para o trânsito de “entrada”, no trecho “Inicial”. Resultado da aplicação da metodologia japonesa. Fonte: elaboração própria

No gráfico ilustrado na Figura 33, as barras cinzas indicam as estimativas para o parâmetro “Z₃”. O maior valor calculado para o parâmetro “Z₃” e conseqüentemente para “Z(m)” foi igual a 3,4 metros, tendo sido este valor cômputo na “PP calculada. Este valor foi calculado para uma onda incidente com “Tp” igual a 10,7 segundos.

Considerando que o rumo principal do canal neste trecho inicial é 328° verdadeiros, então $\psi=150^\circ$ representa a incidência de uma onda originada aos 178° verdadeiros, indicando uma onda de origem Sul (S).

Para a região, o estudo climatológico de incidência de ondas indica uma frequência anual de ocorrência de 10,7%. Os períodos “Tp” analisados são comumente observados na região e a incidência de ondas com Hs = 2,6 m foi observada em 50% das observações climatológicas.

A.1.2 Menor Período de Pico (Tp)

Coincidentemente, ondas incidentes com período “Tp” inferiores a 10,7s não foram suficientes para atingir o requisito de significância ao cômputo do parâmetro “Z₃”, observados os limites da velocidade “Vs” constantes nos “Critérios de Projeto” assumidos.

A.1.3 Menor velocidade do Navio (V_s)

Para ondas incidentes com maior período " T_p " iguais ou superiores a 14,1 segundos, caso a velocidade do navio " V_s " seja igual ou superior a 8 nós ($V_s \geq 8$ nós), será suficiente para que o requisito de significância do cômputo do parâmetro " Z_3 " seja alcançado, sendo estimado um valor máximo igual a 2,57 metros.

Nesta condição, a menor velocidade " V_s " necessária ao cômputo do parâmetro " Z_3 " é 8 nós, considerando a incidência de uma onda com " T_p " igual a 14,1 s, estabelecida como "Condição de Projeto" e ângulo de incidência " ψ " igual a 150° , conforme demonstrado na Figura 34.

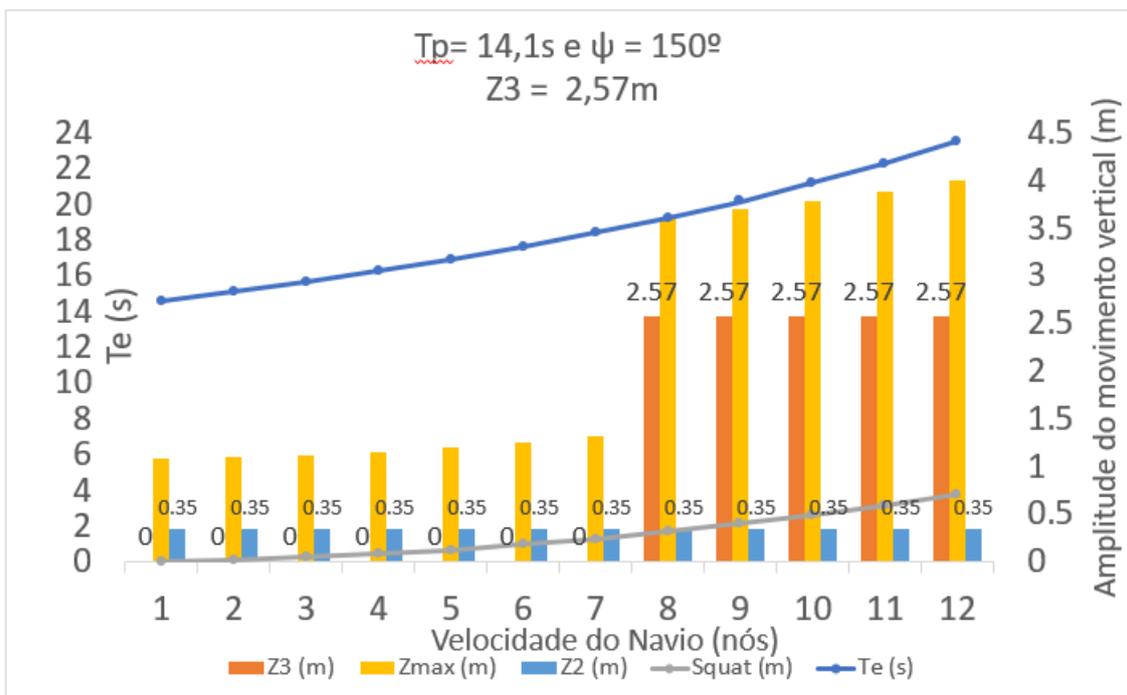


Figura 34: Estimativa para movimento vertical induzido por ondas. $Z_3 = 2,57$ metros para o trânsito de "entrada", no trecho "Inicial". Resultado da aplicação da metodologia japonesa. Fonte: elaboração própria

A.1.4 Influência do parâmetro velocidade (V_s)

Para uma mesma velocidade " V_s " entre 8 e 12 nós, maior é o valor calculado para o parâmetro " Z_3 " quanto maior o período da onda incidente " T_p " e ângulo de incidência " ψ ".

A.2 TRECHO INTERMEDIÁRIO

A.2.1 Máxima amplitude " $Z(m)$ "

Para uma onda incidente com altura significativa " H_s " igual a 1 metro, estimou-se que o valor do parâmetro $Z(m)$ foi igual a 2,24 metros. Esse valor foi encontrado para uma

velocidade “Vs” máxima igual a 12 nós, estabelecida como limite no “Critério de Projeto” e um ângulo de incidência (ψ) igual a 135°, conforme demonstra a Figura 35.

Dout (m)= 15
Vs (nós)= 12
squat (m) = 0,83
Hs (m)= 1

Trecho “Intermediário” – entrada cômputo da “PP calculada”

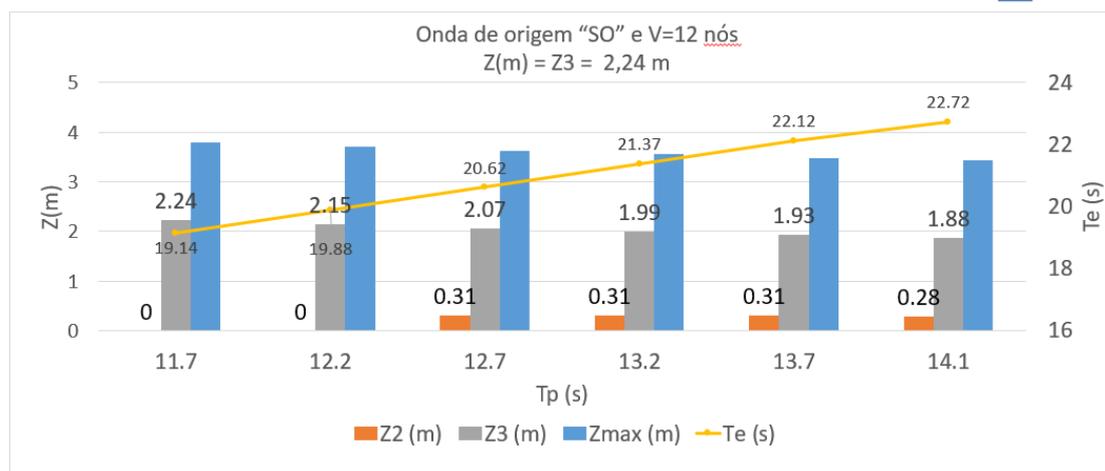
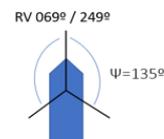


Figura 35: Máxima estimativa para movimento vertical induzido por ondas “Z(m)” = Z_3 = 2,24 metros para o trânsito de “entrada”, no trecho “Intermediário”. Resultado da aplicação da metodologia japonesa. Fonte: elaboração própria

No gráfico ilustrado na Figura 35, as barras cinzas indicam as estimativas para o parâmetro “Z₃”. O maior valor calculado para o parâmetro “Z₃” e conseqüentemente para “Z(m)” foi igual a 2,24 metros, tendo sido o valor utilizado no cômputo da “PP calculada”. Este valor foi calculado para uma onda incidente com “Tp” igual a 11,7 segundos.

Considerando que o rumo principal do canal neste trecho inicial é 069° verdadeiros, então $\psi=135^\circ$ representa a incidência de uma onda originada aos 204° verdadeiros, indicando uma onda de origem Sul-Sudoeste (S-SO).

Para a região, o estudo climatológico de incidência de ondas indica uma frequência anual de ocorrência de 13%. Os períodos “Tp” analisados são comumente observados na região e a incidência de ondas com Hs = 3 metros foi observada em 50% das observações climatológicas.

A.2.2 Menor Período de Pico (Tp)

Ondas incidentes com período “Tp” inferiores a 9,7s não foram suficientes para atingir o requisito de significância ao cômputo do parâmetro “Z₃”, observados os limites da velocidade “Vs” constantes nos “Critérios de Projeto” assumidos.

Para um período “Tp” igual ou superior a 9,7 segundos, a uma mesma velocidade “Vs” igual a 12 nós, o maior valor calculado para o parâmetro “Z₃” foi igual a 2,02 metros,

considerando uma onda incidente cujo de incidência “ ψ ” era igual a 150° , conforme apresentado na Figura 36:

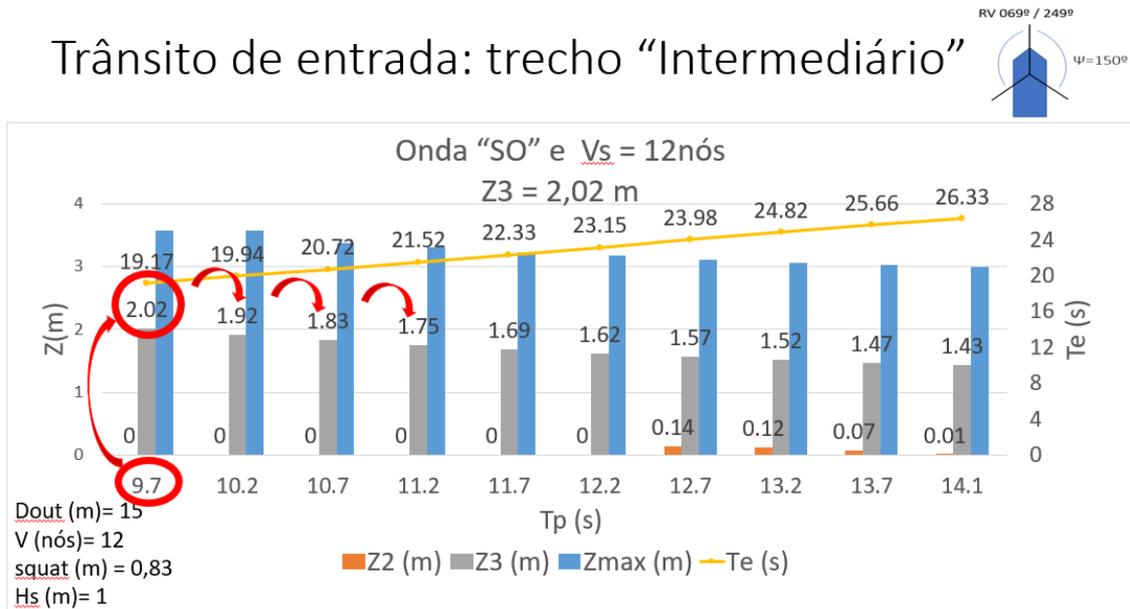


Figura 36: Estimativa para movimento vertical induzido por ondas. $Z_3 = 2,02$ metros para o trânsito de “entrada”, no trecho “Intermediário”. Resultado da aplicação da metodologia japonesa. Fonte: elaboração própria

A.2.3 Menor velocidade do Navio (v)

Para ondas incidentes com maior período “ T_p ” iguais ou superiores a 14,1 segundos, caso a velocidade do navio “ V_s ” seja igual ou superior a 7 nós ($V_s \geq 7$ nós), será suficiente para que o requisito de significância do cômputo do parâmetro “ Z_3 ” fosse alcançado, sendo estimado um valor máximo igual a 1,43 metros.

Nesta condição, a menor velocidade “ V_s ” necessária ao cômputo do parâmetro “ Z_3 ” é 7 nós, considerando a incidência de uma onda com “ T_p ” igual a 14,1 s, estabelecida como “Critério de Projeto” e ângulo de incidência “ ψ ” igual a 150° , conforme demonstrado na Figura 37.

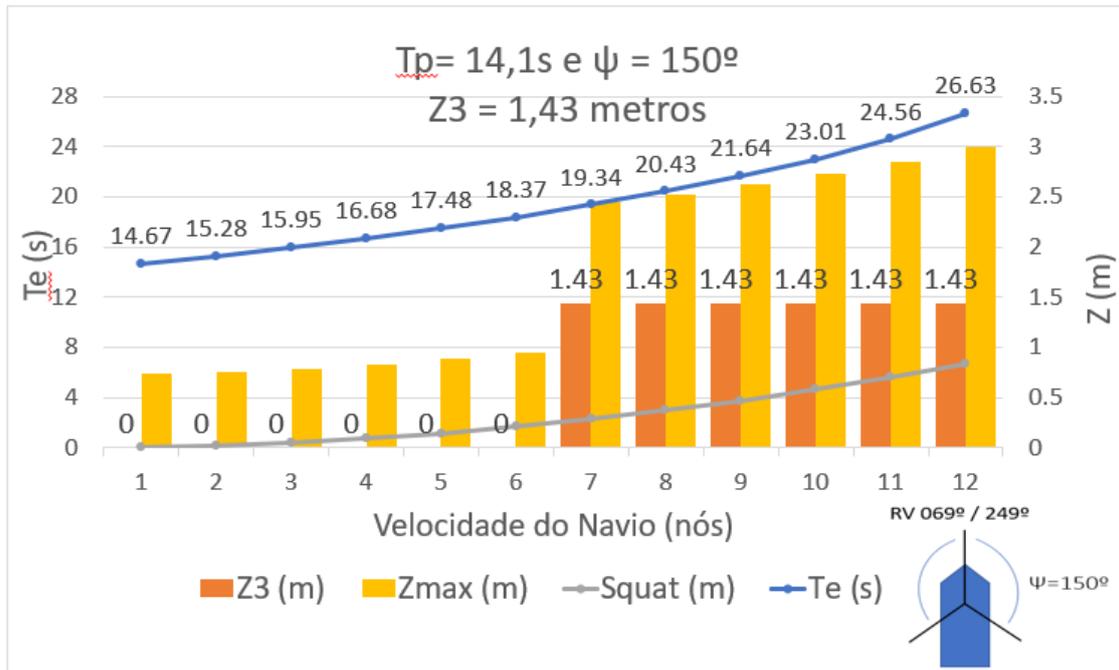


Figura 37: estimativa para movimento vertical induzido por ondas. $Z_3 = 2,57$ metros para o trânsito de “entrada”, no trecho “Intermediário”. Resultado da aplicação da metodologia japonesa. Fonte: elaboração própria

A.2.4 Influência do parâmetro velocidade (Vs)

Para uma mesma velocidade “Vs” entre 7 e 12 nós, maior é o valor calculado para o parâmetro “Z₃” quanto maior o período da onda incidente “Tp” e ângulo de incidência “ψ”.

B) Trânsito de saída

No trânsito de saída, as ondas incidem sobre o navio no setor través-proa, ou seja, $0^\circ \leq \psi < 90^\circ$. O aumento da velocidade do navio “Vs” determina uma diminuição do valor do Período de Encontro “Te”, pois as ondas passam a incidir no setor través-proa com maior frequência, o que não traz consequências. Isto significa que neste trânsito o navio navega de encontro à onda.

Desta forma, no trânsito de “saída” o requisito para o cômputo do parâmetro “Z₃” “Te = Tr” é quase impossível de ser alcançado, pois maior valor para “Te” possível é o período da onda incidente “Tp”, quando ela incide exatamente sobre o través, ou seja, quando $\psi = 90^\circ$.

Considerando que o valor do parâmetro “Tr” é igual a 19,1 segundos e que o maior período de onda incidente “Tp” estabelecido nos “Critérios de Projeto” é para uma onda com “Tp” igual a 14,1 segundos, então o cumprimento deste requisito seria impossível.

Sendo assim, neste trânsito a estimativa para o fator “Z(m)” é intimamente ligada à significância e cômputo do parâmetro “Z₂”, que predomina sobre o parâmetro “Z₃” e quantifica a expectativa do movimento acoplado “Heave + Pitch” na proa do navio. De forma geral, o cômputo do parâmetro “Z₂” não é influenciado pela velocidade do navio “Vs”.

Para o cômputo do parâmetro “Z₂”, a grande influência está relacionada ao valor do comprimento da onda incidente “λ” o qual é diretamente influenciado pelo parâmetro profundidade “Dout” e período “Tp”, assim como pelo ângulo de incidência da onda “ψ”.

B.1 TRECHO INICIAL

B.1.1 Máxima amplitude “Z(m)”

Para uma onda incidente com altura significativa “Hs” igual a 2 metros, estimou-se que o valor do parâmetro Z(m) foi igual a 1,4 metros, para uma onda incidente com período “Tp” minimamente igual a 11,7 segundos, conforme demonstra a Figura 38.

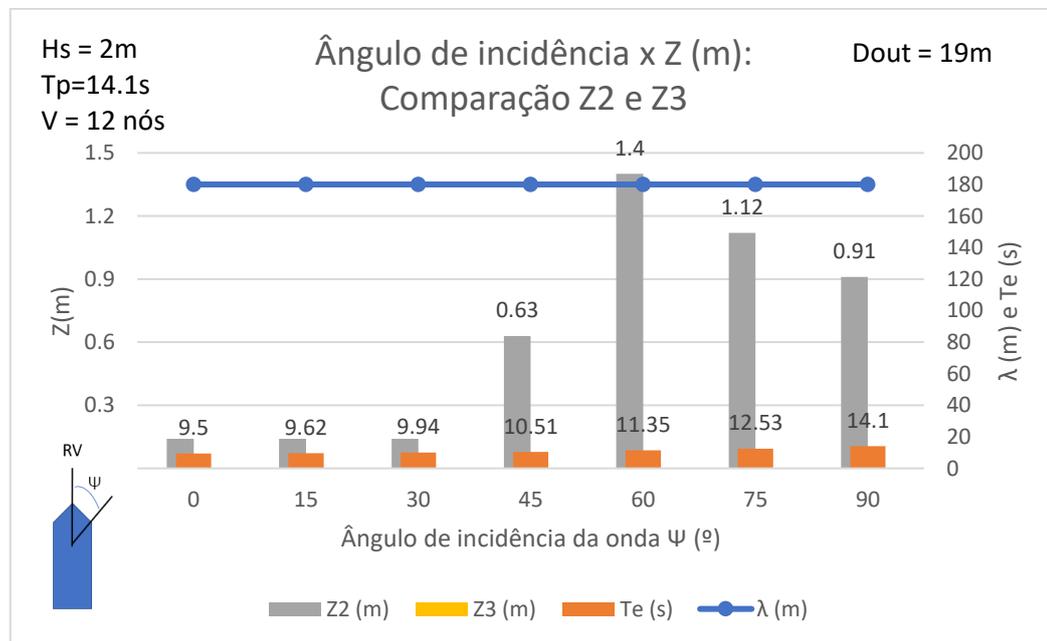


Figura 38: Máxima amplitude do movimento vertical induzido por ondas no trânsito de saída do trecho inicial. “Z(m)” igual a 1,4 metros. Fonte: elaboração própria

Para este trecho “Inicial”, o valor inferido para a profundidade “Dout” foi igual a 19 metros. O período “Tp” igual a 11,7 segundos é o menor valor, que associado ao valor da profundidade “Dout” possibilita que o comprimento de onda “λ” calculado seja minimamente igual ou superior a 144 metros, cumprindo assim o requisito mínimo de significância ao cômputo do parâmetro “Z₂”.

O maior valor possível para a comprimento da onda incidente “λ” fica por conta do maior período “Tp” previsto nos “Critérios de Projeto”. No caso, a maior período “Tp” foi igual a 14,1 segundos e o maior valor que pode ser calculado para o comprimento da onda incidente “λ” foi igual a 180,02 metros.

Para uma onda incidente com “Tp” igual a 14,1 segundos e um ângulo de incidência “ψ” igual a 60° o máximo valor computado para o parâmetro “Z2”, e consequentemente para o fator “Z(m)”, foi igual a 1,4 metros. Conforme demonstra a Figura 39, o resultado encontrado independe da velocidade do navio “Vs”.

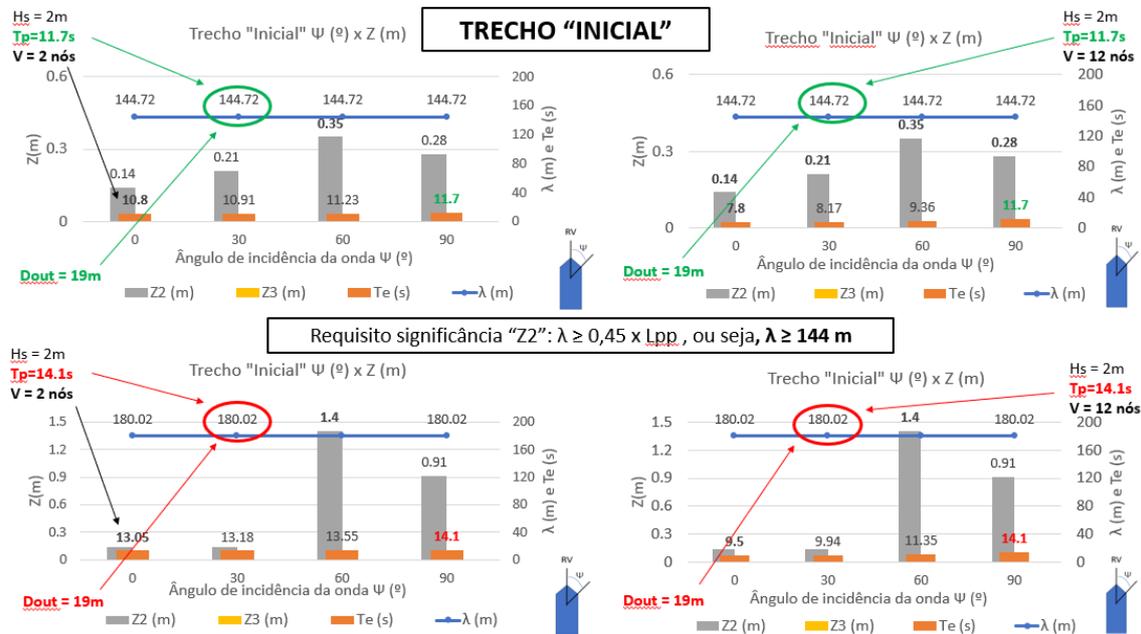


Figura 39: Cômputo do parâmetro “Z2” no trânsito de “saída”, no trecho “Inicial” do CN. O fator “Z(m)” = 1,4 metros para uma onda incidente com “Tp” minimamente igual a 11,7 segundos. Fonte: elaboração própria

Considerando que o rumo principal neste trecho inicial é 148° verdadeiros, então “ψ=60°” representa a incidência de uma onda originada aos 208° (incidindo na alheta de BE do Navio), representando, portanto, a incidência de uma onda de origem Sudoeste (SO).

B.2 TRECHO INTERMEDIÁRIO

B.2.1 Maior amplitude “Z(m)”

Para uma onda incidente com altura significativa “Hs” igual a 1 metro, estimou-se que o valor do parâmetro Z(m) foi igual a 0,35 metros, para uma onda incidente com período “Tp” minimamente igual a 12,7 segundos, conforme demonstra a Figura 40.

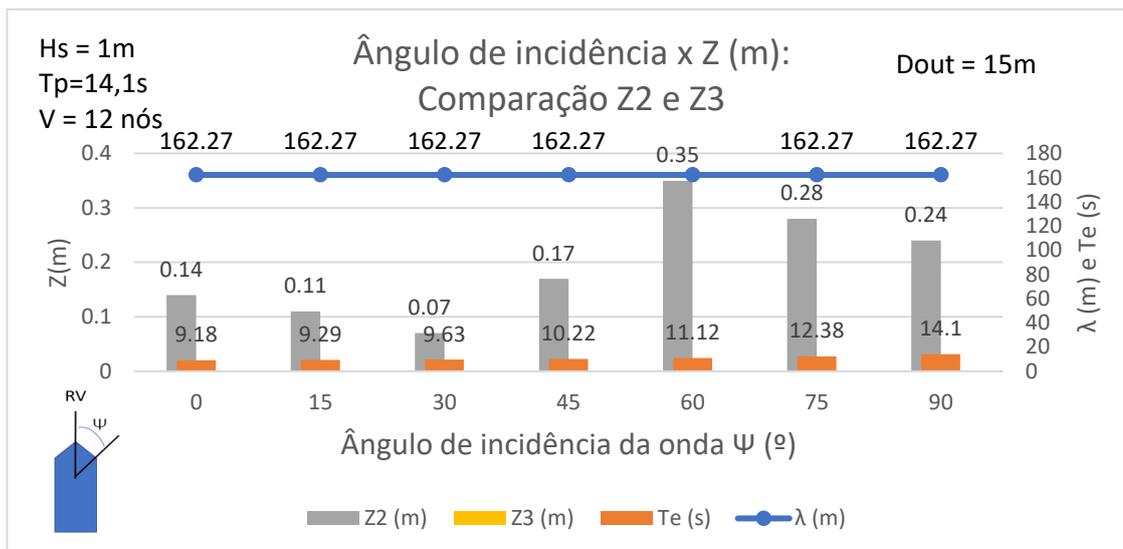


Figura 40: Máxima amplitude do movimento vertical induzido por ondas no trânsito de saída do trecho inicial. Fonte: elaboração própria

Para este trecho “Intermediário”, o valor inferido para a profundidade “Dout” foi igual a 15 metros. O período “Tp” igual a 12,7 segundos é o menor valor, que associado ao valor da profundidade “Dout”, que possibilita que o comprimento de onda “ λ ” calculado seja minimamente igual ou superior a 144 metros, a fim de requisito mínimo de significância ao cômputo do parâmetro “Z₂” possa ser atingido.

O maior valor possível para a comprimento da onda incidente “ λ ” fica por conta do maior período “Tp” previsto nos “Critérios de Projeto”. No caso, a maior período “Tp” foi igual a 14,1 segundos e o maior valor que pode ser calculado para o comprimento da onda incidente “ λ ” foi igual a 180,02 metros.

Para uma onda incidente com “Tp” igual a 14,1 segundos e um ângulo de incidência “ ψ ” igual a 60°, o máximo valor computado para o parâmetro “Z₂” e conseqüentemente para o fator “Z(m)” foi igual a 0,35 metros, conforme demonstra a Figura 41. O resultado encontrado independe da velocidade do navio “Vs”.

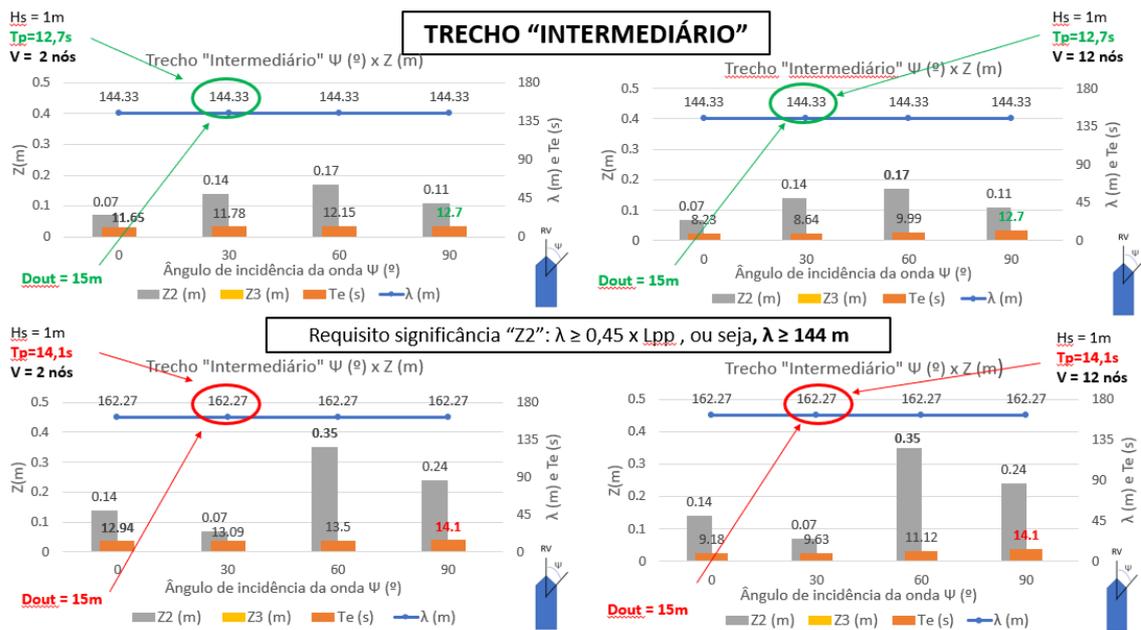


Figura 41: Cômputo do parâmetro “Z₂” no trânsito de “saída”, no trecho “Intermediário” do CN. O fator “Z(m)” = 0,35 metro para uma onda incidente com “Tp” minimamente igual a 12,7 segundos. Fonte: elaboração própria

5.2. O máximo “efeito squat”: “S (m)”

Observa-se nos três gráficos abaixo que os resultados obtidos a partir do emprego da formulação de HUUSKA-GULIEV (1976) se encontram centralmente posicionados (aproximadamente no valor médio) em relação aos demais resultados apresentados. Isto quer dizer que tais resultados não são nem os mais nem os menos conservadores, quando comparados aos demais resultados.

O gráfico relativo ao trecho “Inicial” demonstra uma grande diferença entre os resultados obtidos empregando a formulação “ICORELS” e a formulação “YOSHIMURA” para canais do tipo “restrito (R)”, da ordem de 20cm para velocidades “Vs” iguais a 12 nós.

Nesta velocidade o resultado obtido pela formulação de HUUSKA-GULIEV (1976) para canais do tipo “restrito (R)” é bastante semelhante ao resultado obtido pela formulação de “YOSHIMURA” para canais do tipo “irrestrito (I)”. Os resultados obtidos pela formulação de “YOSHIMURA” apresentam os resultados mais conservadores.

Não foi possível utilizar a formulação “BARRASS3” para estimar o fator “S(m)” para o trecho “Inicial”, pois a relação “h/T” supera o limite de aplicação e emprego da referida formulação, apresentados no capítulo III desta dissertação, conforme demonstra a **Figura 42**.

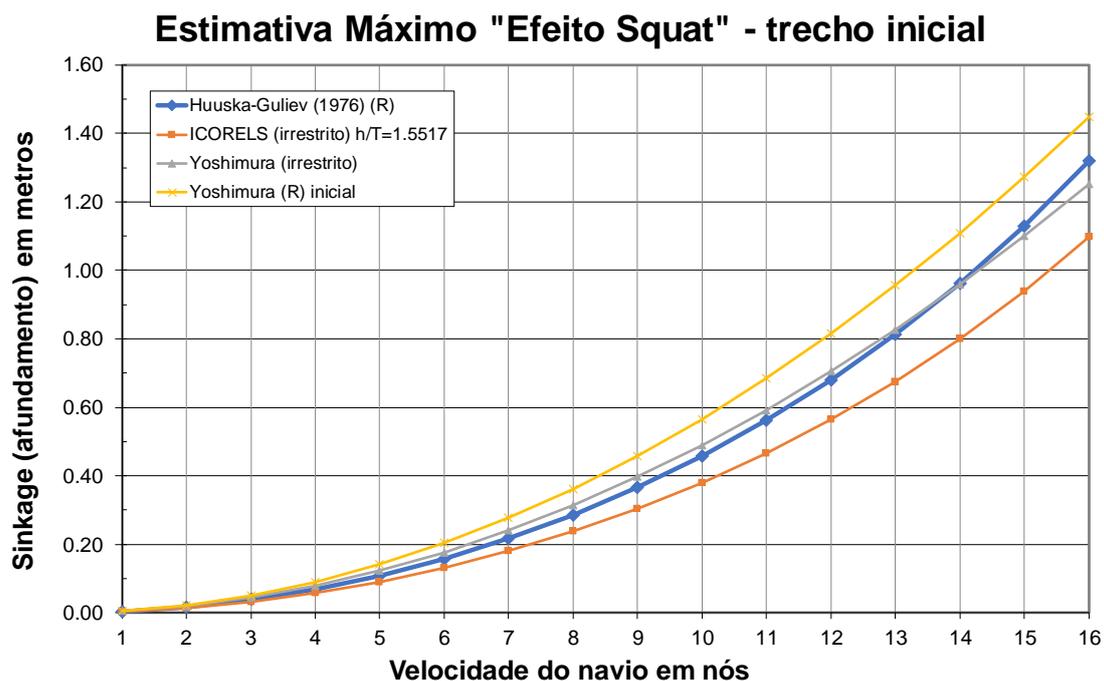


Figura 42: Estimativa máximo efeito *squat* (trecho inicial). Fonte: elaboração própria

Aqui, para a velocidade máxima (v), estabelecida como “condição de projeto”, igual a 12 nós, o valor calculado para “ S (m)” foi igual a 0,68 metro, empregando a formulação matemática de “HUUSKA-GULIEV (1976), no trecho “Inicial” do Canal de Navegação.

Os gráficos estimativos de “ S (m)” para os trechos “Intermediário” e “Final” puderam incluir os resultados da formulação “BARRASS3”, pois nestes trechos a relação “ h/T ” tem valor igual a 1,2 estando, portanto, dentro dos limites de aplicação da referida formulação.

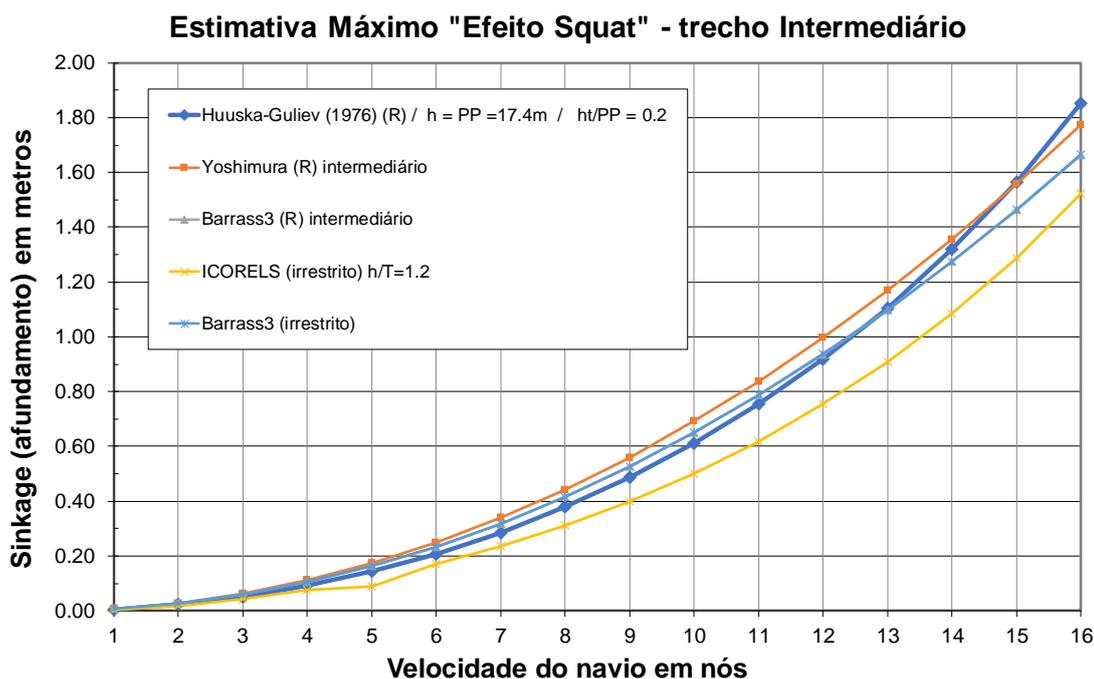


Figura 43: Estimativa máximo efeito *squat* (trecho intermediário). Fonte: elaboração própria

O gráfico apresentado na Figura 43 está relacionado ao trecho “Intermediário” do CN. Em relação a este trecho, para a velocidade máxima (v), estabelecida como “condição de projeto”, igual a 12 nós, o valor calculado para “S (m)” foi igual a, 0.92 metros, empregando a formulação matemática de “HUUSKA-GULIEV (1976).

Os resultados para o trecho “Final” do Canal de Navegação de acesso ao Porto de Itaguaí, graficamente representado na Figura 44, revelou que a formulação de “HUUSKA-GULIEV (1976)” não é a mais conservadora. Considerando que o grau de restrição deste trecho é bem mais elevado que dos trechos analisados anteriormente, pode-se dizer os resultados do correto emprego desta formulação são compatíveis com os demais. No entanto, ficaram distantes do resultado estimado para a formulação de “ICORELS” que, em teoria, é aplicável tanto para canais do tipo restrito (R) quanto para canais do tipo irrestrito (I).

Para os três trechos analisados, a formulação “ICORELS” revelou destoar suas estimativas, principalmente quando o grau de restrição do canal é significativo, como é o caso dos trechos “Inicial” e “Intermediário”. Apesar de, em teoria, poder ser aplicável também a canais do tipo “restrito (R)”, sem quaisquer contraindicações, seus resultados parecem ser mais ajustados a estimativas de canais com menor fator de bloqueio (S), ou seja, mais abertos ou associáveis a canais do tipo “irrestrito (I)”.

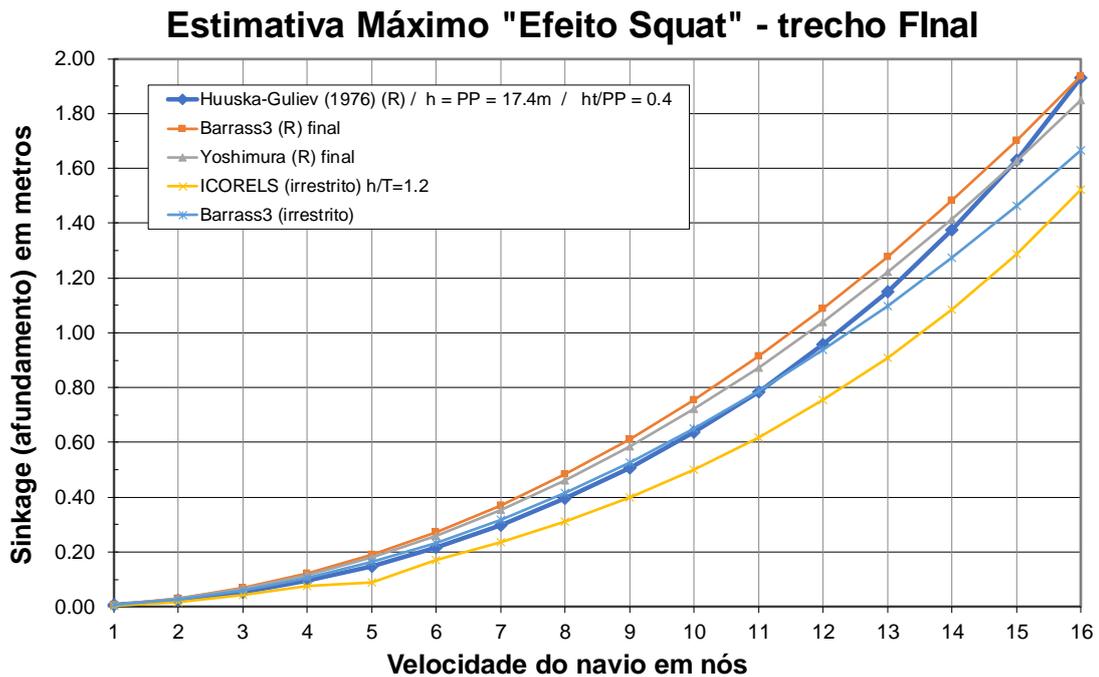


Figura 44: Estimativa máxima efeito *squat* (trecho final). Fonte: elaboração própria

Em relação ao trecho “Final” do CN, para a velocidade máxima (v), estabelecida como “condição de projeto”, igual a 12 nós, o valor calculado para “ S (m)” foi igual a 0,96 metros, empregando a formulação matemática de “HUUSKA-GULIEV (1976).

5.3. Resultado da composição da “PP calculada”

A Tabela 13 sintetiza o cômputo da “PP calculada”, no qual todos os fatores selecionados e indicados no capítulo IV desta dissertação compuseram o “requisito de *UKC*” para os dois possíveis trânsitos (entrada e saída) para cada um dos três trechos indicados no canal.

Para o trânsito de “entrada” do CN, por meios próprios, o “requisito de *UKC*” calculado, à luz dos “Critérios de Projeto” assumido para:

- o trecho “Inicial” foi igual a 5,92 metros;
- o trecho “Intermediário” foi igual a 4,82 metros;
- o trecho “Final” foi igual a 2,69 metros.

Para o trânsito de “saída” do CN, por meios próprios, o “requisito de *UKC*” calculado, à luz dos “Critérios de Projeto” assumido para:

- o trecho “Inicial” foi igual a 3,48 metros;
- o trecho “Intermediário” foi igual a 2,49 metros;
- o trecho “Final” foi igual a 2,25 metros.

A verificação da “Profundidade de Projeto” é feita pela diferença entre o valor da “PP selecionada” e o valor da “PP calculada”. A verificação é considerada satisfatória quando a diferença entre esses valores é positiva. Isto permite quantificar o fator individual de segurança alcançado para cada trecho, nos dois trânsitos.

A Tabela 12 apresenta o fator de segurança individual aplicado a cada um dos trânsitos:

Tabela 12: Fatores de segurança calculados para o trânsito de “entrada” e “saída” para os trechos de interesse no canal

Calado estático máximo do Navio de Projeto (T) = 14,5 m	Trecho do CN	"PP calculada" (m)	Fator de Segurança aplicado "PP calculada" / T
TRÂNSITO DE ENTRADA (Mais seguro que o de saída nos trechos “Inicial” e “Final”)	"Inicial"	20,42	1,41
	"Intermediário"	19,32	Desconhecido
	"Final"	17,19	1,19
TRÂNSITO DE SAÍDA (Mais perigoso que o de entrada)	"Inicial"	17,98	1,24
	"Intermediário"	16,99	1,17
	"Final"	16,75	1,16

Quando “PP calculada” \leq “PP selecionada” no trecho, então pode-se afirmar que quanto maior o valor da razão (“PP calculada” / T), maior é a segurança intrínseca à seleção da Profundidade de Projeto, neste trecho.

Os valores calculados também permitem relativizar a segurança da seleção da “Profundidade de Projetos” para dois distintos trânsitos: de “entrada” e “saída” do CN. Por exemplo, pode-se afirmar que a “PP selecionada” para os trechos “Inicial” e “Final” é relativamente mais segura ao trânsito de “entrada” do que em relação ao trânsito de “saída” do CN.

Quando a diferença entre o valor da “PP selecionada” e a “PP calculada” é negativa, o fator de segurança não pode ser quantificado. Há pelo menos três hipóteses:

- H.1) O “requisito de UKC” não foi atendido para os “Critérios de Projeto” assumidos, o que enseja que a seleção da “Profundidade de Projeto” seja insegura, em determinado trecho;
- H.2) A “Profundidade de Projeto” e a mínima profundidade mantida no CN estão em desacordo, enseja que a “Profundidade de Projeto” precisa ser atualizada;
- H.3) Os “Critérios de Projeto” assumidos não foram suficientemente rigorosos, ou seja, precisavam ser mais restritivos quanto às condições-limite.

Tabela 13: Resultado da composição da “PP calculada” e comparação com a “PP selecionada”

Operação matemática	TRECHO	TRÂNSITO DE ENTRADA		
		"Inicial"	"Intermediário"	"Final"
+	T (calado máximo) em metros	14.5	14.5	14.5
	Condição desfavorável de maré meteorológica (m)	0.4	0.4	0.4
	Efeito da variação da densidade da água no calado (m)	0.44	0.44	0.44
	Máximo "efeito "squat" (12 nós)	0.68	0.74	0.85
	Amplitude do movimento vertical induzido por ondas (m)	3.4	2.24	0
	FLAQ (margem de segurança): fundo rochoso	1	1	1
=	PP calculada (m)	20.42	19.32	17.19
-	PP selecionada no trecho (m)	22.5	17.4	17.4
=	Diferença entre "PP calculada" e "PP selecionada" (m)	ok	1.92	ok

Operação matemática	TRECHO	TRÂNSITO DE SAÍDA		
		"Inicial"	"Intermediário"	"Final"
+	T (calado máximo) em metros	14.5	14.5	14.5
	Condição desfavorável de maré meteorológica (m)	0.4	0.4	0.4
	Efeito da variação da densidade da água no calado (m)	0	0	0
	Máximo "efeito "squat" (12 nós)	0.68	0.74	0.85
	Amplitude do movimento vertical induzido por ondas (m)	1.4	0.35	0
	FLAQ (margem de segurança): fundo rochoso	1	1	1
=	PP calculada (m)	17.98	16.99	16.75
-	PP selecionada no trecho (m)	22.5	17.4	17.4
=	Diferença entre "PP calculada" e "PP selecionada" (m)	ok	ok	ok

A Tabela 13 demonstra que a seleção da Profundidade de Projeto foi considerada satisfatória nos trechos “Inicial” e “Final” do CN avaliado à luz do Navio de Projeto selecionado, pois atendeu aos “requisitos de UKC” nos trânsitos de entrada e saída. A exceção pôde ser identificada apenas no trecho “Intermediário”, para o trânsito de entrada. Uma significativa discrepância numérica de, aproximadamente, 2 metros foi identificada e chamou a atenção.

Não há restrições operacionais relativas à velocidade, por exemplo, que justifiquem tal diferença, da ordem de 2 metros. Isto equivale a dizer que, no referido trecho, os movimentos verticais induzidos por ondas, tal como foi considerado para o trecho “Final”, seriam insignificantes.

Adicionalmente, a análise de perfis batimétricos na área do trecho “Intermediário” permitiu identificar uma profundidade média bem superior à Profundidade Nominal cartografada, indicando ter havido um aprofundamento do canal no trecho “Intermediário”, que poderia ter determinado elevado do grau de restrição identificado.

6. CONCLUSÕES

Este trabalho buscou analisar as principais metodologias disponíveis a fim de selecionar aquelas mais adequadas à verificação da “Profundidade de Projeto” e fator de segurança utilizando um Navio-tipo de grande calado e critérios assumidos. Foram selecionados três trechos representativos do Canal de Navegação de acesso ao Porto de Itaguaí-RJ. Após cálculo dos fatores de segurança, estes foram comparados entre si e para distintos trânsitos de “entrada” e “saída” a fim de quantificar o grau de segurança alcançado pelas profundidades selecionadas no referido canal.

A análise do Canal de Navegação compreendeu três distintos trechos do canal, porém deixou de abordar trechos não retilíneos deste bem como aspectos específicos relacionados a áreas ou bacias de manobras, tais como as localizadas nas proximidades do Terminal da Ilha Guaíba (entre os trechos “Inicial” e “Intermediário” e o acesso marítimo que passa ao Norte da Ilha das Cabras (próximo ao trecho “Final)).

Embora o Canal de Navegação tenha sido estabelecido sobre um canal natural, este foi e vem sendo dragado a fim de atender ao aumento de calado máximo operacional, não sendo possível afirmar se esta dragagem vem sendo acompanhada pela atualização do projeto geométrico do canal (PCN) e respectiva seleção da Profundidade de Projeto, uma vez que, nas mais recentes edições das cartas náuticas 1621 e 1623, os lançamentos referentes à Profundidade Nominal não têm sido mais observados.

Os estudos empíricos conduzidos para a formulação matemática estimativa do máximo “efeito *squat*” sempre consideram o navio em um mesmo rumo e paralelo à linha de centro do Canal de Navegação, ou seja, o sentido proa-popa do navio alinhado ao rumo principal do canal em determinado trecho. Esta não é a pior situação, que seria quando o navio está bem perto de suas margens, digamos, a uma distância inferior a $0,5 B$.

Demonstrou-se que a seleção de uma maior Profundidade de Projeto pode representar, por consequência, o aumento da área da seção transversal submersa idealizada “Ac”. No entanto, nem sempre o aumento da área “Ac” representa a diminuição do grau de restrição deste Canal de Navegação. Opostamente, o aumento do grau de restrição pode significar a necessidade de aumento do requisito de *UKC*, já que a estimativa do máximo efeito *squat*, é potencialmente maior nesta condição.

A formulação matemática HUUSKA-GULIEV (1976) demonstrou ter as condições mais adequadas para melhor estimar o máximo “efeito *squat*”, em comparação às outras

formulações apresentadas em PIANC (2014), pois permite a mais apurada diferenciação entre distintas condições e graus de restrição do Canal de Navegação.

Embora pudesse ser suposto que o valor da área “As” aumentasse ou diminuísse, em função da amplitude dos movimentos verticais induzidos por ondas e do efeito *squat*, e que a área “Ac” pudesse variar em função de determinada altura da maré astronômica observada (considerando o uso da vantagem da maré astronômica no cômputo da Profundidade de Projeto), tal situação não é contemplada na bibliografia pesquisada. Isto significa que, para efeito de cálculo, os valores da área “Ac” e “As” são considerados constantes para um mesmo segmento ou trecho do Canal de Navegação.

Além do “efeito *squat*”, destaca-se a significância da magnitude do fator movimento vertical induzido por ondas, no cômputo do “requisito de *UKC*”. A aplicação do software J-Fairway (2013), que observa a metodologia japonesa de cômputo deste fator, ajudou a analisar a sensibilidade dos resultados estimativos do parâmetro “Z(m)”, mesmo em situações em que os valores dos parâmetros de entrada “Tp” e “ ψ ” foram discretamente alterados.

Ao final do terceiro passo e execução da Metodologia Japonesa para estimativa de cálculo do parâmetro “Z₃”, foi importante examinar o quão próximo o período natural de “roll” (Tr) precisou estar numericamente próximo ao valor do período de encontro (Te).

Nos segmentos iniciais do canal, a profundidade “Dout” é da mesma ordem de grandeza do valor da Profundidade de Projeto selecionada. Esse fato é fundamental para que a estimativa de movimentos verticais induzidos por ondas seja maior em segmentos ou trechos mais iniciais do Canal de Navegação.

Analisando o desenvolvimento numérico da metodologia japonesa para estimativa do máximo movimento vertical induzido por ondas, observa-se que, na grande maioria das vezes, quando o valor calculado para o parâmetro “Z₃” é maior que o valor calculado para o parâmetro “Z₂”, o método estima maiores movimentos verticais nos dois bordos da quilha da embarcação, em consequência da combinação de movimentos “*heave + roll*”. Já os valores do parâmetro “Z₂” tornam-se mais significativos para estimativa do máximo movimento vertical induzido por ondas, somente em consequência da incidência de ondas de maior altura significativa “Hs” no programa “J-Fairway”, combinados aos demais parâmetros relativos às outras condições do projeto.

Os resultados numéricos encontrados demonstram que o parâmetro “Te” (frequência de encontro do navio com as ondas) é a chave fundamental para a percepção da expectativa de significativa magnitude e probabilidade de ocorrência de movimentos verticais induzidos por

ondas quando há ondas no setor alheta-popa da embarcação. Uma maior altura significativa destas apenas modula a magnitude deste efeito e potencial cômputo de tal fator.

Tal metodologia indica, quantitativamente, a grande influência de ondas incidentes no setor de popa e/ou alheta da embarcação. Ao navegar no mesmo sentido e direção da onda incidente, o valor do parâmetro “Te” aumenta, tendendo a não superar o valor do período natural de *roll* (Tr) do navio. O parâmetro “Tr” retrata uma característica da construção do Navio de Projeto selecionado.

Foram utilizados os dados de batimetria das cartas náuticas referentes ao canal de acesso ao Porto de Itaguaí, por meio dos quais foram analisados diversos perfis batimétricos, tendo sido selecionados apenas três deles, nos trechos “Inicial”, “Intermediário” e “Final” do canal. Sobre tais trechos foram analisados o máximo movimento vertical induzido por ondas e o máximo “efeito *squat*” tendo como resultado a “PP calculada”, a qual foi comparada à “PP selecionada”, respectiva de cada trecho.

No trecho Inicial, o trânsito de entrada representou as maiores estimativas. Isto se deve ao fato de que nesta região a incidência de ondas de maior altura já era esperada. Os trânsitos de saída, avaliados nos trechos “Inicial” e “Intermediário”, apresentaram dominância do parâmetro “Z₂”, ou seja, do movimento de “*pitch*” na proa, no cômputo do movimento vertical induzido por ondas. O parâmetro “Z₃”, referente ao movimento de “*roll*”, na quilha, foi considerado insignificante para as condições estabelecidas no projeto, segundo a metodologia japonesa.

Já os trânsitos de entrada, avaliados nos trechos Inicial e Intermediário, apresentaram dominância do parâmetro “Z₃”, ou seja, do movimento de *roll* na quilha, no cômputo do movimento vertical induzido por ondas. O parâmetro “Z₂”, referente ao movimento de *pitch*, na proa, é significativo, mas tende a apresentar magnitudes mais modestas do que para o parâmetro “Z₃”.

Conforme demonstrado nos resultados, a avaliação do fator movimento vertical induzido por onda, em trânsitos de entrada, revelou que, quando o parâmetro velocidade do navio “Vs” foi inferior a 7 nós, houve sempre a predominância do parâmetro “Z₂” nos cálculos estimativos, em relação ao parâmetro “Z₃”, respeitados os critérios de projeto assumidos.

No trecho intermediário do Canal de Navegação, a sua profundidade local (real) no perfil selecionado é quase sempre superior a 20 metros e, portanto, bem superior ao valor da “PP selecionada”, cujo valor é igual a 17,4. Trata-se de uma diferença numericamente pequena, porém significativa, principalmente se considerado o impacto observado no grau de restrição específica daquela seção transversal submersa idealizada.

Considerações relacionadas ao grau de restrição de determinados trechos de um Canal de Navegação podem ser fundamentais na avaliação da Profundidade de Projeto. Como dito, a seleção de uma menor “Profundidade de Projeto” poderia significar um menor grau de restrição no segmento intermediário do Canal de Navegação, mas não é o que ocorre na prática.

O cálculo determinístico da “PP calculada” pode gerar uma solução com grandes margens de segurança, uma vez que a possibilidade de que todos os parâmetros se combinem em sua amplitude máxima é muito pequena, mas é importante para que não haja possibilidade de toque do fundo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT, NBR 13246: 1995. **Planejamento Portuário–Aspectos Náuticos**. 1995

ALLIANZ. **Safety and shipping review 2019**. Allianz Global Corporate & Specialty, 2019.

BARRASS, C. B. “Thirty-Two Years of Research into Ship Squat”. **Squat Workshop**, Elsfleth/Oldenburg, Germany, 2004.

BRIGGS, M. J.; SILVER, A. L.; BORGAMN, L. E. (2006): “Risk-based predictions for ship underkeel clearance”. In: **Proceedings of the Coastal Engineering Conference**, pp. 1-13, San Diego, USA, 2006.

BRIGGS, M. J.; SILVER, A. L.; KOPP, P. J.; SANTANGELO, F. A; MATHIS, I. A. “Validation of a risk-based numerical model for predicting deep-draft Underkeel Clearance”. **ASCE Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering**, v. 139, n. 4, pp. 267-276, 2013.

CAMPOS, R. M.; CAMARGO, R. D.; HARARI, J. “Caracterização de eventos extremos do nível do mar em Santos e sua correspondência com as reanálises do modelo do NCEP no sudoeste do Atlântico Sul”. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 25, n. 2, pp. 175-184, 2010.

DE KONING GANS, H. J.; BOONSTRA, H. “Squat effects of very large container ships with drift in a harbor environment”. In: **Proceedings of International Maritime-port Technology and Development Conference**, pp.613-620, Singapore, 2007

DIRETORIA DE HIDROGRAFIA E NAVEGAÇÃO (DHN). **NORMAM 17: normas da autoridade marítima para auxílios à navegação**. Marinha do Brasil, 2021. Disponível em: <https://www.marinha.mil.br/dhn/sites/www.marinha.mil.br/dhn/files/normam/NORMAM-17-REV5_0.pdf>. Acesso em: 12 de fevereiro de 2022.

FONSECA, A. R.; GUERRA, J. V. “Observações dos padrões de circulação nas proximidades do canal de navegação da baía de Sepetiba (RJ) – agosto de 2011”. In: **Anais do X Encontro Nacional de Engenharia de Sedimentos (ENES)**, pp. 1-10, Foz do Iguaçu, 2012.

GILMAN, S. “The size economies and network efficiency of large containerships”. **International Journal of Maritime Economics**, v. 1, pp. 39-59, 1999.

GOURLAY, T. P.; HA, J. H., MUCHA, P.; ULICZKA, K. “Sinkage and trim of modern container ships in shallow water”. In: **Australasian Coasts & Ports Conference**, pp. 344-351, Auckland, New Zealand, Sept. 2015.

GULIEV, U. M. “On Squat Calculations for Vessels Going in Shallow Water and Through Channels.” **PIANC Bulletin** 1(7):17-20, 1971.

HUUSKA, O. “On the evaluation of underkeel clearances in Finnish waterways”. **PIANC Bulletin**, v. 1, n. 7, pp: 17-20, 1976.

IALA. **NAVGUIDE 2018: marine aids to navigation manual**. 8th ed. Saint Germain en Laye, France, IALA-AIM, 2018.

IALA. **The use of AtoN in the design of fairways**. 1st ed. Saint Germain en Laye, France, IALA-AIM, 2011.

INTERNATIONAL COMMISSION FOR THE RECEPTION OF LARGE SHIPS (ICORELS). **Report of working group 4**, Supplement to PIANC Bulletin n. 35, 1980.

INTERNATIONAL HYDROGRAPHIC BUREAU. **The International hydrographic review**. International Hydrographic Bureau Monte-Carlo, Monaco Principality, 1998.

INTERNATIONAL HYDROGRAPHIC ORGANIZATION (IHO). **Mariners’ guide to accuracy of electronic navigational Charts (ENC)**. International Hydrographic Organization, Monaco, 2020

INTERNATIONAL TRANSPORT FORUM (ITF). **The Impact of Mega-Ships: the case of Jakarta**. International Transport Forum, 2017. Disponível em: <<https://www.itf-oecd.org/sites/default/files/docs/mega-ships-impact-jakarta.pdf>>. Acesso em: 06 de junho de 2020.

LATAIRE, E.; VANTORRE, M.; DELEFORTRIE, G. “The influence of the ship’s speed and distance to an arbitrarily shaped bank on bank effects”. In: **Proceedings of the ASME 34th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering**, pp. 1-9, St. John’s, Canada, 2015.

MCCARTNEY, B. L.; EBNER, L. L.; HALES, L. Z.; NELSON, E. E. **Ship channel design and operation**. 1 ed. Reston, Virginia, American Society of Civil Engineers, 2005.

MCNALLY, W. H. (ed.). **Navigation engineering practice and ethical standards**. 1 ed. Reston, Virginia, American Society of Civil Engineers, 2008

MELO FILHO, E., 2017, **Maré meteorológica na costa brasileira**. Tese de D.Sc., Universidade Federal do Rio Grande, Rio Grande, RS, Brasil.

MLIT. **Technical standards and commentaries for port and harbour facilities in Japan**. Ministry of Infrastructure, Land, Transport and Tourism (MLIT), 2007.

MOREIRA da SILVA, P. C., 1969. **Wave penetration at Sepetiba bay**. Relatório técnico para MBR (Minerações Brasileiras Reunidas S.A.).

MOTA, O. N. F. **Engenharia e arquitetura naval**. Lisnave, 2019.

MUEHE, D; VALENTINI, E. **O Litoral do Estado do Rio de Janeiro: uma caracterização físico-ambiental**. 1 ed. Rio de Janeiro, Fundação de Estudos do Mar, 1998.

NATIONAL RESEARCH COUNCIL (NRC). **Criteria for the depths of dredged navigational channels**. National Academies. Marine Board, United States, 1983.

OHTSU, K.; YOSHIMURA, Y.; HIRANO, M.; TSUGANE, M.; TAKAHASHI, H. “Design standards for fairway in next generation”. In: **Proceedings of the Korean Institute of Navigation and Port Research Conference**, pp. 230-239, Seoul, 2006.

PARKER, B.; HUFF, L.C. “Modern under-keel clearance management”. **International Hydrographic Review**. v. 75, n. 2, 143-165. Set., 1998.

PIANC. **Harbour approach channels design guidelines**. Report n° 121, Maritime Navigation Commission, 2014.

PIANC. **Improving navigational safety and port efficiency**. Technical articles, Australian section of PIANC, 2017.

PIANC. **The state and perspectives of waterborne transport infrastructure worldwide**. Final report of findings and recommendations, PIANC Task Group 181, 2018.

PIANC. **Under keel clearance for large ships in maritime fairways with hard bottom**. Technical reports, Maritime Navigation Commission, 1985.

PONÇANO, W.L., 1976. **Sedimentação atual na baía de Sepetiba, estado do Rio de Janeiro: contribuição à avaliação de viabilidade geotécnica da implantação de um porto**. Dissertação de M. Sc., Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, Brasil.

PUERTOS DEL ESTADO. **ROM 3.1-99: recommendations for the design of the maritime configuration of ports, approach channels and harbour basins**. 1ed. Madrid, Puertos del Estado, 2007.

RODRIGUES, A. A. “Boias articuladas submersíveis”. **Revista Marítima Brasileira**, v. 139, n. 01/03, pp. 157-171, 2019.

SERBAN, P. S.; PANAITESCU, V. N. “Comparison between formulas of maximum ship squat”. **Scientific Bulletin of Naval Academy**, v. 19, n. 1, pp. 105-111, 2016.

SOARES, J. L., 2016, **Discussão metodológica sobre sensibilidade de parâmetros de ondas incidentes para definição de condições de projeto**. Dissertação de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

THE NAUTICAL INSTITUTE. **The Nautical Institute Humberside Branch Seminar: squat interaction maneuvering: Wednesday 13th September 1995, The Royal Hotel, Hull, Humberside**, Humberside, Nautical Institute, 1995.

U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS (USACE). **Coastal Engineering Manual**. 1st ed, Washington, DC, Washington, DC. Military Bookshop, 2008.

U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS (USACE). **Engineering and design: hydraulic design of deep-draft navigation projects**. 1st ed., Washington, DC, Military Bookshop, 2006.

VAN RIJN, L. C. **Channel slopes of mud, silt and sand**. Disponível em: <<https://www.leovanrijn-sediment.com/papers/Channelslopesbrief2018.pdf>> Acesso em: 01 de março de 2018.

YOSHIMURA, Y. “Mathematical Model for the maneuvering ship motion in shallow water”. **Journal of the Kansai Society of Naval Architects**, Japan, v. 200, pp. 41-51, Mar. 1986)