RAPHAEL DE CAMPOS PRATS

**AVALIAÇÃO E IMPACTOS DA ELEVAÇÃO DO NÍVEL DO MAR NO
PORTO DE SANTOS (SÃO PAULO, BRASIL)**

SÃO PAULO
2017

RAPHAEL DE CAMPOS PRATS

**AVALIAÇÃO E IMPACTOS DA ELEVAÇÃO DO NÍVEL DO MAR NO PORTO DE
SANTOS (SÃO PAULO, BRASIL)**

Dissertação apresentada à Escola Politécnica
da Universidade de São Paulo para a
obtenção do título de Mestre em Ciências

SÃO PAULO
2017

RAPHAEL DE CAMPOS PRATS

**AVALIAÇÃO E IMPACTOS DA ELEVAÇÃO DO NÍVEL DO MAR NO PORTO DE
SANTOS (SÃO PAULO, BRASIL)**

Dissertação apresentada à Escola Politécnica
da Universidade de São Paulo para a
obtenção do título de Mestre em Ciências

Área de Concentração:
Engenharia Hidráulica

Orientador: Prof. Titular Paolo Alfredini

SÃO PAULO
2017

Este exemplar foi revisado e corrigido em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, _____ de _____ de _____

Assinatura do autor: _____

Assinatura do orientador: _____

Catlogação-na-publicação

Prats, Raphael de Campos

AVALIAÇÃO E IMPACTOS DA ELEVAÇÃO DO NÍVEL DO MAR NO
PORTO DE SANTOS (SÃO PAULO, BRASIL) / R. C. Prats -- versão corr. --
São Paulo, 2017.

73 p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São
Paulo. Departamento de Engenharia de Hidráulica e Ambiental.

1.PORTOS MARÍTIMOS 2.ENGENHARIA COSTEIRA 3.OBRAS DE
HIDRAULICA MARÍTIMA I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica.
Departamento de Engenharia de Hidráulica e Ambiental II.t.

Aos meus pais Oswaldo e Telma Prats, por me incentivarem sempre, ao meu irmão Lucas Prats por me acompanhar nesta jornada e a minha querida cidade de Santos.

AGRADECIMENTOS

Agradeço principalmente ao colega e professor Paolo Alfredini, pela sua zelosa orientação, pelo constante estímulo recebido durante o trabalho e pela certeza transmitida de que é sim possível conciliar trabalho e prazer.

Agradecimentos sinceros aos amigos Fernando Garcia e Fábio Avigo de Castro, que contribuíram consideravelmente com os estudos aqui apresentado.

Também aos demais colegas da Engecorps Engenharia, que me forneceram incentivo e suporte necessário para prosseguir nos estudos, muitas vezes desgastantes.

Por final, agradeço à Universidade de São Paulo, aos seus idealizadores e aos dedicados funcionários, que sempre lutaram, mesmo que muitas vezes inconscientemente, para que atinjam a verdadeira libertação promovida pelo Conhecimento.

PAX TIBI MARCE EVANGELISTA MEUS
Inscrição da Bandeira de Veneza, cidade do mar.

RESUMO

O Porto de Santos está localizado no litoral Paulista, na costa Sudeste do Brasil e é o maior e mais importante porto do país. Desde 1859 vem sofrendo adaptações e modernizações tanto em suas instalações físicas quanto em sua estrutura administrativa. As variáveis com as quais a Engenharia Civil deve lidar podem ser resumidas basicamente aos fenômenos naturais, pois estes determinam como serão projetadas e construídas as estruturas e instalações. Em projetos portuários, diversas características naturais devem ser mensuradas como, por exemplo, ventos, correntes marítimas, incidência de ondas, tipo de solo em que se encontra o porto, as temperaturas médias do local e, sobretudo, o nível do mar. Os mares e oceanos não possuem superfícies estáveis e apresentam cotas que estão em movimentos constantes. Estas variações se dão basicamente por ondas de curto ou longo período. A maré é uma onda de longo período que causa a variação diária do nível do mar. Atualmente é cada vez maior o interesse da comunidade científica pela temática relacionada às variações do nível do mar. Buscando contribuir com o tema, o presente estudo tem como objetivo principal a análise das variações do nível do mar no Porto de Santos ao longo dos últimos 60 anos, utilizando-se de dados coletados nos três marégrafos da região. Foi elaborada a média móvel desta série com a finalidade de detectar alguma variação significativa. A análise dos dados implicou que fossem considerados períodos de 18,61 anos, correspondentes ao intervalo do ciclo de precessão lunar, de modo a eliminar o efeito da variação astronômica no nível do mar. A elevação do nível máximo, médio e mínimo do mar no período de 1953 a 2008, apresentou uma elevação média de 2,5 mm/ano, resultado semelhante a outros estudos. Foram avaliados também o impacto da variação do nível do mar sobre as estruturas portuárias, indicando os efeitos da elevação nas estruturas, nos cais, nos aparelhos de defesa e ancoragem, nos equipamentos de descarga e outros.

Palavras-chave: Marés; Porto de Santos; Elevação do Nível do Mar; Nível do Mar; Impactos em Portos.

ABSTRACT

Santos Harbor is at São Paulo's coast, in Brazil's southeast coast and it is the biggest and the most important port of the country. Since 1859 had been suffering adaptations and modernizations in its installations such as in its administrative structure. The variables that Civil Engineering has to deal with can be resumed basically to the natural phenomena because it determines how projected and built the structures will be. In docks projects, several natural characteristics must be measured, as example, winds, ocean currents, waves incidence, kind of soil that supports the harbor's structures, the local medium temperatures and, mainly the sea level. The seas and oceans doesn't have stables surfaces and shows levels that are in constant movements. These variations are products of short and long period waves. The tide is a long period wave that causes the daily sea level variation. Actually, the interest of the scientific community in sea level variation is increasing. Aiming to contribute with this theme, the present study has as main objective analyzing the sea level variations at Santos Harbor above the last 60 years, using data collected from three tidal gauges in the region. It was applied the moving average of the series to detect some significant variation. The data analysis demanded that the periods of 18,61 years, which corresponds to the interval of the moon precession cycles, was considered to purge the astronomic variation over the sea level. The maximum sea level, average and minimum sea level, in the period of 1953 and 2008 showed an average increase of 2.5 mm/year, which is similar to other studies. It was evaluated the impact of this sea level rise over the port's structures, showing the structural effects, over the docks; in the defense and anchorage equipment, unload equipment and others.

Key-words: Tides; Santos Harbor; Sea Level Rise; Sea Level; Impacts on Ports.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

1.1	Localização do Porto de Santos	12
2.1	Forças de Maré	17
2.2	Esquema de formação da sizígia de lua nova e quadratura de quarto crescente	18
2.3	Esquema de formação da sizígia de lua cheia e quadratura de quarto minguante	18
2.4	Ressaca na Ponta da Praia de Santos	21
2.5	Ressaca na Ponta da Praia de Santos	21
2.6	Parcelas constituintes da profundidade requerida em um canal de acesso	26
2.7	Alturas mínimas recomendáveis para obras de abrigo	27
2.8	Impactos costeiros e estuarinos das variações climáticas	29
2.9	Comparação entre recomendações	33
3.1	Localização dos três marégrafos no Porto de Santos selecionados para compor a série para a caracterização da variação do nível do mar	36
4.1	Máximas preamares e mínimas baixa-mares registradas e tábuas de marés para mesmo evento	39
4.2	Médias Móveis de 19 anos – Máximas Preamares Anuais	40
4.3	Médias Móveis de 19 anos – Mínimas Baixa-mares Anuais	41
4.4	Nível das Máximas Preamares (01/1944 a 12/2007)	42
4.5	Nível das Mínimas Baixa-mares (01/1944 a 12/2007)	42
4.6	Nível Médio do Mar (01/1944 a 12/2007)	42
4.7	Nível do Mar (03/1953 a 10/1971)	43
4.8	Nível do Mar (10/1971 a 05/1990)	43
4.9	Nível do Mar (05/1990 a 12/2008)	44
4.10	Média Móvel das Máximas Preamares (03/1952 a 12/2007)	44
4.11	Média Móvel do Nível Médio (03/1952 a 12/2007)	45
4.12	Média Móvel das Mínimas Baixa-mares (03/1952 a 12/2007)	45
4.13	Média Móvel do Nível Médio (3º e 2º Períodos)	46
4.14	Amplitudes Máximas	47
4.15	Média Móvel das Amplitudes Máximas	47
5.1	Oscilações do nível médio medido no porto de Santos em Agosto de 1976	50
5.2	Perfis instantâneos de maré em 25/08/1976	51
5.3	Seção típica do cais com cota CODESP: -6,60m para a situação em 1892 e 2017	53
5.4	Seção típica terminal para graneis líquidos com cota CODESP: -7,00m	55
5.5	Seção típica do cais com cota CODESP: -13,50m	57
5.6	Comparação de cenários para seção típica do cais com cota CODESP: -10,00m.	59
5.7	Seção típica do cais Terminal de Contêineres com cota CODESP: - 13,00	60
5.8	Diferença de esforços causadas pela variação do ponto de acostagem	62

LISTA DE TABELAS

2.1	Taxas de Elevações para Projetos no Reino Unido	31
2.2	Projeção da elevação regional (em cm) relativas ao ano de 2000 para as costas da Califórnia, Oregon e Washington	32
2.3	Projeção de elevação do nível do mar utilizadas em projetos de engenharia costeira nos Estados Unidos – NOAA	32
2.4	Cidades brasileiras expostas ao risco de inundação para cenário futuro (2050)	34
3.1	Marégrafos e Períodos dos dados coletados	35
3.2	Constantes Harmônicas do Marégrafo da Torre Grande	37
4.1	Máximas Preamares e Mínimas Baixa-mares em 1990 e 2007	41
4.2	Elevações do Nível Médio do Mar de 03/1952 a 12/2007	45
5.1	Constantes harmônicas dos marégrafos estudados e do marégrafo da praticagem	52
6.1	Resumo dos impactos da elevação do nível do mar no Porto de Santos	67

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANTAQ	Agência Nacional de Transportes Aquaviários
CDS	Companhia Docas de Santos
CODESP	Companhia Docas do Estado de São Paulo
COPPE	Inst. Alberto Luiz Coimbra de Pós Graduação e Pesquisa de Engenharia
DHN	Diretoria de Hidrografia e Navegação
IPCC	International Pannel of Climate Change
NCA	National Climate Assessment (Estados Unidos)
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration (Estados Unidos)
OECD	Organization for Economic Co-operation and Development
PIANC	Permanent International Association of Navigation Congresses
TGG	Terminal de Granéis do Guarujá S.A.
UNCTAD	United Nations Conference on Trade and Development

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	12
2. CONCEITOS FUNDAMENTAIS	16
2.1 ONDAS DE MARÉ	16
2.1.1 Maré Astronômica.....	16
2.1.2 Maré Não Astronômica	19
2.1.3 Maré de Tempestade	20
2.2 ONDAS DE VENTO	22
2.3 ESTUÁRIOS.....	22
2.3.1 Tipos de estuário	23
2.3.2 Assoreamento nos estuários	23
2.3.3 Efeitos das marés nos estuários – Prisma de Maré.....	24
2.4 ENGENHARIA PORTUÁRIA.....	24
2.4.1 Classificação portuária	25
2.4.2 Estruturas portuárias.....	26
2.5 NÍVEL DO MAR E DINÂMICA PORTUÁRIA.....	28
2.6 RECOMENDAÇÕES INTERNACIONAIS SOBRE ELEVAÇÃO DO MAR EM PROJETOS DE ENGENHARIA COSTEIRA	31
2.7 IMPACTOS DA ELEVAÇÃO DO NÍVEL DO MAR EM PROJETOS DE ENGENHARIA COSTEIRA ...	33
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	35
4. RESULTADOS	39
4.1 AVALIAÇÃO DA PARCELA NÃO ASTRONÔMICA	39
4.2 AVALIAÇÃO DO NÍVEL MÉDIO DO MAR E AMPLITUDE DE MARÉ	41
5. DISCUSSÃO	48
5.1 IMPACTOS DA ELEVAÇÃO DO NÍVEL MÉDIO DO MAR NO PORTO DE SANTOS	52
5.1.1 Borda livre e cotas de estruturas de acostagem e de retroáreas	52
5.1.2 Aumento dos esforços sob as lajes	54
5.1.3 Velocidade das correntes nos taludes submersos e altura útil do canal, berços e bacias de evolução	55
5.1.4 Dragagem	57
5.1.5 Deterioração das estruturas emersas	58
5.1.6 Perda de eficiência dos cabeços de amarração	60
5.1.7 Perda de eficiência das defensas	61

5.1.8	Perda de eficiência dos equipamentos de descarga	62
5.1.9	Invasão da água em galerias de serviço	63
5.1.10	Perdas de eficiência de rampas / plataformas de embarque	63
5.1.11	Problemas operacionais nos pátios devido a inundação	63
5.1.12	Alteração de escalas de funcionamento	64
5.2	MARÉS E AMPLITUDES	64
6.	CONCLUSÕES	67
7.	REFERÊNCIAS	70
8.	REFERÊNCIAS ADICIONAIS	73

1. INTRODUÇÃO

O Porto de Santos é o porto brasileiro que possui maior movimentação de carga, tendo em 2016 movimentado 113.815.752 toneladas (Companhia Docas do Estado de São Paulo, 2016). Localizado na Ilha de São Vicente, ilha de Santo Amaro e Ilha Barnabé e na parte continental do município de Santos, o porto estende-se aproximadamente ao longo de 15km canal adentro e tem como limite norte o paralelo $23^{\circ}54'48''$. Desconsiderando-se as áreas comuns, o porto conta com 7,7 milhões de metros quadrados distribuídos entre 208 arrendatários (CODESP, 2017) e apresenta um calado máximo operacional que varia de 11,20 m em sua parte mais rasa a 13,20 m em seu trecho mais profundo, ambos em relação ao Nível de Redução estabelecido pelo DHN - Diretoria de Hidrografia e Navegação.

Inaugurado em 02 de fevereiro de 1892 pela Companhia Docas de Santos, o porto é um complexo intermodal que atualmente atende diversos tipos de carga e transporte (Companhia Docas do Estado de São Paulo, 2016). A Figura 1.1 mostra a localização do Porto de Santos na costa do Estado de São Paulo.

Figura 1.1 - Localização do Porto de Santos

Ao longo do tempo, o crescente influxo de embarcações buscou nas águas calmas do canal de Santos bom lugar para lançar âncora e providenciar o transporte de mercadorias e pessoas, por meio de provisórias passarelas de madeira que

avançavam canal adentro. Já no século XIX, o ciclo do café proporcionou à cidade de Santos o crescimento acelerado, gerando em paralelo a necessidade de instalações portuárias adequadas. Mesmo assim, as embarcações de alto mar continuavam a ficar a mais de cem metros dos pátios e armazéns, unidas a estes por passarelas de madeira. O governo imperial, pressionado pela necessidade da modernização do porto, fomentou concessões e em 1888 o grupo encarregado da concepção e das obras se tornou a Companhia Docas de Santos (CODESP, 2016) e deteve o direito de exploração do porto até 1980.

A CODESP foi responsável, até 1993, pelas funções de administração e da operação portuária, cuidando da movimentação de carga, da manutenção dos canais, dos acessos rodoviários e ferroviários e do controle do abastecimento de energia elétrica e água. Naquele ano, foi promulgada a Lei 8.630 de Modernização dos Portos. Assim, a gestão da movimentação de cargas foi transferida para a iniciativa privada, originando o arrendamento das áreas do porto. Em 2013, o novo marco regulatório (Lei de nº12.815) transferiu as funções de planejamento e concessão de áreas portuárias, que a CODESP acumulava, para a Agência Nacional de Transportes Aquaviários (ANTAQ) e para a Secretaria de Portos, diretamente submetida ao gabinete da Presidência da República. (JORNAL A TRIBUNA, 2015)

Recentemente, há um grande crescimento de produção científica a respeito da elevação do nível dos oceanos. Assim, trabalhos vêm sendo desenvolvidos em diferentes regiões do globo, buscando avaliar os impactos de tais alterações. Snoussi, Ouchani e Niazi (2008), utilizando-se dos dados de altimetria via satélite para estimar uma elevação do nível do mediterrâneo, alertam que a parte leste da costa mediterrânea do Marrocos, densamente urbanizada e economicamente importante, principalmente pela atividade turística, terá 24% de sua área inundada. Sierra, et al (2016) mostram a vulnerabilidade dos portos da costa catalã, que exposta a um cenário conservador de elevação do nível do mar da ordem de 0,47 m no intervalo entre 2005 a 2100, terá 13 de seus 43 portos com problemas de invasão da lâmina d'água para tempestades de média intensidade. Hoshino et al (2015) avaliam os efeitos da elevação do nível do mar combinada com tempestades em 2100 (1,90 metros) na região metropolitana de Tokyo, chegando a conclusão de que a não adaptação das estruturas portuárias e de defesa causará dano da ordem de

100 trilhões de yens, 270 vezes superior que os investimentos necessários a adaptação das mesmas.

Estudos envolvendo a região de Santos, como o de Harari e Camargo (1995), indicaram a subida do nível médio do mar, de 1944 a 1992, em 1,13 mm/ano. Por sua vez, Pezzoli et al (2013), através da série de dados de marégrafos (entre 1952 e 2007), obtiveram resultados que indicam a elevação do nível médio do mar na região de 2,5 mm/ano. Fortalecendo a justificativa de se estudar este fenômeno, as recomendações para a adaptação às mudanças climáticas na região costeira e a infraestrutura portuária brasileira também mostram que a região insular do município de Santos encontra-se em nível de vulnerabilidade (BRASIL, 2015).

Desta forma, faz-se necessária a análise de dados e informações sobre essa variação na região, para que seja constatada a significância deste aumento com a finalidade de fornecer subsídios à Autoridade Portuária e aos terminais interessados já que a variação no nível do mar implica em impactos diretos nos aspectos operacionais e estruturais do Porto de Santos.

O presente trabalho apresenta a análise dos dados dos marégrafos da Torre Grande, da Ilha Barnabé e do Terminal de Fertilizantes do Porto de Santos no período compreendido de 1944 a 2008. Assim, foram selecionados os dados de nível médio, máxima preamar diária, mínima baixa mar diária e amplitudes máximas diárias de maré. A estas séries foi aplicada a curva da média móvel de 18,61 anos correspondente ao ciclo de precessão dos nodos lunares de modo a reduzir a influência da periodicidade das grandes variabilidades de maré no conjunto estudado. Em paralelo, foi verificado o comportamento da maré não astronômica nas máximas preamares e mínimas baixa mares anuais.

Após explicada a metodologia e apresentados os dados, os resultados são comparados com as recomendações de agências estrangeiras para projetos de engenharia costeira relativas a elevação do nível do mar nas respectivas localidades. Buscando mapear a problemática decorrente da variação do nível do mar às partes interessadas do Porto de Santos, apresentam-se os diferentes impactos que os valores detectados causam nas estruturas portuárias.

Mediante a aplicação da variação do nível do mar encontrada nas cotas do Porto de Santos, discorre-se sobre os impactos específicos nas estruturas como píeres, cais, fundações, taludes submersos, canal de acesso, dragagem, equipamentos de defesa e acostagem, sistemas de amarração, equipamentos de descarga e também sobre questões operacionais.

Ao final, a conclusão mostra os resultados resumidos, bem como um quadro geral dos aspectos positivos e negativos da variação detectada.

2. CONCEITOS FUNDAMENTAIS

2.1 ONDAS DE MARÉ

Como sugere Melo (2016), a melhor definição de maré é "oscilações periódicas do nível das águas dos oceanos causadas pela ação da Lua e do Sol." No estudo de fenômenos marítimos, é possível decompor a maré registrada em um marégrafo em: maré astronômica e maré não astronômica.

2.1.1 Maré Astronômica

A maré astronômica é a parcela que é influenciada pela força de atração gravitacional entre o Sol, a Lua e a Terra e pela força centrífuga da Terra ao redor de seu baricentro. Esta tem caráter periódico em intervalos de repetição de 12 a 24 horas.

A oscilação da maré é definida resumidamente pela posição do Sol e da Lua em relação a Terra, suas distâncias e suas massas. A força de atração entre estas entidades causa o deslocamento das massas de água, ar e terra em ambos os corpos celestes e a força centrífuga do sistema o mantém em equilíbrio. Pela Lei da gravitação universal e por serem conhecidas as informações de distâncias e massas destes corpos, as intensidades e as direções das forças de atração são previsíveis. Força Gravitacional entre dois corpos:

$$F_g = \frac{G \cdot M_1 M_2}{R^2}$$

Onde M_1 e M_2 são as massas dos corpos, G é a constante universal da gravitação e R é a distância entre os dois centros de massa.

A força de atração que a Lua e que o Sol exercem no ponto mais próximo da Terra seria o suficiente para elevar o nível do mar apenas poucos centímetros. O que ocorre é que, em um determinado instante, toda a massa de água compreendida entre o ponto mais próximo e a metade do caminho ao ponto oposto sofre atração, assim, o acúmulo desta massa líquida faz com que aconteçam as preamares no ponto mais próximo da lua e no extremo oposto onde a força centrífuga atua. As baixa-mares ocorrem justamente no ponto onde a água foi "drenada", isto é, na

metade do caminho entre o ponto mais próximo da lua e o ponto mais distante. A Figura 2.1 mostra um esquema das forças de maré e do sentido do acúmulo das águas causado pela mesma.

Figura 2.1 – Forças de Maré. Fonte: http://www.oceannetworks.ca/sites/default/files/images/pages/schematics/tidal_vectors.gif

Apesar de contar com a previsibilidade astronômica, os efeitos produzidos nos oceanos são bastante diversos e variam em relação a cada local estudado. Além do ciclo de marés imposto pela rotação da Lua ao redor da Terra, existe o chamado Ciclo de Precessão dos Nodos Lunares, que conforme Alfredini e Arasaki (2014), é um importante período de repetição de marés.

Bradley (1728, apud HAIGH, 2011) explica que o plano da órbita da Lua ao redor da Terra está inclinado $5^{\circ}9'$ do plano da Terra ao redor do Sol e a linha de intersecção destes planos é chamada de linha dos nodos. O período de tempo decorrido entre dois cruzamentos sucessivos da órbita da Lua com o plano da eclíptica (plano da órbita da Terra ao redor do Sol), numa mesma fase da Lua, tem duração de 18,61 anos.

A combinação entre as marés solares e as marés lunares produz as marés de sizígia e de quadratura. As forças do sistema Terra-Sol são da ordem de 46% das resultantes do sistema Terra-Lua. As Figuras 2.2 e 2.3 mostram ilustrações simplificadas (com declinações nulas) da formação das marés de sizígia e quadratura. As marés de sizígia originam as maiores amplitudes de maré (maiores

preamares e menores baixa-mares), pois as forças geradoras lunar e solar atuam no mesmo plano. As marés de quadratura, as forças geradoras lunar e solar atuam ortogonalmente, o que resulta em menores amplitudes de maré (menores preamares e maiores baixa-mares).

Figura 2.2 – Esquema de formação da sizígia de lua nova e quadratura de quarto crescente. Fonte: ALFREDINI E ARASAKI, 2009.

Figura 2.3 – Esquema de formação da sizígia de lua cheia e quadratura de quarto minguante. Fonte: ALFREDINI E ARASAKI, 2009.

Para a estimativa das marés, consideram-se duas premissas básicas que definirão a estimativa das marés:

- A órbita da Lua ao redor da Terra e a da Terra ao redor do Sol não são perfeitamente circulares, são elípticas.
- O plano da órbita da Lua ao redor da Terra está inclinado cerca de $5^{\circ}9'$ do plano de órbita da Terra ao redor do Sol.

Desta forma, existem variações de intensidade das forças gravitacionais causadas pela diferente composição de distâncias relativas e massas. A essas combinações atribui-se o nome de componentes harmônicas da maré. Apesar da complexidade do fenômeno e da impossibilidade de previsão exata do mesmo, o conhecimento de que a mecânica da formação das marés pode ser representada matematicamente por séries harmônicas é de fundamental importância para que se possam aproveitar os registros de marés reais na previsão do fenômeno.

Como lembra Melo (2016), a complexidade da geometria dos oceanos faz com que as ondas de maré desenvolvam pontos onde a variação vertical do nível é nula. Estes são chamados pontos anfidrômicos.

O fatores não astronômicos também podem ocasionar a elevação ou abaixamento do nível do mar, bem como o atraso e o adiantamento dos instantes de ocorrência das preamares ou baixa-mares, o que causará diferença entre os valores registrados e os valores das previsões das tábuas de maré. Além disso, é importante salientar para este trabalho que tal fenômeno é frequente nos portos ao sul do Cabo Frio (RJ) (BRASIL, 1963), justamente a área em que se localiza o Porto de Santos.

2.1.2 Maré Não Astronômica

A maré não astronômica é a parcela entre a maré astronômica prevista e a maré efetivamente registrada no momento, e varia de acordo com as condições climáticas locais, expressas fundamentalmente pela ação do vento e pela pressão atmosférica.

Por exemplo, quando o vento sopra do oceano para a costa tem o efeito de represamento da maré, ao passo que no rumo oposto, ou seja, quando sopra da costa para o oceano pode reduzir a amplitude das marés. Em situações análogas, as

consequências da força inercial de Coriolis (efeitos explicados pela espiral de Ekman) podem causar variação da direção das correntes superficiais e submersas independentemente da direção do vento.

As baixas pressões atmosféricas provocam efeito de elevação das marés, enquanto as altas pressões atmosféricas provocam rebaixamento da mesma. Desta forma, o efeito combinado do vento soprando predominantemente do oceano para a costa com baixa pressão atmosférica provoca a chamada maré não astronômica positiva, que constitui risco de inundações para as regiões costeiras. Por sua vez, o efeito do vento soprando predominantemente da costa para o mar associado à alta pressão atmosférica provoca a chamada maré negativa, que resulta em baixas profundidades na região costeira, trazendo problemas para a navegação.

“As costas sul e leste do Brasil, até o sul da Bahia, estão sujeitas aos efeitos meteorológicos em intensidade decrescente, em função da penetração das frentes frias pelo avanço do Anticiclone Polar Atlântico sobre o Anticiclone Tropical Atlântico. Na Baía e Estuário de Santos, esses efeitos, popularmente conhecidos como ressacas, podem sobrelevar o nível médio do mar previsto astronomicamente de mais de 0,5 m, chegando a quase 1 m nas áreas mais confinadas e rasas dos estuários, produzindo rebaixamentos de ordem de grandeza ligeiramente menores” (ALFREDINI; ARASAKI, 2014, p.157).

2.1.3 Maré de Tempestade

O fenômeno popularmente conhecido como ressaca marítima é o aumento do nível do mar provocado pela elevação da maré acompanhado de ondas com amplitude maior que a normal (BITENCOURT; QUADRO; CALBETE, 2002). Tal fenômeno é originado pelas forças do vento e pela variação da pressão atmosférica associadas a tempestades.

Durante uma ressaca as ondas, em conjunto com a elevação da maré, na maioria das vezes provocam danos ao atingirem áreas urbanizadas devido à grande energia que carregam. As Figuras 2.4 e 2.5 mostram o comportamento intenso do mar ao atingir a costa em uma ressaca em 21/08/2016 e 28/10/2016 respectivamente na cidade de Santos, em São Paulo. Nota-se a destruição parcial do guarda-corpo e do passeio.

Figura 2.4 – Ressaca na Ponta da Praia de Santos – SP. Foto: Carlos Martiniano/Arquivo Pessoal – Globo.com

<http://s2.glbimg.com/rPpVSyB52Xw50_DScOvvLb44D0s=/620x465/s.glbimg.com/jo/g1/f/original/2016/08/21/ressaca2.jpg >

Figura 2.5 – Ressaca na Ponta da Praia de Santos – SP. Foto: Solange Freitas – Globo.com

<http://s2.glbimg.com/uXyDVMS3MKC9kx61461QcbS7WD8=/620x465/s.glbimg.com/jo/g1/f/original/2016/10/28/6_XYCXG49.jpg >

2.2 ONDAS DE VENTO

As ondas oceânicas de superfície, popularmente chamada ondas do mar, tem como origem o vento. No projeto e planejamento portuários estes elementos são considerados, visto que a movimentação da água é fator elementar para o dimensionamento e locação de boa parte das estruturas de um porto.

O impacto das ondas nas estruturas portuárias possuem não apenas caráter dinâmico quanto a periodicidade mas também em relação a quantidade de energia. Alfredini e Arasaki lembram que a energia total em um comprimento de onda por área superficial é:

$$E = \frac{1}{8} \rho g H^2$$

onde ρ é a massa específica da água, g é a gravidade, e H é a altura de onda. Desta forma, qualquer variação na altura da onda representa grande influência na energia de onda. É importante ressaltar que outros fatores determinantes para a engenharia costeira estão relacionados aos fenômenos arrebentação, difração, reflexão, empolamento e refração das ondas resultados da redução da profundidade e das características geométricas do leito costeiro.

De modo geral, a incidência de ondas é tão importante para a constituição de um porto que, dependendo da intensidade e do regime das mesmas, pode inviabilizar o projeto. Não é de se estranhar que as obras de maior expressão e consequentemente mais onerosas de um porto costumam ser as obras de abrigo como quebra-mares, molhes, guias-correntes e outras.

2.3 ESTUÁRIOS

A costa continental é constantemente modelada pelo oceano, pelas massas continentais e pela atmosfera. Além da complexidade de estar presente no ambiente costeiro, as Ilhas de São Vicente e Santo Amaro, onde situa-se o objeto deste trabalho, localizam-se em um estuário. Os estuários são localidades costeiras onde corpos fluviais deságuam nos mares e oceanos. Desta maneira, cada estuário possui características próprias dependendo de sua localização geográfica, de suas

formações geológicas, do regime do rio predominante, da incidência marítima, da presença ou ausência de ilhas próximas e de diversos outros fatores.

2.3.1 Tipos de estuário

Ainda de acordo com a Open University Course Team (1999), os estuários são divididos, em função da intensidade da intrusão salina, em três tipos: estuários de cunha salina; estuários parcialmente mistos; estuários bastante mistos.

Os estuários de cunha salina são aqueles que ocorrem em locais onde a amplitude de maré é muito pequena, desta forma a intrusão salina praticamente fica limitada à zona inferior do estuário, permitindo que a água doce, menos densa, forme uma camada que se mantém acima da cunha salina. Neste tipo de estuário, a diferença de sentidos entre a vazão do rio e a intrusão salina faz com que ocorra turbulência entre ambas camadas, o que impede a mistura entre as duas.

Os estuários parcialmente mistos ocorrem quando um rio desemboca em uma região marítima que apresenta uma amplitude de maré moderada. A amplitude é suficiente para que haja considerável turbulência entre a descarga do rio e a intrusão marítima, mas que ainda se percebem duas camadas distintas, sendo a superior água doce e a inferior água salgada. Este fenômeno produz velocidades consideravelmente superiores às aquelas que acontecem nos estuários de cunha salina.

Por fim, os estuários bastante mistos são aqueles em que a amplitude da maré da região é grande o suficiente a ponto da quantidade de entrada de água marinha ocupar todo o perfil do estuário, do fundo até a superfície, fazendo com que a mistura ocorra não no sentido vertical, mas no horizontal. Nestes casos, não há a separação da camada de água doce e da camada de água salgada, a mistura acontece em todas elas na horizontal

2.3.2 Assoreamento nos estuários

O assoreamento nestas regiões varia para cada tipo de estuário, conforme resume a Open University Course Team (1999), e de suas características geológicas, basicamente por depender da intensidade com a qual o rio descarrega sedimentos no leito estuarino.

Os estuários de cunha salina possuem maior assoreamento do leito, pois a descarga do rio principal é predominante em relação à intrusão da cunha salina. Desta forma, a água carrega os sedimentos do rio e por não encontrar resistência do oceano, o material acaba sendo descarregado no mesmo. Nos estuários parcialmente mistos, as vazões do rio, ao encontrarem a cunha salina de grande intensidade, geram turbulência, fazendo com que a água marinha e os sedimentos fluviais se mantenham constantemente em suspensão, elevando a turbidez da água. Devido à circulação horizontal que acontece nos estuários bastante mistos, os sedimentos do corpo de água doce tendem a acumular-se na margem esquerda e os sedimentos marinhos, na margem direita considerando o sentido de montante a jusante do rio.

2.3.3 Efeitos das marés nos estuários – Prisma de Maré

Conforme Alfredini e Arasaki, (2014), o principal estuário da baixada santista apresenta várias embocaduras, sendo assim, apresenta tendência de redução das correntes de maré e amplificação das alturas de maré. Vale lembrar que as correntes de maré são periódicas e de orientação variável.

A expressão prisma de maré é utilizada para caracterizar o volume de água salgada que penetra em um estuário no intervalo entre uma baixa-mar e uma preamar.

2.4 ENGENHARIA PORTUÁRIA

A Engenharia Portuária é um conjunto de técnicas aprimoradas ao longo da experiência humana, que trata de garantir bom funcionamento e durabilidade às obras destinadas a atividade das embarcações quando atracadas, desde o momento de sua aproximação até o retorno ao mar aberto.

Projetos portuários utilizam como variáveis diversos elementos como quantidade de energia das ondas, estabilidade do terreno costeiro, carregamentos, embarcações-tipo entre outros. Destacam-se neste conjunto o nível do mar e sua variação natural ao longo dos meses, as quais são premissas para todo e qualquer tipo de projeto costeiro.

2.4.1 Classificação portuária

Segundo Alfredini e Arasaki (2014), os portos podem ser classificados quanto sua natureza, localização e utilização:

Quanto a natureza, podem ser:

- Naturais: as condições naturais não geram necessidade de vultuosas obras de abrigo e acesso às estruturas de acostagem para a embarcação tipo;
- Artificiais: as condições naturais determinam necessidade de obras de abrigo e acesso às estruturas de acostagem para a embarcação tipo;

Quanto a localização:

- Portos exteriores: aqueles que se situam diretamente na costa;
- Portos interiores: localizam-se em estuários, em lagunas ou no interior de deltas;
- Portos ao largo: são situados ao largo da zona de arrebentação, distantes de costa podendo até não ser providos de abrigo.

Quanto a utilização:

- Portos de Carga Geral: movimentam tipos diferentes de carga.
- Portos Especializados: movimentam predominantemente determinados tipos de carga, como por exemplo, granéis, pesqueiros, marinas, militares, etc.

A composição de um porto se dá por instituições que são muitas vezes independentes, como terminais privados, empresas de serviços, corporações militares, entidades alfandegárias, entre outras, tornando-se assim um complexo sistema com interesses distintos e muitas vezes conflitantes. Apesar da independência das partes, a comunicação e intersecção entre elas é essencial, o que faz com que a gestão de interesses seja exercida por uma autoridade portuária ou administrador portuário no caso de terminais de uso privado.

2.4.2 Estruturas portuárias

Considerando a intrínseca relação entre o nível do mar, as marés e os projetos das estruturas portuárias, apresentam-se na sequência os principais componentes de um porto e a relação direta de seus critérios de dimensionamento com o nível do mar.

2.4.2.1 Canal de acesso

O canal de acesso é a via aquaviária de aproximação das embarcações que chegam a um porto. Sua profundidade é tradicionalmente calculada de forma empírica, resultante do somatório de diversos aspectos. O nível do mar é a principal variável visto que “[...] determina a situação crítica sob a qual se dará a obtenção da profundidade requerida pela embarcação.” (ALFREDINI, ARASAKI, 2009).

A Figura 2.6 apresenta a discretização das parcelas do cálculo da profundidade requerida em um canal de acesso e a relação destas parcelas com o nível de maré selecionado.

Figura 2.6 – Parcelas constituintes da profundidade requerida em um canal de acesso. Fonte:

ALFREDINI, 2009, p.332

2.4.2.2 Bacia de evolução e berço de atracação

A ANTAQ (Brasil, 2009) define bacia de evolução como um local no espaço aquático nas proximidades do cais, dotado de dimensão e profundidade adequadas, para manobrar as embarcações” e berço de atracação como um espaço no cais, entre cabeços de amarração, em que o navio pode atracar para operar, embarcar e desembarcar, cargas em segurança”.

Thoresen (2010) ressalta que tanto a bacia de evolução quanto os berços de atracação possuem como condição de dimensionamento vertical a segurança da manobrabilidade das embarcações. Sendo assim, deve ser utilizada como condição limite a mínima maré astronômica nos portos localizados em regiões onde as ondas de maré possuem influência.

2.4.2.3 Obras de Abrigo

As obras de abrigo possuem como principal função proporcionar proteção às embarcações contra as ondas geradas pelo vento. As obras de abrigo podem ser espigões, quebra mares e molhes. Independentemente do material em que é projetada, Alfredini e Arasaki (2009) sugerem que a cota de sua crista esteja a 1,25 vezes a onda de projeto (H_{proj}) do nível de preamar máxima, de modo a reduzir ao máximo as probabilidades de ocorrer elevação de ondas superior à cota da crista. A Figura 2.7 mostra as alturas mínimas recomendáveis.

Figura 2.7 – Alturas mínimas recomendáveis para obras de abrigo. Fonte: ALFREDINI, 2009, p.372

2.4.2.4 Atracadouros e equipamentos de acostagem

Estas estruturas são as que ficam mais próximas a uma embarcação em repouso. Tem como função garantir a distância de aproximação ótima do navio às áreas

secas, para que este seja carregado ou descarregado com rapidez e segurança. Os grandes esforços que suas estruturas sofrem fazem com que os critérios de dimensionamento sejam rigorosos. No Brasil, a NBR nº13.209/14 orienta os projetos de acostagem.

Equipamentos de acostagem também reduzem o risco de danos aos navios durante sua operação em um terminal. Quando estes desempenham a função de amortecedores, são comumente chamados de defesas, e quando estes se dedicam a suportar as amarras que restringirão os movimentos da embarcação, são geralmente nomeados de cabeços de amarração. Para estas duas famílias de equipamentos de acostagem, existem diversas especificações e fornecedores que atendem as solicitações de todos os tipos de embarcação e de portos.

2.4.2.5 Retroporto

É nesta região onde localizam-se os pátios de armazenamento de carga, é onde o maquinário para a operação de carga e descarga trabalha e onde estão os acessos ferroviários e rodoviários aos terminais. Geralmente é onde se localizam os escritórios administrativos dos terminais, as oficinas de manutenção, depósitos operacionais, a sede da autoridade portuária local, alfândegas e escritórios governamentais de controles como, no Brasil, a Polícia Federal, a Vigilância Sanitária, entre outros.

2.5 NÍVEL DO MAR E DINÂMICA PORTUÁRIA

Como explicado anteriormente, os projetos portuários têm suas condicionantes fundamentadas em aspectos físicos e ambientais complexos. Desta forma qualquer hipótese de variação do nível do mar estará sempre associada não só à redução da borda livre, mas a outras problemáticas. Muitas vezes, impactos aparentemente considerados favoráveis à operação do porto são na verdade grandes problemas, pois alteram condições não tão evidentes que prejudicam a operação do mesmo. Os fatores hidrodinâmicos que impõe condições às operações portuárias são praticamente as ondas e as marés. Estes dois elementos são principalmente impulsionados pela meteorologia e pelos movimentos da Lua e do Sol; desta forma, incertezas e variações devem ser esperadas, dada a irregularidade e inconstância nos efeitos meteorológicos.

De acordo com o Open University Course Team (1999), nos estuários parcialmente mistos as vazões do rio, ao encontrar a cunha salina de grande intensidade geram turbulência, fazendo com que a água marinha e os sedimentos fluviais se mantenham constantemente em suspensão, elevando a turbidez da água. Desta forma, em um estuário como o de Santos, a elevação da preamar aumentará o prisma de maré, fazendo com que a zona de turbidez máxima seja deslocada para montante, prejudicando assim as instalações mais distanciadas da entrada do canal de acesso, já que estarão expostas à maior quantidade de sedimentos e, conseqüentemente, à redução da altura útil de canais e berços de atracação. Em contrapartida, é esperado que a elevação do nível da preamar proporcione ao canal de acesso maior altura útil na região da barra, o que facilita a navegação nas áreas do porto mais próximas ao mar.

A elevação da preamar faz com que inundações nas terras úmidas (manguezais) sejam cada vez mais frequentes, reduzindo a profundidade do canal pelo aporte de materiais que se dará quando a maré de vazante ocorrer. A mesma elevação causa inundações na retroárea do porto, prejudicando o sistema de drenagem e causando eventuais paralisações operacionais, exigindo a instalação de obras de drenagem de diques e comportas ou até mesmo obras de alteamento da borda livre dos cais.

A elevação do nível do mar aumentará a intrusão salina, podendo comprometer a captação de água para o aproveitamento humano e industrial. Outra consequência da elevação é a redução da faixa de praia existente; esta redução, além dos problemas causados à sociedade e ao município, causa erosão e deposição deste material na barra, reduzindo a altura útil das áreas próximas, prejudicando as manobras e a navegação de modo geral.

Os aspectos relacionados a elevação da baixa-mar, se isoladamente analisados, são positivos, pois representam o limite operacional do porto, bem como do ambiente estuarino. De acordo com Kim (2010), o benefício geralmente é a maior oportunidade dos portos em receber navios com maiores calados, porém o presente trabalho mostrou que o nível do mar está subindo e não apenas a baixa-mar. Desta forma, o conjunto dos impactos causados por essa elevação no Porto de Santos seguramente é prejudicial.

Para todas estas situações, existem intervenções e obras específicas que reduzem seus impactos negativos. Considerando que a variação do nível do mar é estudada por pesquisadores e por agências governamentais e não governamentais de atuação costeira, é normal estipularem-se critérios a serem considerados em futuros projetos de modo a orientar os projetistas e garantir a funcionalidade da obra em questão.

2.6 RECOMENDAÇÕES INTERNACIONAIS SOBRE ELEVAÇÃO DO MAR EM PROJETOS DE ENGENHARIA COSTEIRA

Thoresen (2010) expõe que a elevação do nível do mar entre os anos de 2010 e 2060 está prevista para 0.25 m a 0.30 m. O Defra – Departament for Environment, Food and Rural Affairs do Reino Unido (2010 apud PIANC, 2014) apresentou recomendações de taxas de elevação do nível do mar a serem considerados em projetos de Engenharia Costeira com relação à elevação do nível do mar na costa da Grã Bretanha. A Tabela 2.1 mostra estes valores:

Tabela 2.1 – Taxas de Elevações para Projetos no Reino Unido

Período de Tempo	Taxa Baixa (mm/ano) / elevação do mar acumulada *	Taxa Moderada (mm/ano) / elevação do mar acumulada *	Taxa Alta (mm/ano) / elevação do mar acumulada *
1990 – 2025	2,5/0,09	3,5/0,12	4,0/0,14
2025 – 2055	7,0/0,30	8,0/0,36	8,5/0,40
2055 – 2085	10,0/0,60	11,5/0,71	12,0/0,75
2085 – 2115	13,0/0,99	14,5/1,14	15/1,21

Fonte: Defra, 2010

Neste mesmo relatório foram apresentadas as recomendações originadas pelos estudos da US National Academy of Science/National Research Council, para fundamentar projetos na região costeira dos Estados Unidos. A média destas recomendações é que em 2100 o nível do mar estará cerca de 62 a 93 cm acima do que estão hoje, variando de acordo com sua localização. A Tabela 2.2 mostra estas recomendações:

Tabela 2.2 – Projeção da elevação regional (em cm) relativas ao ano de 2000 para as costas da Califórnia, Oregon e Washington

Localização	Elevação acumulada (cm)		
	Projeção para 2030	Projeção para 2050	Projeção para 2100
Seattle	6,6 +/- 5,6	16,6 +/- 10,5	61,8 +/- 29,3
Newport	6,8 +/- 5,6	17,2 +/- 10,3	63,3 +/- 28,3
São Francisco	14,4 +/- 5,0	28,0 +/- 9,2	91,9 +/- 25,5
Los Angeles	14,7 +/- 5,0	28,4 +/- 9,0	93,1 +/- 24,9

Fonte: National Research Council, 2012 (Adaptado)

Entretanto, a NOAA - National Oceanic and Atmospheric Administration (Estados Unidos), resumiu as taxas de elevação do nível do mar que estavam sendo utilizadas em território americano em 2011 por variadas entidades estatais de planejamento, apresentadas na Tabela 5.3.

Tabela 5.3 – Projeção de elevação do nível do mar utilizadas em projetos de engenharia costeira nos Estados Unidos - NOAA

Localização	Projeção para 2100 da elevação acumulada do nível do mar (m)
São Francisco	1,75
Califórnia	1,40
Maryland	1,05
Maine	0,60

Fonte: NOAA, 2012 (Adaptado)

A NCA - National Climate Assessment (2014, Estados Unidos), por sua vez, recomenda que a elevação total do nível do mar a ser considerado em 2100 está no intervalo de 0,33 m a 1,32 m. Vellinga (2009), em atendimento ao Delta Committee (Holanda), indica que a elevação do nível médio global se encontrará em um intervalo de 0,55m a 1,10m.

As recomendações australianas (ENGINEERS AUSTRALIA, 2012), para serem aplicadas a projetos de Engenharia Costeira, estimam elevação do nível do mar em 2095 dentro do intervalo de 0,18 m a 0,79 m em relação a 2012. No Caribe, as recomendações a serem seguidas preveem uma elevação do nível do mar de 1,00 m a 2,00 m para o final de 2100 em relação a 2010 (SIMPSON et al, 2010). O Ministério para o Meio Ambiente da Nova Zelândia (2008), em seu guia para alterações climáticas, recomendou que os projetos de Engenharia Costeira utilizem 0,80 m como elevação acumulada em 2100 em relação a 2008, além disso aconselha a utilização da taxa de 10 mm/ano para planejamentos mais longevos. A Figura 2.9 compara as recomendações, bem como a taxa de elevação encontrada neste trabalho.

Figura 2.9 - Comparação entre recomendações

Após a definição de uma taxa de elevação que seja condizente com as características da localização do Porto de Santos, é necessário listar e entender quais impactos são esperados dada a elevação do nível médio do mar. Trabalhos a respeito dos impactos causados pela elevação do nível do mar no Porto de Santos foram realizados por Alfredini, Arasaki e Pezzoli (2015) e pela Secretaria de Assuntos Estratégicos da Presidência da República (BRASIL, 2015).

Buscando explorar quais os problemas originados pela elevação do nível médio do mar no Porto de Santos, e considerando as taxas de elevação encontradas neste trabalho, são relacionados, a seguir, os principais impactos.

2.7 IMPACTOS DA ELEVAÇÃO DO NÍVEL DO MAR EM PROJETOS DE ENGENHARIA COSTEIRA

Ao prever os efeitos desta elevação nas regiões costeiras mais populosas do planeta, Nicholls et al (2008) propõem para a OECD uma classificação de cidades portuárias com alta exposição a eventos climáticos extremos, considerando inundações originadas pela elevação do nível do mar de 50 cm em 2070. A tabela 5.4 apresenta as aglomerações urbanas brasileiras estudadas por Nicholls e o montante de bens expostos a este risco.

Tabela 2.4 - Cidades brasileiras expostas ao risco de inundação para cenário futuro (2070)

Aglomeração Urbana	Bens expostos (US\$ Bilhões)
Baixada Santista (Santos)	0,76
Fortaleza	0,51
Grande Vitória	13,52
Maceió	0,57
Porto Alegre	1,30
Recife	1,12
Rio de Janeiro	4,13
Salvador	0,38

Fonte: NICHOLLS, et al, 2008 (Adaptado)

As consequências econômicas destes fenômenos de mudanças climáticas e elevação do nível do mar no mercado da navegação foram organizadas em dois grupos, como propõe o relatório da UNCTAD (2009): impactos em equipamentos e infraestrutura marítima e impactos nos serviços de transporte. As considerações tecidas para o primeiro grupo citam a deterioração de áreas pavimentadas em portos, danos causados aos guindastes e outros equipamentos de metal, o aumento de consumo de energia a fim de manter a refrigeração de cargas e ambientes, danos aos terminais, interrupção a corrente de suprimentos e outros. Já o segundo grupo contempla as dificuldades enfrentadas para que sejam mantidos os graus de segurança da navegação e impactos na logística do transporte marinho.

Assim como o UNCTAD, o Relatório da Secretaria de Assuntos Estratégicos da Presidência da República (BRASIL, 2015), tece recomendações institucionais e econômicas para a infraestrutura costeira e portuária brasileira. Além disso, estima que os custos de adaptação das estruturas do Porto de Santos a serem executadas até 2050 é de aproximadamente 1 bilhão de Reais.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

O presente trabalho apresenta a avaliação da média móvel da parcela não astronômica das marés bem como dos dados de nível do mar de três marégrafos localizados no Porto de Santos, e tem como objetivo analisar, do ponto de vista da Engenharia Portuária, os prováveis impactos da alteração do nível do mar nas estruturas do Porto de Santos.

Um dos equipamentos utilizados para o registro do nível do mar é o marégrafo. Este equipamento capta a variação do nível de maré ao longo do tempo em um determinado ponto. Atualmente existem diferentes tipos de marégrafos, submersos ou emersos, mecânicos e eletrônicos. O Porto de Santos conta com diversos marégrafos, alguns de propriedade das operadoras dos terminais e outros pertencentes as autoridades portuárias.

Com o objetivo de melhor caracterizar o regime do nível do mar na região estudada, percebeu-se que, dos marégrafos existentes, o da Torre Grande e o do Terminal de Fertilizantes da Conceiçãozinha foram os que apresentaram a maior série contínua de dados. O marégrafo da Torre Grande possui medições de 01/01/1944 até 31/12/1990, já o do Terminal de Fertilizantes iniciou suas operações em 01/01/1993. A existência de uma lacuna de 2 anos consecutivos demandou a utilização dos dados do marégrafo da Ilha de Barnabé, situado a cerca de 4 km canal adentro, de modo a completar a base de dados e, conseqüentemente, possibilitar a aplicação da análise da média móvel. A Tabela 3.1 apresenta os marégrafos selecionados para a caracterização do período estudado.

Tabela 3.1 – Marégrafos e Períodos dos dados coletados

Marégrafo	Período
Torre Grande	01/01/1944 a 31/12/1990
Ilha de Barnabé	01/01/1991 a 31/12/1992
Terminal de Fertilizantes	01/01/1993 a 31/12/2007

É importante destacar que a proximidade geográfica dos marégrafos contribui para a melhor caracterização da área de estudos, e o fato de estarem referenciados ao mesmo *datum* tornam desnecessárias as correções nas elevações. Apesar do relativo distanciamento dos equipamentos, o atraso das ondas de maré entre as

estações não foi considerado pois a presente análise não objetiva indicar os instantes em que ocorreram as preamares e as baixa mares. A posição dos marégrafos é apresentada na Figura 3.1:

Figura 3.1 – Localização dos três marégrafos no Porto de Santos selecionados para compor a série para a caracterização da variação do nível do mar.

Os dados do marégrafo da Torre Grande, do Terminal de Fertilizantes e da Ilha Barnabé foram fornecidos pela CODESP. Os dados da Ilha Barnabé tiveram que ser transcritos das folhas originais de medição para a versão eletrônica, os demais já se encontravam em planilhas eletrônicas.

Após a coleta e tratamento dos dados, optou-se por realizar duas avaliações:

- a) Avaliação da parcela não astronômica da maré correspondente às máximas preamares e mínimas baixa-mares anuais de 1945 a 2007;
- b) Avaliação da variação do nível médio do mar e amplitude de maré no período de 18/03/1952 a 31/12/2007;

A diferença entre os períodos se deu pelo fato de que a análise (a) tomou como base a data de 1945 (mais antiga data com registros) e cessou na data de 2007, contemplando um total de 62 anos e a análise (b) tomou como base a data de

31/12/2007 e retroagiu exatamente três ciclos de 18,61 anos, que correspondem a ciclos de precessão dos nodos para reduzir a influência da repetição de marés.

Para a avaliação da parcela não astronômica da maré nas máximas preamares e mínimas baixa-mares anuais de 1945 a 2007 foram identificados os horários em que ocorreram valores máximos e mínimos de cada ano nos marégrafos citados anteriormente, após tal constatação foram interpolados os valores correspondentes nas tábuas de marés fornecidas pela Diretoria de Hidrografia e Navegação (DHN). Foi utilizada a interpolação linear para determinar os valores correspondentes na tábuas de marés pois o valor interpolado está entre um pico e um vale consecutivo e nunca entre dois picos ou dois vales consecutivos, o que certamente exigiria que a interpolação senoidal. Desta forma, a interpolação linear apresenta valores muito próximos a interpolação senoidal e até mesmo da curva harmônica da maré prevista.

Os valores das tábuas de marés para o Porto de Santos foram previstos utilizando-se as constantes harmônicas do marégrafo da Torre Grande (Latitude: 23.571s; Longitude 46.183w; extraídas do período de 02/01/1956 a 22/12/1956), encontrados nas publicações DG-2 e DG-4 da Diretoria de Hidrografia e Navegação, que são apresentados na tabela 3.2.

Tabela 3.2 – Constantes Harmônicas do Marégrafo da Torre Grande

Componente Harmônica	Velocidade	H	G
O1	13,9430356	11,67	82,58
P1	14,9589314	2,34	137,26
K1	15,0410686	6,44	143,62
N2	28,4397295	5,54	149,94
M3	28,9841042	36,42	87,80
S2	30,0000000	22,51	90,79
K2	30,0821373	7,43	81,90

Fonte: Marinha do Brasil – Centro de Hidrografia da Marinha, BNDO, 2017

Ao longo do período de 1912 a 1969, o Observatório Nacional calculava numericamente as previsões de maré utilizando-se da máquina de Kelvin. A partir de 1969, a DHN passou a calcular as previsões de maré utilizando-se do computador IBM/1130 da COPPE da Universidade Federal do Rio de Janeiro.

Os dados de 1945 a 2007 estão referenciados pela cota CDS (zero hidrográfico da Autoridade Portuária - ZH). Os dados oriundos das tábuas de marés estão

referenciados pela cota DHN (nível de redução da Autoridade Marítima - NR), portanto foram transformadas todas as cotas em CDS da seguinte maneira:

- De 1944 a agosto de 1960: NR - ZH = + 0,745 m
- De setembro de 1960 a fevereiro de 1970: NR - ZH = + 0,689 m
- De março de 1970 a dezembro de 1980: NR - ZH = + 0,739 m
- De janeiro de 1981 a 2007: NR - ZH = + 0,719 m

Para a avaliação da variação do nível médio do mar e amplitude de maré obteve-se um período extenso de medições que logo mostrou deficiências no que tange à uniformidade dos dados, já que alguns marégrafos tiveram suas operações interrompidas devido a problemas de natureza diversa. A seguir são listados os períodos de falhas mais relevantes encontrados nesta série.

- 01/11/1991 a 31/03/1992 (455 dias);
- 01/02/1993 a 31/05/1993 (119 dias) e
- 01/04/1996 a 14/05/1996 (43 dias).

Apesar da existência destes períodos de falhas, considerou-se que os mesmos possuem pouca significância na análise da média móvel realizada neste trabalho, visto que compõe pequena parcela da totalidade do intervalo da série (607 dias, ou seja, 3,0% da amostra).

A série considera um intervalo de 20377 dias, que contempla o período de 18/03/1952 a 31/12/2007, o número de dados disponíveis são: 19881 para as máximas preamares diárias, 19886 para as mínimas baixa-mares diárias e 19931 para o nível médio diário.

4. RESULTADOS

4.1 AVALIAÇÃO DA PARCELA NÃO ASTRONÔMICA

A Figura 4.1 apresenta as máximas preamares e mínimas baixa-mares registradas, bem como os valores previstos pela tábua de marés para os horários em que os máximos observados ocorreram.

Figura 4.1 – Máximas preamares e mínimas baixa-mares registradas e tábuas de marés para mesmo evento

Após a interpolação dos valores das tábuas de marés, foram calculadas as parcelas constituintes para cada maré (máxima preamar anual ou mínima baixa-mar anual) registrada. A diferença entre a maré registrada e a previsão da maré astronômica no mesmo instante é atribuído o nome de maré não astronômica. Tal resíduo é produto das condições atmosféricas (pressão, vento, temperatura).

Em função da grande dispersão dos pontos obtidos, optou-se pela aplicação da média móvel para cada conjunto de 19 anos de dados (aproximação relativa aos ciclos de precessão dos nodos, apresentados anteriormente) reduzindo assim a interferência da repetição de marés. A escolha deste período de repetição é justificada pela sua grande influência nos valores de maré e pela grandeza condizente com a dos períodos de retorno escolhidos para obras de engenharia.

Analisar a série em intervalos de repetição menores produziriam resultados com pouca aplicação prática do ponto de vista da engenharia costeira principalmente por evidenciar oscilações menos relevantes do que o ciclo de precessão dos nodos.

As Figuras 4.2 e 4.3 apresentam respectivamente as médias móveis das máximas preamares e mínimas baixa-mares anuais, decompostas em maré registrada, maré astronômica e o resíduo não astronômico, ao decorrer do período analisado.

Figura 4.2 – Médias Moveis de 19 anos – Máximas Preamares Anuais

Figura 4.3 – Médias Moveis de 19 anos – Mínimas Baixa-mares Anuais

A avaliação das parcelas não astronômicas das séries de máximas premares e mínimas baixa-mares anuais, após a aplicação da média móvel de 19 anos, permite-nos constatar que nos últimos 19 anos analisados existe tendência clara de elevação de todas as cotas. A Tabela 4.1 apresenta a elevação dos valores máximos anuais no último período da série analisada.

Tabela 4.1 – Máximas Preamares e Mínimas Baixa-mares em 1990 e 2007

Maré	1990	2007	Incremento anual
Preamar máxima Registrada	2,72 m	2,88 m	8,7 mm/ano
Parcela não astronômica na Preamar	0,57 m	0,74 m	9,6 mm/ano
Baixa-mar máxima Registrada	0,23 m	0,38 m	8,3 mm/ano
Parcela não astronômica na Baixa-Mar	- 0,44 m	- 0,30 m	7,9 mm/ano

Percebe-se a elevação da parcela não astronômica das marés tanto nas mínimas baixa-mares quanto nas máximas premares anuais.

4.2 AVALIAÇÃO DO NÍVEL MÉDIO DO MAR E AMPLITUDE DE MARÉ

A seguir, são apresentadas as séries completas dos dados coletados dos marégrafos de 01/01/1944 a 31/12/2007. As Figuras 4.4, 4.5 e 4.6 mostram o nível das máximas premares, mínimas baixa-mares e nível médio do mar, respectivamente.

Figura 4.4 – Nível das Máximas Preamares (01/1944 a 12/2007)

Figura 4.5 – Nível das Mínimas Baixamares (01/1944 a 12/2007)

Figura 4.6 – Nível Médio do Mar (01/1944 a 12/2007)

Conforme introduzido no Capítulo 2 do presente trabalho, os dados foram analisados em períodos consecutivos de 18,61 anos (6792 dias) de forma a contemplar a totalidade dos ciclos de precessão dos nodos, reduzindo assim a interferência da repetição de marés. Os períodos selecionados são divididos da seguinte forma:

- 1º Período: 18/03/1952 a 21/10/1970
- 2º Período: 22/10/1970 a 26/05/1989
- 3º Período: 27/05/1989 a 31/12/2007

São apresentados nas Figuras 4.7, 4.8 e 4.9 os períodos isolados:

Figura 4.7 – Nível do Mar (03/1952 a 10/1970)

Figura 4.8 – Nível do Mar (10/1970 a 05/1989)

Figura 4.9 – Nível do Mar (05/1989 a 12/2007)

Em função da grande dispersão dos dados, utilizou-se a curva da Média Móvel para o período de 18,61 anos. Diferentemente da análise anterior do resíduo não astronômico, foi possível utilizar-se do período com precisão, já que neste caso, a discretização dos dados permite analisar a série em dias. A média móvel é a média de todos os níveis de 18,61 anos anteriores ao ponto estudado. As Figuras 4.10, 4.11 e 4.12 apresentam a curva da média móvel aplicada nos três períodos consecutivos.

Figura 4.10 – Média Móvel das Máximas Preamares (03/1952 a 12/2007)

Figura 4.11 – Média Móvel do Nível Médio (03/1952 a 12/2007)

Figura 4.12 – Média Móvel das Mínimas Baixa-mares (03/1952 a 12/2007)

A avaliação da média móvel de 18,61 anos do nível médio do mar, das máximas e das mínimas baixa mares originou os resultados apresentados na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 - Elevações do Nível Médio do Mar de 03/1952 a 12/2007

Nível	1º Período 18/03/1952 a 22/10/1970	2º Período 22/10/1970 a 27/05/1989	3º Período 27/05/1989 a 31/12/2007
Máximas Preamares	195 cm	197 cm	210 cm
Nível Médio do Mar	145 cm	146 cm	157 cm
Mínimas Baixa-mares	88 cm	90 cm	100 cm

A média móvel das máximas preamares apresentaram elevações de 15 cm em 55 anos; o nível médio do mar e as mínimas baixa-mares apresentaram elevação de 12 cm em 55 anos. A seguir, as taxas de elevação encontradas:

- Taxa de elevação das máximas preamares diárias: 2,7 mm/ano

- Taxa de elevação do nível médio do mar: 2,2 mm/ano
- Taxa de elevação das mínimas baixa-mares diárias: 2,2 mm/ano

Objetivando detectar o incremento da taxa de elevação nas últimas décadas, foi aplicada a média móvel para o nível médio do mar apenas nos dois períodos mais recentes (Figura 4.13). A elevação foi de 10 cm nos últimos 18 anos, o que corresponde a uma taxa de 5,5 mm/ano. É importante ressaltar que, através desta comparação, nas últimas duas décadas estudadas a taxa de elevação é praticamente o dobro da taxa de elevação dos anos de 1953 a 1990.

Figura 4.13 – Média Móvel do Nível Médio (3º e 2º Períodos)

Nota-se que o 3º período difere-se dos dois anteriores. As figuras 4.10 a 4.12 mostram a tendência oscilatória dos valores entre os anos de 1970 (que representa a média de todo 1º período) e 1989 (que representa a média de todo o 2º período) ressaltando-se:

- R^2 do período de 1989 a 2007: boa aderência ao ajustamento linear;
- pico nas imediações de 1975;
- vale nas imediações de 1989;
- Pico nas imediações de 1983 seguido da elevação contínua dos valores subsequentes.

Mesma análise foi realizada para as amplitudes de maré. A seguir, são apresentadas as séries completas das amplitudes máximas diárias (seja de enchente, seja de

vazante) das ondas de marés, obtidas através dos dados coletados dos marégrafos. A Figura 4.14, apresenta as amplitudes máximas da série de marés estudada.

Figura 4.14 – Amplitudes Máximas

Na tentativa de identificar uma possível tendência das amplitudes máximas, aplicou-se também a curva da Média Móvel para o período de 18,61 anos. Quanto às amplitudes máximas estudadas, a Figura 4.15 apresenta a curva da média móvel aplicada em toda a série.

Figura 4.15 – Média móvel das amplitudes máximas

A média móvel das amplitudes máximas de marés (enchentes e vazantes) não apresenta tendência clara, apresentando picos e vales de diferentes proporções ao longo de intervalos de tempo não regulares. É importante destacar a intensificação das amplitudes na década de 1990, bem como sua repentina redução na década de 2000.

5. DISCUSSÃO

Os resultados de avaliação das taxas de elevação das máximas preamares anuais (8,7 mm/ano) e mínimas baixa-mares anuais (8,3 mm/ano) de 1945 a 2007 são superiores aos encontrados para a variação do nível médio do mar (2,7 mm/ano para as preamares e 2,3 mm/ano para o nível médio e baixa-mares) no período de 1953 a 2008.

Na primeira análise, a parcela não astronômica do ciclo de 1990 representa um incremento da maré astronômica prevista da ordem de 0,60 m, ao passo que no ciclo de 2007 esta influência passou a ser de cerca de 0,75 m, um aumento de 25%. Nas mínimas baixa-mares anuais, o aumento foi de 65%.

A observação do último período indica que há uma clara intensificação da elevação do nível médio registrado de 1990 a 2008 (taxa de elevação de 5,5 mm/ano), bem como uma anomalia nas amplitudes máximas de maré (enchentes e vazantes), caracterizada por um pico no ano 2000.

A comparação entre os valores encontrados para o período de 1944 a 2008 (2,7 mm/ano para as preamares e 2,3 mm/ano para o nível médio e baixa-mares) pode ser feita com a encontrada pelo IPCC (2014) para o período de 1901 a 2010 (1,7 mm/ano) e às encontradas por Church e White (2006), também de 1,7 mm/ano no período de 1870 a 2004.

A observação do último ciclo apresenta a intensificação das taxas como fator comum. O estudo do nível médio do mar (5,5 mm/ano), bem como o das amplitudes apresentam tal intensificação nesse período, comparável a encontrada pelo IPCC ao isolar o ciclo de 1993 a 2010 (2,30 mm/ano).

Faz-se presente a hipótese de que a elevação constatada é originada pela diferença de operação entre o marégrafo da Torre Grande, da Ilha Barnabé e do marégrafo do Terminal de Fertilizantes, porém é perceptível a correlação dos dados registrados pelos dois equipamentos, estudados no relatório encomendado pela Empresa de Portos do Brasil (1977), elaborado pela Sondotécnica.

A Figura 5.1, extraída do Relatório Final do Comportamento Hidráulico e Sedimentológico do Estuário Santista, mostra a proximidade das oscilações do nível

médio medido em agosto dos marégrafos da Torre Grande e da Ilha Barnabé, distanciada, na maior parte dos registros, em no máximo 10 cm. A Figura 5.2 apresenta os perfis instantâneos de maré em 25/08/1976 nos marégrafos. A diferença entre o nível do Marégrafo da Torre Grande com o da Ilha Barnabé é praticamente inexistente.

Figura 5.1 – Oscilações do nível médio medido no porto de Santos em Agosto de 1976 Fonte: Sondotécnica, 1977

Figura 5.2 – Perfis instantâneos de maré em 25/08/1976. Fonte: Sondotécnica, 1977

Além disso, apresenta-se na Tabela 4.3, a comparação entre principais componentes harmônicas dos marégrafos estudados. As componentes Q1, O1, P1, K1, N2, M2, S2, K2 e M3 representarem mais que 90% do efeito de maré nesta região (HARARI & CAMARGO, 1995 apud MESQUITA & HARARI, 1983).

Tabela 5.1 - Constantes harmônicas dos marégrafos estudados e do marégrafo da praticagem

Constante	Ilha Barnabé		Torre Grande		Praticagem	
	Semi Amplitude (cm)	Fase (º)	Semi Amplitude (cm)	Fase (º)	Semi Amplitude (cm)	Fase (º)
Q1	2,5	051	2,5	058	4,8	043
O1	11,4	083	11,5	081	12,9	087
P1	2,1	152	2,3	136	2,2	148
K1	6,2	158	6,3	143	6,5	153
N2	5,1	146	5,4	149	4,7	147
M2	38,4	086	36,4	088	33,9	079
S2	23,3	088	22,5	091	24,9	086
K2	6,3	088	7,4	082	6,8	087
M3	5,5	245	4,9	234	5,2	213

Fonte: Femar, 2017.

Acesso em: < <https://www.fundacaofemar.org.br/biblioteca/emb/indice.html#saopaulo> >

A proximidade das componentes harmônicas destas estações constituem mais um um indício de que a elevação não se justifica pela troca de marégrafos, e sim por um fenômeno externo a localização e ao funcionamento dos mesmos.

Desta forma, quaisquer adaptações da costa que se façam necessárias para evitar danos ao Porto, bem como para a cidade de Santos, irão demandar estudos de Engenharia que considerem tais elevações. É necessário, portanto, definir uma taxa de elevação do nível médio do mar que norteie os futuros estudos para a região, da mesma maneira como foi mencionado anteriormente.

5.1 IMPACTOS DA ELEVAÇÃO DO NÍVEL MÉDIO DO MAR NO PORTO DE SANTOS

5.1.1 Borda livre e cotas de estruturas de acostagem e de retroáreas

Constatada a elevação do nível do mar, a providência imediata é calcular, para o momento atual, a redução da borda livre que ocorreu desde a construção do primeiro cais, o cais do Valongo, datado de 1892 (CODESP, 2017). Considerando a taxa de elevação das preamares encontrada através da análise do período de 1953

a 2008 (2,7 mm/ano) e assumindo-se que esta taxa ocorreu no período de 1892 a 2017 (125 anos), encontra-se uma redução de 33,8 cm na borda livre, ou seja, 21% do valor original de 1,58m.

Desta forma, o Porto de Santos conta atualmente com borda livre de 1,24m. A Figura 5.3 mostra a borda livre de 1,58m, bem como sua situação atual.

Figura 5.3 – Seção típica do cais com cota CODESP: -6,60m para situação em 1892 e 2017. Fonte: Companhia Docas de Santos, 1973 (adaptado).

Apesar da redução da borda livre, que ocorre desde 1882, o nível atual permite o pleno funcionamento do Porto de Santos, apesar de induzir problemas maiores como os que serão explicados a seguir.

Assim, para o ano de 2100, os mesmos impactos apresentarão intensidades maiores já que a elevação acumulada será muito superior à que vem ocorrendo. Para isso, é necessário quantificar a futura elevação do nível do mar. Para esta previsão, duas opções são válidas: a primeira consiste em utilizar-se da taxa encontrada para o nível médio no período de 1990 a 2008 (elevação de 5,5mm/ano) que em 2100 totalizarão uma elevação de 0,60m; a segunda é utilizar-se da taxa mais elevada, sugerida pelas recomendações internacionais, valor próximo a 1,00m (PIANC, 2014). Decidida a taxa de elevação a ser aplicada para a previsão da situação do Porto de Santos em 2100, considerações no âmbito da Engenharia Portuária podem ser elaboradas a respeito de seus impactos. A primeira delas é a redução da borda

livre. Utilizando-se das duas opções, 5,5 mm/ano ou 1,00m de elevação de 1990 a 2100, encontra-se:

- Taxa de 5,5mm/ano:

$$BL = 1,24\text{m} - [(2100 - 2017) \times 0,0055 \text{ m/ano}]$$

Borda Livre em 2100: 0,79 m;

Ou,

- Elevação total de 1,00 de 1990 a 2100:

$$BL = 1,58 - \{[0,0027 \times (1990 - 1892)] + 1,00\}$$

Borda Livre em 2100: 0,31 m;

A tais situações expõe os pátios a riscos elevados de inundação, pois a estes valores, deve ser acrescentado a existência das ondas residuais internas ao porto, que possuem uma altura média de 0,30 m (ALFREDINI; ARASAKI, 2014). A invasão da lâmina d'água desencadeia problemas como paradas operacionais, dano às instalações portuárias, danos às mercadorias transportadas e dano aos equipamentos on-shore, abordados adiante.

5.1.2 Aumento dos esforços sob as lajes

Estruturas que são constituídas de lajes estabelecidas acima do nível da maré máxima, também poderão sofrer esforços mais intensos para os quais foram projetados. As oscilações do nível do mar fazem com que a massa de água desloque o colchão de ar no sentido vertical, conforme sua direção. Quanto mais espessa a coluna de ar existente entre o nível do mar e o fundo das plataformas portuárias, maior o amortecimento destas oscilações. A elevação do nível do mar causará a diminuição das colunas de ar existentes, aplicando assim maiores esforços às plataformas, mesmo quando não há o contato entre a água e a base das lajes.

Caso mais crítico é o do Terminal para Granéis Líquidos da Ilha Barnabé, que apresenta como cota inferior de projeto da laje a cota da preamar. Neste caso, é de se esperar que o contato entre a lâmina d'água e a base da plataforma já aconteça,

pois como exposto anteriormente, a elevação da preamar já ocorreu. Este contato transmite os esforços da água diretamente às estruturas, podendo soerguer o terminal após o desgaste das estacas e dos aparelhos de apoio.

Mesmo que as estacas e os aparelhos de apoio resistam em primeiro momento aos esforços provocados pela água, o contato constante da água com as estruturas da plataforma deteriorará o concreto expondo, em pouco tempo, a armadura e comprometendo a integridade do cais. A Figura 5.4 mostra o perfil típico do terminal para granéis líquidos, assim como a cota de coroamento e o nível de preamar em 2,70 m.

Figura 5.4 – Seção típica terminal para granéis líquidos com cota CODESP: -7,00m. Fonte: Companhia Docas de Santos, 1973 (adaptado).

Nesta situação, a elevação de 0,45 m para o ano de 2100 (5,5 mm/ano entre 2017 a 2100) implicará no aumento dos esforços de movimentação vertical da água, enquanto para a elevação de 1,00 m, além dos esforços causados pela movimentação vertical, a parte inferior da plataforma ficará submersa desencadeando os problemas de corrosão do concreto e dos engastes.

5.1.3 Velocidade das correntes nos taludes submersos e altura útil do canal, berços e bacias de evolução

É comum relacionar a elevação do nível do mar ao aumento da capacidade do canal de acesso, já que a profundidade útil do canal se torna maior. Entretanto, esta

afirmação simplificada ignora importantes fatores que devem ser considerados, pois representam ameaças ao sistema de navegação no Porto de Santos.

Alfredini e Arasaki (2014) afirmam que para os canais de acesso, “a influência deste fator (maré) é notória, uma vez que determina a situação crítica sob a qual se dará a obtenção da profundidade requerida pela embarcação”. Uma vez que a maré sofre elevação, o canal de acesso aumenta sua altura e os berços suas profundidades, o que aparentemente contribui para a navegação e acostagem. A PIANC (2013) também faz semelhante alerta:

“Embora a elevação do nível do mar não cause impactos diretos na navegação por si mesma, poderia afetar a infraestrutura portuária, os padrões de serviços costeiros e as estruturas de portos. Tal elevação pode permitir maior penetração da energia de ondas na linha de costa e nos portos, causando a acentuação da erosão costeira em áreas com linhas de costa suaves. Pode também aumentar a salinidade de baías e estuários.”
(PIANC, 2013, p.23, tradução nossa)

A NBR nº 13.246/95 recomenda as declividades dos taludes em função da natureza do solo e lembra que o ângulo de repouso efetivo nos materiais granulares depende da ação hidrodinâmica das ondas e correntes. Desta forma, a elevação de velocidade das correntes de maré pode colocar em risco a integridade dos taludes submersos do canal de acesso. Alfredini, Arasaki e Amaral (2008) constataram, através de testes em modelo físico, que uma elevação de 1,50 m no nível do mar elevaria em 4% as velocidades das marés de enchente e em quase 10% as velocidades das marés de vazante nas embocaduras de Santos e São Vicente. O aumento das amplitudes de maré faz com que o prisma de maré (volume de água que entra pelo canal) seja maior e, por acontecer no mesmo período de tempo, acabará elevando as velocidades das correntes no canal.

Com maior velocidade, e conseqüentemente maior energia, ocorrerá o carregamento do material granular acumulado, seja nos taludes submersos do canal de acesso, seja nos taludes existentes sob as plataformas, como apresentado na Figura 5.5.

Figura 5.5 – Seção típica do cais com cota CODESP: -13,50m. Fonte: Companhia Docas de Santos, 1973.

Tal efeito expõe às estacas e pilares a esforços de maior intensidade, para os quais não foram dimensionados. O carregamento deste material pode também reduzir a área de atrito das estacas de fundação, ocasionando eventuais recalques, principalmente nas estacas mais próximas à borda do cais, onde a velocidade do fluxo tende a ser maior.

5.1.4 Dragagem

Os impactos da elevação do nível do mar na dragagem do Porto de Santos não são nítidos nem mesmo intuitivos. Esta problemática está basicamente associada a inundação do mangue, ao aumento das velocidades no canal e ao deslocamento da zona de turbidez para a montante do canal. Por sua vez, todas estas variáveis estão interligadas.

A elevação do nível do mar em ritmo mais acelerado que a velocidade de elevação da vegetação do manguezal faz com que a retenção de sedimentos pela vegetação seja menor, elevando a quantidade de material em suspensão no canal no momento das marés de vazante. Este fato, combinado com o deslocamento da zona de turbidez máxima para a montante do canal causará aumento expressivo do assoreamento na região da Ilha de Barnabé e em seus arredores por se tratar de local com baixa incisão de ondas e correntes, baixas velocidades de fluxo e com grande influxo de material fluvial. Nesta situação, é de se esperar que a dragagem seja mais frequente.

Por sua vez, a elevação do nível fará com que ocorra o aumento das velocidades no canal e conseqüentemente o da energia de carregamento das partículas. Esta maior movimentação poderá ao mesmo tempo expulsar do canal boa parte do material que seria assoreado bem como carregar para regiões mais tranquilas, mais material, o que demandaria uma redistribuição geográfica dos esforços de dragagem.

De toda forma, esta questão complexa fica por ora sem prognóstico definitivo, mas mantém-se a certeza de que impactos existirão no atual modelo de dragagem do Porto.

5.1.5 Deterioração das estruturas emersas

Dos critérios utilizados para dimensionamento das estruturas portuárias, o nível da maré é comum a todas as estruturas costeiras, submersas ou parcialmente submersas, por delimitarem uma região de notável agressividade devido a fatores como: impacto de ondas, sucessão de períodos submersos e emersos, ataque biológico entre outros. Thoresen (2010) propõe que a deterioração do concreto em ambientes marítimos pode ocorrer em quatro zonas: zona 1: zona permanentemente submersa; zona 2: zona de maré; zona 3: zona de impacto e zona 4: zona atmosférica ou em áreas que esporadicamente são expostas à água do mar.

Cada zona possui exigências diferentes de composição de concreto, de locação de proteções, de coeficientes de projeto e de materiais. Desta maneira, as estruturas portuárias devem ser projetadas considerando a clara delimitação de cada zona.

A influência da umidade elevada do ar e a salinidade nas regiões costeiras também ocasionam problemas nas estruturas que estão em contato com a água e também em estruturas que não possuem este contato direto. Balestra et al (2016) exemplificam, através de um estudo de caso de estruturas antigas na região do Guarujá (São Paulo), que mesmo nas estruturas de concreto que se encontram em níveis mais elevados que a preamar e que a zona 4 proposta por Thoresen, a corrosão por efeito da salinidade do mar pode levá-las ao colapso.

No Porto de Santos, a situação dos cais em 1892 (com borda livre de 1,58 m) mostra que o coroamento das estruturas de acostagem poderia ser classificado como zona 4, já que raríssimas preamares atingiam tais cotas. Desta forma, a elevação de 1,00 m do nível médio em 2100, combinada com a ação das ondas residuais no canal,

fará com que todas as estruturas de acostagem, inclusive os equipamentos de defesa do Porto de Santos, passem para a classificação de zona 3, pois periodicamente serão atingidos por ondas. Apesar do coroamento de tais estruturas se manterem na zona 3, a periodicidade dos impactos aumentará. A Figura 5.6 compara a situação do cais (com cota de fundo CODESP: -10,00) com a borda livre de 1,58m e o cenário para 2100 (com a elevação de recomendações internacionais), com a borda livre de 0,31m. Percebe-se que a cota de coroamento do cais ainda se encontra na zona 4, apesar da elevação do nível do mar.

Figura 5.6 – Comparação de cenários para seção típica do cais com cota CODESP: -10,00m. Fonte: Companhia Docas de Santos, 1973 (adaptado).

Alfredini, Arasaki e Pezzoli (2015) também citam o impacto da elevação do nível do mar nas estruturas de concreto em locais específicos do porto, destacando a classificação proposta por Thoresen, e apontando que manutenções corretivas e preventivas deverão ser realizadas caso o cenário se concretize. É o caso do cais para o terminal de contêineres, datado de 1980, que já contava uma borda livre de 1,34 m nesta data (24 cm a menos que a borda livre de projeto dos cais mais antigos). Nesta situação, tanto a elevação de 5,5 mm/ano quanto a elevação de 1,00 m prevista para ocorrer entre o ano de 1990 a 2100, farão com que os pilares fiquem totalmente submersos e o fundo da plataforma em contato constante com a água. A Figura 5.7 compara a situação de 1980 e para 2100 no terminal para contêineres.

Figura 5.7 – Seção típica do cais Terminal de Contêineres com cota CODESP: -13,00m. Fonte: Companhia Docas de Santos, 1973 (adaptado).

Apesar disso, a maioria das demais estruturas emersas como construções, bases de equipamentos de descarga, postes de instalações que se situem nos cais próximos manteriam sua classificação na zona 4, por apenas sofrerem impactos esporádicos e atmosféricos, apesar de que estas situações se tornarão mais frequentes.

5.1.6 Perda de eficiência dos cabeços de amarração

Os esforços hidrodinâmicos não serão os únicos a sofrerem alterações. Esforços decorrentes da situação de atracação das embarcações também serão alterados. A eficiência da amarração das embarcações sofrerá interferências com a elevação do nível do mar. A eficácia de uma linha de amarração varia em função do ângulo vertical (ângulo que a linha de amarração forma com a plataforma) e do ângulo horizontal (que a linha de amarração forma com a linha de atracação). Assim, quanto mais angulada a orientação na vertical, menos efetiva fica a linha para resistir ao esforço horizontal (ALFREDINI; ARASAKI, 2014). Desta mesma forma, completam os autores: “os pontos de amarração das embarcações devem estar localizados em terra e dependem da altura do ponto e das variações de maré e carregamento”.

Qualquer elevação do nível do mar implica em maior desnível entre os pontos de amarração dos navios e os pontos de amarração dos cais (se mantidos o nível de carregamento das embarcações), aumentando assim o ângulo vertical da linha de amarração e consequentemente a perda da eficácia da mesma.

Situação contrária pode ocorrer caso o nível de carregamento dos navios aumente, tendo em vista a provável maior profundidade do berço de atracação. Nestes casos,

a diferença de cotas entre os pontos de amarração diminuiriam aumentando a eficiência das linhas. Esta hipótese considera tanto a manutenção da cota de fundo dos berços, quanto a capacidade das embarcações em aumentar seus níveis de carregamento.

5.1.7 Perda de eficiência das defensas

Um nível do mar mais elevado irá diminuir a funcionalidade de certas estruturas, como os sistemas de defesa (SORENSEN; WEISEMAN; LENNON, 1984). O cenário de elevação do nível do mar fará com que equipamentos de defesa fixos percam sua eficiência, já que o ponto de contato destes dispositivos com o navio será deslocado verticalmente em pelo menos 0,50 m para o ano de 2100.

A excentricidade do ponto de contato das embarcações com as defensas, reduzirá a eficiência das mesmas já que os esforços serão distribuídos de forma irregular nos pontos de fixação dos equipamentos de acostagem.

Caso a elevação considerada seja de 1,00m para o ano de 2100, defensas fixas poderão perder sua eficácia, pois poderão atingir áreas do casco que não suportam as reações de acostagem. Este problema é restrito às defensas do tipo fixa.

Outra problemática decorrente do deslocamento do ponto de acostagem para níveis superiores é de que as estruturas, anteriormente dimensionadas para receberem esforços em uma determinada região, passarão a recebê-los em pontos mais elevados, aumentando o diagrama de esforços nas regiões de fundação. A Figura 5.8 apresenta um exemplo.

Figura 5.8 – Diferença de esforços causadas pela variação do ponto de acostagem

5.1.8 Perda de eficiência dos equipamentos de descarga

Outro problema decorrente da elevação do nível do mar é também a perda de eficiência dos equipamentos de descarga que possuem lança com esteira ou tubos, chamados de shiploaders. Tal elevação, se não compensada pelo nível de carregamento dos navios, poderá exigir da lança maior ângulo vertical. O aumento do ângulo vertical da lança distancia vertical e longitudinalmente o ponto de descarga com o emboque dos porões dos navios, além de intensificar as componentes verticais dos esforços nestes equipamentos. A redução da eficiência de cada equipamento varia em função de suas especificações técnicas fornecidas por seus fabricantes.

Terminais do Porto de Santos como o TGG (Terminal de Granéis do Guarujá S.A.), T-GRÃO Cargo Terminais de Graneis, Terminal ADM do Brasil, Sucocitrico Cutrale, Caramuru Alimentos Ltda. e Granel Química são exemplos de terminais que sofreriam com esta elevação caso ela ocorresse atualmente.

O funcionamento dos equipamentos de descarga vertical, basicamente representados pelos portêineres e guindastes não terão seu desempenho prejudicado com a elevação do nível do mar, pois são adaptáveis a variação da posição vertical na qual se encontra a embarcação.

5.1.9 Invasão da água em galerias de serviço

A elevação do nível do mar poderá causar o alagamento das galerias de drenagem que possuem a cota de descarga próxima ao nível de preamar. Esta nova condição de contorno com níveis de descarga mais elevados, reduz a declividade efetiva do sistema de drenagem, prejudicando consideravelmente sua eficiência.

O Relatório da Secretaria de Assuntos Estratégicos da Presidência da República (BRASIL, 2015), afirma que a microdrenagem dos cais deverão ser reprojetadas e a macrodrenagem de áreas retroportuárias e de entorno do Porto também, uma vez que as áreas de inundação irão se ampliar. O famoso sistema de drenagem da cidade de Santos, proposto por Saturnino de Brito, já conta com comportas que controlam a invasão da água nos canais de macrodrenagem urbana, protegendo as áreas internas da cidade, porém apenas os canais 1 (galeria de montante), 4, 5 e 6 possuem duas embocaduras, uma localizada no Porto de Santos e outra na praia. Nestes casos, serão necessárias revisões dos projetos das estruturas de controle ou até mesmo a instalação de sistemas de bombeamento, a fim de que os canais se mantenham operacionais.

5.1.10 Perdas de eficiência de rampas / plataformas de embarque

Os terminais de desembarque roll on / roll of, bem como a balsa que opera a travessia Santos – Guarujá, deverão adaptar-se uma vez que o ângulo vertical sofre incremento. Este tipo de embarcação será afetada principalmente pela perda de eficiência dos cabos de amarração, já que acostadas apresentam grande diferença de cotas entre os pontos de amarração.

5.1.11 Problemas operacionais nos pátios devido a inundação

Como exposto, é crescente o risco de invasão de água nos pátios. Tal invasão, originada pelo aumento da subida da maré, atinge diretamente equipamentos de operação de terminais como: trilhos e estruturas de equipamentos de descarga de

embarcações, acelerando sua oxidação; contato frequente de veículos de transporte e de apoio com regiões parcialmente alagadas; maior exposição das pilhas de granéis e das pilhas de contêineres aos alagamentos nos pátios; riscos relacionados a rede elétrica em eventual contato com pátios alagados; enfim, fatores que comprometem substancialmente a segurança e a eficiência dos operadores portuários e seus funcionários.

5.1.12 Alteração de escalas de funcionamento

Visando se adequar às novas condições impostas pelo regime de marés, alguns tipos de embarcações terão seus horários de atracação alterados, buscando compensar a elevação do nível do mar com janelas de maré, para otimizar as condições de atracação.

5.2 MARÉS E AMPLITUDES

A comparação da taxa de elevação das máximas preamares (2,7 mm/ano) com a taxa do nível médio e as mínimas baixa-mares (2,3 mm/ano) traduz-se em uma diferença de 17%. A taxa de elevação das marés máximas anuais (8,7 mm/ano) está 5% superior a das mínimas baixa-mares anuais (8,3 mm/ano). É perceptível também que a taxa de elevação da parcela não astronômica nas máximas preamares anuais cresceu 21% (9,6 mm/ano) em comparação a mesma taxa nas mínimas baixa-mares anuais (7,9 mm/ano).

Tais resultados indicam que o nível das preamares máximas está crescendo de forma mais acelerada do que o nível médio e do que as baixa-mares mínimas, entretanto, há uma ausência de tendência clara de que as amplitudes de maré estejam variando.. Esta diferença, que impede a formação de tendências tanto na análise dos pontos quanto na análise da média móvel das amplitudes, pode se dar pelo fato de que os dados de amplitudes máximas diárias coletados dos marégrafos não estão necessariamente atrelados às ocorrências consecutivas das máximas preamares e mínimas baixa-mares diárias, mas sim a quaisquer pares de preamar e baixa-mar que se distanciem o máximo.

Tanto a diferença entre as taxas do nível de marés, quanto a existência de tendências de elevação nas parcelas não astronômicas dos níveis máximos anuais,

podem traduzir uma intensificação da incidência de eventos climáticos extremos na região do Porto de Santos.

Além desta hipótese, a ausência de tendência clara nas amplitudes pode ser explicada pela origem das marés, geralmente composta por dois fatores:

- Regularidade da maré astronômica: As amplitudes da maré astronômica não possuem tendência de aumento, sendo a variabilidade das constantes harmônicas pouco significativa.
- Interferência de fenômenos meteorológicos: a maré não astronômica é produto de diversos fatores atmosféricos não regulares.

Destaca-se que em Santos, o prisma de maré se limita as bordas dos canais e seus afluentes, atingindo um limite máximo fictício na cota em que se iniciam as planícies alagadas, onde o volume de água precisa ser de ordem muito elevada para produzir algum aumento significativo na cota máxima de maré e, conseqüentemente, produzir grandes amplitudes.

Também necessário relacionar a existência das três embocaduras principais no estuário: uma pelo lado da cidade de São Vicente, outra pelo lado da cidade de Santos, onde situa-se o Porto, e a terceira pelo canal de Bertioga, que circunda a Ilha de Santo Amaro. As três se encontram na região a montante do Porto de Santos e fenômenos de transferência de volumes entre os prismas de maré em diferentes momentos que entram pelos canais podem explicar a grande variabilidade das amplitudes.

O trabalho desenvolvido por Alfredini, Arasaki e Amaral (2008) através de modelo físico, exemplifica a complexa interação entre os canais do estuário para um cenário de elevação do nível do mar. O estudo notou que uma elevação do nível do mar em 1,50 m causará a redução do tempo em que a propagação da onda de maré, a partir das embocaduras de Santos e São Vicente, atingirá a zona de encontro entre as águas. Esta redução se deu pelo fato de que ocorreu aumento da velocidade na boca do canal de Santos e redução na boca do canal de São Vicente. Resultados diferentes são explicados pelas características hidrodinâmicas de cada canal e levaram a conclusão de que com a elevação do nível do mar em 1,50 m, há aumento

na profundidade da embocadura de Santos (onde situa-se o Porto) e diminuição da profundidade na boca do canal de São Vicente.

Outra hipótese levantada pela anomalia é a estabilidade da posição, no período analisado, do ponto anfidrômico mais próximo à região de estudo. Estudos como o de Kauker (1999 apud WEISSE, 2011), constatou que o aumento de 1 a 4 cm na amplitude de maré registradas no sudoeste do Mar do Norte se deu pelo sensível deslocamento dos pontos anfidrômicos da região. Por sua vez, Lionello (2005) verificou que o pequeno deslocamento do ponto anfidrômico do nordeste do Adriático, produziu grande efeito na amplitude da maré em Ancona. Delvim (2014) lembra que o deslocamento dos pontos anfidrômicos não é a única causa da tendência de marés anômalas, mas sintomas de uma evolução de marés que representa uma redistribuição nos campos de maré, dirigidos por outros fatores.

Por fim, a subsidência geológica pode contribuir para a variação anômala das amplitudes de maré. Caso a região esteja em um processo de afundamento ou soerguimento, a elevação relativa do nível do mar contaria com mais uma variável; porém, o estudo de Pfeffer e Allemand (2016), que compilaram as variações relativas do nível do mar em 886 estações ao longo dos últimos 20 anos em todos os continentes, apresentou que na região do Porto de Santos, não há nenhuma movimentação vertical significativa do ponto de vista geológico.

6. CONCLUSÕES

O estudo dos dados de maré na região do Porto de Santos mostrou que as máximas preamares anuais e as mínimas baixa-mares anuais sofreram elevação de 8,7 e 8,3 mm/ano, respectivamente entre os anos de 1944 a 2007. Verificou-se também o aumento da parcela não astronômica destas marés. Na análise do nível médio do mar, as taxas de elevação encontradas para o período analisado de 1953 a 2008 são de 2,7mm/ano para as máximas preamares e 2,3mm/ano para o nível médio e mínimas baixa-mares.

Restringindo-se ao período de 1990 a 2008, a taxa de elevação do nível médio encontrada em Santos foi de 5,5 mm/ano, valor que é condizente com a projeção do IPCC para 2100 (de intervalo de 4 a 11 mm/ano), resultante da análise do período entre 1986 e 2005. No entanto, a taxa de elevação encontrada de 5,5 mm/ano é conservadora para uma projeção até 2100, já que a maioria da elevação acumulada sugerida pelas demais instituições e outros pesquisadores se encontra em torno de 1,00 m em 2100.

A elevação do nível do mar é uma realidade para a qual o Porto de Santos deverá se adaptar. Constatada a elevação gradual que ocorreu desde 1892 a 2008, conforme as informações dos marégrafos estudados, a suposição de que o nível continuará se elevando ao longo do próximo século é válida. Foram, portanto, apontadas as principais influências da elevação do nível do mar nas estruturas do Porto de Santos que são reunidas na Tabela 6.1.

Tabela 6.1 - Resumo dos impactos da elevação do nível do mar no Porto de Santos.

Estrutura / Instalação	Impactos da elevação acumulada entre 0,50 m a 1,00 m	
	Negativos	Positivos
Estruturas acostáveis (cais, plataformas, outros)	<ul style="list-style-type: none"> • Maior deterioração do concreto dada elevação das zonas de contato com a água; • Intensificação dos esforços horizontais - Excentricidade do ponto de impacto das embarcações; • Esforço de soerguimento causado pela variação vertical das marés; 	-
Fundações (pilares e estacas cravadas)	<ul style="list-style-type: none"> • Maior deterioração do concreto dada elevação das zonas de contato com a água; • Intensificação dos esforços horizontais - Excentricidade do ponto 	-

Estrutura / Instalação	Impactos da elevação acumulada entre 0,50 m a 1,00 m	
	Negativos	Positivos
	de impacto das embarcações; <ul style="list-style-type: none"> • Redução da eficiência - desgaste do material do leito pelas velocidades mais elevadas. 	
Taludes submersos	<ul style="list-style-type: none"> • Erosão causada pela maior velocidade de corrente. 	-
Canal de acesso, berços, bacias de evolução	<ul style="list-style-type: none"> • Elevação da periodicidade da dragagem dado maior aporte de material do mangue. 	<ul style="list-style-type: none"> • Aumento da capacidade de recepção de navios de maior calado.
Equipamentos e estruturas metálicas	<ul style="list-style-type: none"> • Intensificação da corrosão - elevação da atmosfera salina. 	-
Sistemas de amarração	<ul style="list-style-type: none"> • Perda de eficiência de amarração - maior ângulo vertical de amarração; • Equipamentos de amarração sujeitos a impactos de ondas 	<ul style="list-style-type: none"> • Aumento da eficiência caso o nível de carregamento dos navios seja elevado.
Sistemas de defesa	<ul style="list-style-type: none"> • Perda de eficiência - excentricidade do ponto de impacto; • Equipamentos de defesa mais expostos ao ambiente aquático. 	-
Drenagem da retroárea	<ul style="list-style-type: none"> • Afogamento das galerias de drenagem; • Maior demanda das galerias - risco de inundação. 	-
Equipamentos de carregamento e descarga	<ul style="list-style-type: none"> • Redução da eficiência - maior ângulo da lança, maiores esforços verticais; • Maior exposição a água - galgamento e inundações da retroárea. 	-
Rampas de popa / proa	<ul style="list-style-type: none"> • Redução da eficiência - limite do ângulo vertical. 	<ul style="list-style-type: none"> • Aumento da eficiência caso o nível de carregamento dos navios seja elevado.
Questões Operacionais	<ul style="list-style-type: none"> • Alteração das escalas de acostagem; • Paradas operacionais - inundação da retroárea; • Contato de cargas com a lâmina de inundação 	-

Além da indicação dos principais problemas de Engenharia, foi analisado o comportamento das amplitudes de maré no intervalo de 1944 a 2008. Esta investigação permitiu concluir que há uma intensificação da influência da parcela não astronômica das marés, fato este justificado pela diferença da taxa de elevação do nível médio e mínimas baixa-mares em comparação às máximas preamares.

Caso o Porto de Santos queira manter seu nível de operação e adaptar-se a estas mudanças, as autoridades deverão estudar o fenômeno com mais profundidade, buscando extrair destes, valores indicativos que substanciem a escolha das cotas de futuros projetos e adaptações para os terminais e áreas operacionais.

Finalmente, é importante destacar que a elevação do nível do mar a longo prazo não colocará em risco a existência do Porto de Santos pois os administradores portuários, desde que fundamentados pelo desenvolvimento de tecnologias, pesquisas e sobretudo amparados pelos investimentos necessários, certamente encontrarão medidas adaptativas que garantam a operacionalidade e atratividade do maior porto brasileiro.

7. REFERÊNCIAS

ALFREDINI, P. ; ARASAKI, E. **Obras e Gestão de Portos e Costas - A técnica aliada ao enfoque logístico e ambiental**. 2. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2009. 688 p.

ALFREDINI, P., ARASAKI, E. **Engenharia Portuária**. São Paulo: Edgard Blücher, 2014.

ALFREDINI, P., ARASAKI, E.; AMARAL, R.F. **Mean sea-level rise impacts on Santos Bay, Southeastern Brazil - physical modelling study**. Environmental Monitoring and Assessment, v.144, 2008. p. 377-387.

ALFREDINI, P., ARASAKI, E., PEZZOLI, A. **The Impacts Of Sea Level Rise In Santos Harbour (Brazil) For Next Decades**. IAHR World Congress, 36, 2015. E-proceedings, The Hague, Holanda, 2015.

BALESTRA, C.E.T., LIMA, M.G., JUNIOR, R.A.M. **Manifestações patológicas em estruturas de concreto armado com 60 anos em ambiente marinho**. Revista de Engenharia e Tecnologia, Volume 8. N.3, 2016. p.223-23.

BITENCOURT, D. P., QUADRO, M. F. L., CALBETE, N.O. **Análise de dois casos de ressaca no litoral da região sul no verão de 2002**. XII CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA. Foz de Iguaçu, 2002. p. 3910-3917.

BRASIL. Agência Nacional de Transportes Aquaviários. **Anuário Estatístico 2009**. Edição 2009, 2010. Disponível em:
<<http://web.antaq.gov.br/Portal/Anuarios/Portuario2009/Index.htm>> Acesso em: 22/09/2017.

BRASIL. Marinha do Brasil. Diretoria de Hidrografia e Navegação - DHN. **Tábuas das Marés**. Rio de Janeiro. Edição 1, 1963. Anual. ISSN 1415-1049.

BRASIL. Presidência da República. Secretaria de Assuntos Estratégicos. **Recomendações para adaptação às mudanças climáticas na região costeira e infraestrutura portuária brasileira**. Brasília, 2015.

CHURCH, J.A., WHITE, N.J. **A 20th century acceleration in global sealevel rise**. Geophysical Research Letters. 2006. DOI: 10.1029/2005GL024826

COMPANHIA DOCAS DO ESTADO DE SÃO PAULO – SANTOS: Autoridade Portuária – CODESP. [Sem título] Disponível em:
<<http://www.portodesantos.com.br/historia.php>> Acesso em: 24/02/2016.

COMPANHIA DOCAS DO ESTADO DE SÃO PAULO – SANTOS: Autoridade Portuária – CODESP. [Sem título] Disponível em:
<http://189.50.187.200/lei_acesso/proaps.asp> Acesso em: 11/01/2017.

COMPANHIA DOCAS DE SANTOS. **Desenhos das estruturas de atracação**, 1973.

CRIAÇÃO da Codesp, a Autoridade Portuária. **Jornal a Tribuna**, Santos, 14 abr. 2015. Disponível em: <<http://www.atribuna.com.br/noticias/detalhe/noticia/criacao-da-codesp-a-autoridade-portuaria/?cHash=20b48b5ba323a0c9d1a4661c4f3d391d>> Acesso em: 11/01/2017.

DEVLIN, A. T.; JAY, D. A.; TALKE, S. A.; ZARON, E. D. **Can Tidal Perturbations Associated with Sea Level Variations in the Western Pacific Ocean be used to Understand Future Effects of Tidal Evolution?** Portland State University: Civil and Environmental Engineering Faculty Publications and Presentations. Paper 173. Portland, Oregon. 2014.

ENGINEERS AUSTRALIA. **Guidelines for Responding to the Effects of Climate Change in Coastal and Ocean Engineering**. 3ª Edição. Engineers Media, Crows Nest NSW, Australia, 2012. ISBN: 9780858259195

FEMAR – Fundação Estudos do Mar. **Estações Maregráficas Brasileiras**, 2017. Disponível em: <<https://www.fundacaofemar.org.br/biblioteca/emb/indice.html#saopaulo>>

HAIGH, I.D., ELIOT, M., PATTIARATCHI, C. **Global influences of the 18.61 year nodal cycle and 8.85 year cycle of lunar perigee on high tidal levels**. Journal Of Geophysical Research, volume 116, 2011. C06025 .doi:10.1029/2010JC006645

HARARI, J., CAMARGO, R. **Tides and mean sea level variabilities in Santos (SP), 1944 to 1989**. Relatório Interno do Instituto Oceanográfico da USP, nº 36, 1995.

HOSHINO, S., ESTEBAN, M., MIKAMI, T., TAKAGI, H., SHIBAYAMA, T. **Estimation of increase in storm surge damage due to climate change and sea level rise in the Greater Tokyo area**. Natural Hazards, 2015. DOI 10.1007/s11069-015-1983-4

IPCC INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. IPCC, Genebra, Suíça, 2014. 151 pp.

KIM, Y.C. **Handbook of Coastal and Ocean Engineering**. World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., Singapura, 2010. ISBN-13 978-981-281-929-1

LIONELLO, P.; MUFATO, R.; TOMASIN, A. **Sensitivity of free and forced oscillations of the Adriatic Sea to sea level rise**. Climate Research, v.29, 2005. p. 23-39.

MELO, E.; **Maré meteorológica na costa brasileira**. 2016. Tese - Escola de Engenharia da Universidade Federal de Rio Grande.

NCA - NATIONAL CLIMATE ASSESSMENT. **Climate Change Impacts in the United States**: The Third National Climate Assessment, 2014. p19-67. doi:10.7930/J0KW5CXT

NRC - NATIONAL RESEARCH COUNCIL. **Sea-Level Rise for the Coasts of California, Oregon and Washington: Past, Present and Future.** The National Academies Press, Washington, DC, Estados Unidos, 2012.

NICHOLLS, R.J.; HANSON, S.; HERWEIJER, C.; PATMORE, N.; HALLEGATTE, J.; CORFEE-MORLOT; CHATEAU, J.; MUIR-WOOD, R.; **Ranking Port Cities with High Exposure and Vulnerability to Climate Extremes: Exposure Estimates.** OECD Environment Working Papers, N.1, Paris, França, 2008.

NOVA ZELÂNDIA. **Ministry for the Environment. Coastal Hazards and Climate Change. A Guidance Manual for Local Government in New Zealand.** 2ª Edição. Wellington, Nova Zelândia, 2008. ISBN: 978-0-478-33118-9

NOAA - NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION. **Incorporating sea level change scenarios at the local level.** NOAA Coastal Services Center, Charleston, 2012.

OPEN UNIVERSITY COURSE TEAM, THE. **Waves, tides and shallow-water process.** 2ª Edição. Oxford: Butterworth-Heinemann, 1999.

PFEFFER, J., ALLEMAND, P. **The key role of vertical land motions in coastal sea level variations: A global synthesis of multisatellite altimetry, tide gauge data and GPS measurements.** Earth and Planetary Science Letters, 439, 2016. p.39-47

PEZZOLI, A., ALFREDINI, P., ARASAKI, E., ROSSO, M., DE SOUZA JR., W.C., **Impacts of Climate Changes on Management Policy of the Harbors, Land Areas and Wetlands in the São Paulo State Coastline (Brazil).** J Climatol Weather Forecasting 1:101, 2013. DOI:10.4172/2332-2594.1000101

PIANC WORLD ASSOCIATION FOR WATERBORNE TRANSPORT INFRASTRUCTURE **Waterborne transport, ports and Waterways: A review of climate change drivers, impacts, responses and mitigation.** EnviCom – TaskGroup 3 – Climate Change and Navigation. Bruxelas, Belgica, 2013. p.23.

PIANC WORLD ASSOCIATION FOR WATERBORNE TRANSPORT INFRASTRUCTURE **Countries in Transition (CIT): Coastal Erosion Mitigation Guidelines.** Report nº123-2014, Bruxelas, Bélgica 2014. ISBN. 978-2-87223-220-8.

SIERRA, J.P., CASANOVAS, I., MOSSO, C., MESTRES, M., SÁNCHEZ-ARCILLA, A. **Vulnerability of Catalan (NW Mediterranean) ports to wave overtopping due to different scenarios of sea level rise.** Regional Environmental Change, volume 16, 2016. p.1457-1468.

SIMPSON, M.C., et al. **Quantification and Magnitude of Losses and Damages Resulting from the Impacts of Climate Change: Modelling the Transformational Impacts and Costs of Sea Level Rise in the Caribbean,** United Nations Development Programme (UNDP), Barbados, 2010.

SNOUSSI, M., OUCHANI, T., NIAZI, S. **Vulnerability assessment of the impact of sea-level rise and flooding on the Moroccan coast: The case of the**

Mediterranean eastern zone. Estuarine Coastal and Shelf Science, volume 77, 2008. p.206-213.

SONDOTÉCNICA. **Comportamento Hidráulico e Sedimentológico do Estuário Santista – Relatório Final – Desenhos.** Empresa de Portos do Brasil S.A., Instituto de Pesquisas Hidroviárias, 1977.

SORENSEN, R.M., WEISMAN, R.N. LENNON, G.P. Control of Erosion, Inundation, and Salinity Intrusion. **Greenhouse Effect and Sea Level Rise: A Challenge for this Generation.** Van Nostrand Reinhold, Nova York, Estados Unidos, 1984

THORESEN, C.A. **Port designer's handbook.** 2ª Edição. Londres: Ed. Thomas Telford, 2010. 554 p. ISBN 978-0-7277-3265-1.

UNCTAD UNITED NATIONS CONFERENCE ON TRADE AND DEVELOPMENT **Maritime Transport and Climate Change Challenge – Summary of Proceedings.** Multi-Year Expert Meeting on Transport and Trade Facilitation – United Nations Conference on Trade and Development. Genebra, Suíça, 2009. p.16.

VELLINGA, P. et al. **Exploring high-end climate change scenarios for flood protection of the Netherlands.** KNMI Scientific Report, WR 2009-05. De Bilt, Holanda, 2009.

WEISSE, R.; STORCH, H.V.; NIEMEYER, H.D., AND KNAAK, H. **Changing North Sea storm surge climate: An increasing hazard?.** Journal Ocean & Coastal Management, v.1-11. 2011.

8. REFERÊNCIAS ADICIONAIS

MILITITSKY, J.; CONSOLI, N.C.; SCHNAID, F. **Patologia das Fundações** 2ª Edição. São Paulo: Oficina de Textos, 2015. 256 p. ISBN 978-85-7975-183-7

NG, W., MENDELSON, R. **The impact of sea level rise on Singapore.** Environment and Development Economics 10, Cambridge University Press, Reino Unido, 2005. p.201–215. DOI: 10.1017/S1355770X04001706

ZVIELY, D., BITAN, M., DISEGNI, D.M. **The effect of sea-level rise in the 21st century on marine structures along the Mediterranean coast of Israel: An evaluation of physical damage and adaptation cost.** Applied Geography 57, 2015. p.154-162.