



ESCOLA NAVAL



ta sainte & bief faire

Frederico Miguel Graça Ramos da Silva

Caracterização da propagação da maré ao longo
da costa ocidental portuguesa

Estudo de concordâncias de maré entre marégrafos

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Ciências Militares Navais, na especialidade de Marinha



Alfeite

2022



ESCOLA NAVAL

talant de bi-faire



Frederico Miguel Graça Ramos da Silva

*Caracterização da propagação da maré ao longo da costa
ocidental portuguesa*

Estudo de concordâncias de maré entre marégrafos

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Ciências Militares Navais, na especialidade de Marinha

Orientação de: Dora Cristina Nunes Paulino Carinhas

Coorientação de: CMG M RES Carlos Miguel R. S. de Oliveira e Lemos

O Aluno Mestrando,

O Orientador,

Frederico Silva

Dora Carinhas

Alfeite

2022

Para ser grande, sê inteiro: nada
Teu exagera ou exclui.
Sê todo em cada coisa. Põe quanto és
No mínimo que fazes.
Assim em cada lago a lua toda
Brilha, porque alta vive.

Ricardo Reis
(Fernando Pessoa)

Esta Dissertação de Mestrado é dedicada ao meu avô cujos olhos brilhavam sempre que me ouvia dizer que iria ser Oficial da Marinha Portuguesa.

Agradecimentos

Em primeiro lugar gostaria de agradecer à Professora Dora Cristina Nunes Paulino Carinhas, pela incansável paciência, disponibilidade, incentivo e pelo interesse demonstrado durante a elaboração da presente dissertação de mestrado. Foi sem dúvida um dos elementos fulcrais para o presente trabalho poder chegar a bom porto.

Ao Capitão-de-mar-e-guerra RES Carlos Miguel R. S. de Oliveira e Lemos não só por ter sido quem me despertou o interesse na oceanografia durante o meu 3º ano da Escola Naval, mas também por todo o conhecimento transmitido, preocupação e análise crítica ao trabalho que foi sendo desenvolvido.

A todos os elementos com quem me cruzei no Instituto Hidrográfico e me fizeram sentir parte da unidade ajudando-me em tudo o que fosse necessário para a conclusão do presente trabalho.

À câmara de Oficiais do *NRP Bartolomeu Dias* com cujos conselhos e apoio sempre contei, tendo sido notável os comentários realizados ao presente trabalho o que ajudou para afinar certos detalhes.

À minha família. Ao meu pai por me ter ensinado o que é resiliência e que só com trabalho árduo se alcança o sucesso. À minha mãe por ser um exemplo constante de força e de trabalho. Ao meu irmão por todas as brincadeiras e boa disposição que lhe são características. E a todos aqueles que de uma forma ou outra fizeram parte desta etapa da minha vida.

Por fim, ao meu curso Capitão-de-mar-e-guerra Fernando Amor Monteiro de Barros por todos os momentos passados durante os últimos 5 anos e por todas as dificuldades que ultrapassámos juntos, serão certamente pessoas que levarei comigo para o resto da vida.

Resumo

A configuração dos fundos e da linha de costa em Portugal Continental influenciam a propagação da onda de maré junto à costa. Os registos maregráficos, obtidos nas estações da Rede Maregráfica Nacional, permitiram caracterizar o tipo de maré e efetuar a análise e previsão da maré astronómica nos principais portos nacionais. Na costa de Portugal, a maré é do tipo semidiurno regular, o que permite deduzir certas relações entre a amplitude e o retardo, das principais constituintes semidiurnas, pelo método não-harmónico. No presente trabalho, apresentam-se comparações e concordâncias entre mareógrafos próximos, para diferentes áreas e portos principais, para ser possível ter uma perceção de como se propaga a maré ao longo da costa. Para isso foi utilizado o *software R* e folhas de cálculo Excel para calcular as concordâncias dos portos. Foram também analisadas possíveis alterações das relações entre portos ao longo do tempo. O objetivo principal do presente trabalho foi cumprido tendo sido obtidos numerosos dados e gráficos com boa qualidade e passíveis de uma boa análise crítica onde se pode perceber como se propaga a maré na costa ocidental portuguesa. Destacam-se vários aspetos inovadores neste trabalho, nomeadamente as concordâncias entre portos principais que é algo que não foi encontrado em mais nenhum trabalho ou estudo, e o facto de ter sido analisado um longo período de dados permitindo não só perceber como evoluiu a propagação da maré e as suas constituintes ao longo dos anos, mas como se propaga agora no presente e quais são as diferenças que daí advêm. Entre várias conclusões retiradas com este trabalho as mais significativas foram: o mareógrafo de Aveiro não é favorável para concordâncias entre portos principais, a onda de maré propaga-se de Sul para Norte na costa ocidental portuguesa demorando $26' 15''$, entre Sines e Leixões, com velocidade de, aproximadamente, 821 km/h.

Palavras-chave: Concordâncias de maré, Constituintes harmónicas, Constituintes não harmónicas, Dados maregráficos, Maré.

Abstract

The configuration of the seabed and the coastline in mainland Portugal influence the tidal wave propagation near the coast. The tide gauge records, obtained in the stations of the National Tide Gauge Network, allowed to characterize the type of tide and to perform the analysis and forecast of the astronomical tide in the main national ports. In the Portuguese coast, the tide is of the regular semidiurnal type, which allows deducing certain relations between the amplitude and the delay, of the main semidiurnal constituents, by the non-harmonic method. In the present work, comparisons and concordances are presented between nearby tide gauges, for different areas and main ports, in order to be able to have a perception of how the tide propagates along the coast. This was done using the software *R* and Excel spreadsheets to calculate port concordances. Possible changes in the relationships between ports over time were also analysed. The main objective of the present work was fulfilled having been obtained numerous data and graphs with good quality and susceptible of a good critical analysis where it is possible to understand how the tide propagates in the Portuguese western coast. We highlight several innovative aspects in this work, namely the concordances between main ports which is something that has not been found in any other work or study, and the fact that a long period of data has been analysed allowing not only to understand how the tidal propagation and its constituents evolved over the years, but how it propagates now in the present and what are the differences arising from it. Among several conclusions drawn with this work the most significant were: the tide gauge of Aveiro is not favourable for concordances between main ports, the tidal wave propagates from south to north on the Portuguese west coast, taking 26' 15", between Sines and Leixões, with a speed of approximately 821 km/h.

Keywords: Tidal concordances, Harmonic constituents, Non-harmonic constituents, Tidal chart data, Tide

Índice

Introdução	1
0.1 Objetivos da dissertação	2
0.2 Estrutura da dissertação	3
1 Enquadramento teórico	5
1.1 Resumo histórico	5
1.2 Descrição das forças geradoras de maré	8
1.3 Maré de equilíbrio	12
1.4 Movimentos da Lua e do Sol	14
1.4.1 Nodos lunares	16
1.5 Fórmula harmónica para análise e previsão da maré	18
1.6 Constantes não harmónicas	23
1.6.1 Tipo de maré (R)	23
1.6.2 Relação das forças atrativas (β)	24
1.6.3 Unidade de altura (U)	25
1.6.4 Coeficiente de maré (c)	25
1.6.5 Estabelecimento médio (EM), Estabelecimento do porto (EP) e Idade da maré (IM)	26
1.7 Elementos de maré	27
1.8 Maré meteorológica	29
1.9 Sistemas anfidrómicos	30
1.10 Caracterização geral da costa portuguesa	31
2 Metodologia	33
2.1 Aquisição de dados	33
2.2 Descrição dos portos em estudo	37
2.2.1 Estações maregráficas	38
2.2.2 Constantes harmónicas	39
2.2.3 Constantes não harmónicas	40
2.2.4 Elementos de maré	42

2.3	Análise estatística preliminar	42
2.3.1	Detecção de <i>outliers</i>	43
2.3.2	Aplicação de Filtros	44
2.3.3	Análise de séries temporais	44
2.4	Concordâncias de maré	44
3	Análise dos dados e discussão dos resultados	47
3.1	Comportamento das constituintes e constantes harmónicas	47
3.2	Estatísticas descritivas dos portos	50
3.3	Concordâncias entre os portos de estudo	53
	Conclusão	62
	Bibliografia	67
	Apêndices	71
A	Scripts em R realizados para o trabalho	71
B	Resumo Alargado para presença nas 7^{as} Jornadas de Engenharia Hidrográfica / 2^{as} Jornadas Luso-Espanholas de Hidrografia	81
C	Poster apresentado nas 7^{as} Jornadas de Engenharia Hidrográfica / 2^{as} Jornadas Luso-Espanholas de Hidrografia	87
	Anexos	89
I	Esquemas de nivelamento de cada estação maregráfica em estudo	89

Lista de Figuras

1.1	Representação da força atrativa da Lua em relação à Terra	8
1.2	Forças presentes no sistema Terra-Lua	10
1.3	Esquema ilustrativo da distribuição da componente horizontal da força geradora da maré, conforme descrita pela equação	11
1.4	Relação entre a declinação do astro atractor e a desigualdade diurna, descrita a partir da forma da maré de equilíbrio	15
1.5	A órbita da Lua e a eclíptica em relação ao equador	16
1.6	Visualização gráfica dos vetores representativos das constituintes M_2 , S_2 , N_2 , K_2 , K_1 e O_1	21
1.7	Previsor de marés desenvolvido por Lord Kelvin que se encontra no IH	22
1.8	Detalhe do previsor de Lord Kelvin onde se apresenta a soma das sete CH principais	22
1.9	Níveis da maré e planos de referência	27
1.10	Influência da pressão na maré	29
1.11	Mapa cotidal do Oceano Atlântico	30
2.1	Estação maregráfica permanente em Peniche (esquerda); Estação maregráfica de campanha Terminal XXI - Sines (direita)	34
2.2	Evolução tecnológica dos equipamentos maregráficos	35
2.3	Esquema de montagem de um sensor de radar	36
2.4	Localização dos marégrafos em estudo	38
2.5	Radar Vega e Krohne	39
2.6	Deteção de <i>outliers</i> em registos maregráficos da estação de Leixões, janeiro de 2019	43
3.1	Amplitude (escala de cores em metros) e fase (graus) das constituintes harmónicas M_2 e S_2	48
3.2	Amplitude (escala de cores em metros) e fase (graus) das constituintes harmónicas K_1 e O_1	49
3.3	Representação das alturas horárias de maré observadas	50

3.4	Distribuição das frequências das Alturas Horárias em portos de regime semidiurno	51
3.5	Comparação das variações da maré para os portos em estudo	52
3.6	Diagramas de dispersão considerando o porto de referência Leixões	54
3.7	Diagramas de dispersão considerando o porto de referência Sines . .	56
3.8	Diagrama de dispersão das marés entre os portos de Leixões e Sines	59
3.9	Representação do Triângulo de Rumo	61

Lista de Tabelas

1.1	Principais constituintes harmónicas	19
1.2	Fórmulas de cálculo do argumento inicial e fator nodal	21
1.3	Coeficientes de maré de situações típicas	26
2.1	Localização dos marégrafos georreferenciada e data do início da série	37
2.2	Equipamentos de cada estação maregráfica	39
2.3	Constantes harmónicas para as estações maregráficas em estudo . .	40
2.4	Constantes harmónicas para as estações maregráficas em estudo . .	40
2.5	Constantes não harmónicas para as estações maregráficas em estudo	41
2.6	Elementos de maré para as estações maregráficas em estudo	42
3.1	Estatísticas gerais dos portos em estudo	52
3.2	Estatísticas descritivas das diferenças entre as AH de Viana do Cas- telo, Aveiro e Figueira da Foz e o porto de referência	53
3.3	Estatísticas descritivas das diferenças entre as AH de Figueira da Foz, Peniche e Sesimbra e o porto de referência	53
3.4	Concordâncias em relação ao porto de Leixões no Inverno	58
3.5	Concordâncias em relação ao porto de Leixões no Verão	58
3.6	Concordâncias em relação ao porto de Sines no Inverno	59
3.7	Concordâncias em relação ao porto de Sines no Verão	59
3.8	Concordâncias entre Sines e Leixões no Inverno	60
3.9	Concordâncias entre Sines e Leixões no Verão	60

Lista de Equações

1.1	Força atrativa da Lua num corpo situado no ponto X	9
1.2	Componente vertical da força geradora de maré	11
1.3	Componente horizontal da força geradora de maré	11
1.4	Componente de longo período da maré de equilíbrio	13
1.5	Componente diurna da maré de equilíbrio	13
1.6	Componente semidiurna da maré de equilíbrio	13
1.7	coeficiente comum da maré de equilíbrio	13
1.8	Fórmula Harmónica	18
1.10	Fórmula de cálculo do tipo de maré (R)	24
1.11	Fórmula de cálculo da relação das forças atrativas (β)	24
1.12	Fórmula de cálculo da Unidade de altura (U)	25
1.13	Fórmula de cálculo do coeficiente de maré (c)	25
1.14	Fórmula de cálculo do Estabelecimento médio (EM)	26
1.15	Fórmula de cálculo do Estabelecimento do porto (EP)	27
1.16	Fórmula de cálculo da Idade da maré (IM)	27
3.1	Cálculo do apartamento	62

Lista de Siglas e Abreviaturas

AH	Alturas H orárias
APA	Agência P ortuguesa do A mbiente
BM	Baixa - M ar
BMAM	Baixa - M ar de Á guas - M ortas
BMAV	Baixa - M ar de Á guas - V ivas
BMmin	Baixa - M ar M ínima
CH	Constante H armónica
IH	Instituto H idrográfico
OHI	Organização H idrográfica I nternacional
PM	Preia - M ar
PMAM	Baixa - M ar de Á guas - M ortas
PMAV	Preia - M ar de Á guas - V ivas
PMmáx	Preia - M ar M áxima
NMA	Nível M édio A dotado
NOAA	N ational O ceanic A tmospheric A dministration
NRP	Navio da R epública P ortuguesa
ZH	Z ero H idrográfico

Lista de Símbolos

a	Velocidade angular das constituintes harmónicas	(°/h)
d	Declinação da Lua	(°)
$(V_0 + u)$	Argumento de equilíbrio	(°)
f	Fator nodal	
F_c	Força centrífuga devido à rotação da Terra em volta do baricentro	N
F_g	Força gravitacional exercida pela Lua	N
F_t	Força geradora de maré componente horizontal exercida pela Lua	N
H_0	Altura do nível médio do mar adotado	m
ϕ	Latitude de um local na Terra	(°)
I	Inclinação da órbita da Lua relativa ao equador	(°)
ι	Inclinação da órbita da Lua relativa à eclíptica	(°)
N	Longitude do nodo ascendente da Lua	(°)
ξ	Ascensão reta da interseção da órbita lunar com o equador referida a γ'	(°)
ν	Ascensão reta da interseção da órbita lunar com o equador	(°)
H	Amplitude média da constituinte para o período do ciclo nodal	m
Ω	Nodo ascendente da lua	(°)
γ	Ponto vernal	(°)
γ'	Ponto vernal equivalente na órbita lunar	(°)
ω	Obliquidade da elíptica	(°)

Introdução

Conhecer a maré sempre foi de grande importância devido a poder ser utilizado para as mais variadas aplicações, como por exemplo: navegação em canais, estuários, baías e portos; projetos de engenharia como a construção de pontes, docas e quebra-mares; apoio a levantamentos hidrográficos, inclusivamente no estabelecimento do *datum* de cartas, e na delimitação da linha de costa oficial; para calibração de modelos hidrodinâmicos; no fornecimento de informação à engenharia militar, à pesca profissional e recreativa, à navegação e noutras atividades aquáticas para a população em geral (D. T. Pugh 1987).

No que toca ao estudo das marés, o Instituto Hidrográfico, órgão da Marinha Portuguesa, criado pelo Decreto-Lei nº 43177 a 22 de setembro de 1960 sempre foi o principal responsável pelo cálculo das previsões das marés desde a sua criação. O Instituto Hidrográfico (IH), através da Divisão de Oceanografia, tem como objetivo contribuir para o conhecimento e previsão dos principais processos físicos que caracterizam os espaços marítimos. Este objetivo é concretizado através da observação do meio marítimo, com carácter pontual ou permanente. De entre as áreas de atividade oceanográfica destacam-se as seguintes (Hidrográfico 2022):

- Publicar anualmente a tabela de marés dos portos nacionais e dos portos estrangeiros selecionados;
- Apoiar a Marinha nas áreas de oceanografia militar, da acústica submarina e da avaliação ambiental operacional;
- Apoiar, com o conhecimento oceanográfico e previsões operacionais, as autoridades competentes durante situações de crise no mar (ex. acidente Prestige);
- Apoiar a Direcção-Geral da Autoridade Marítima na elaboração de pareceres na área da dinâmica oceânica, litoral e estuarina;

A maré é o fenómeno conhecido como a oscilação vertical do nível do mar variando em tempo e tendo uma periodicidade variável que só pode ser prevista recorrendo aos fenómenos astronómicos. Já é possível afirmar, que a principal responsável pela variação da maré é a Lua, tendo o Sol também alguma influência.

O facto de o eixo da Terra estar ligeiramente inclinado implica que os fenómenos de atração gravítica que são exercidos na Terra não sejam da mesma intensidade em toda a superfície, fazendo com que haja periodicidades de maré diferentes para os diferentes locais do globo. As marés podem ser do tipo diurno, semidiurno ou misto, tendo as diurnas apenas uma baixa-mar e uma preia-mar por dia e as do tipo semidiurno duas baixas-mar e duas preias-mar.

O estudo e análise dos fenómenos das marés é um assunto há muito estudado e resolvido, sendo algo complexo tendo em vista a obtenção de modelos de alta precisão e exatidão. Daí, surge a importância deste trabalho, que faz parte do estudo contínuo que as marés exigem, não só devido ao aumento do nível médio do mar, mas também devido a muitos outros fatores que se prendem com a tipologia da costa e as suas variações ao longo do tempo.

Este trabalho pretende dar continuidade a vários estudos anteriores que tiveram como principal objetivo caracterizar a maré e as suas constituintes harmónicas para algum local da costa portuguesa. Trabalhos como “Caracterização do regime de marés”, APA, 2013 e “Caracterização da maré no estuário do Minho”, Joana Reis, 2008 e ainda “Variação temporal das principais constituintes harmónicas da maré de Cascais”, Joana Godinho, 2011 foram sem dúvida referências para este trabalho tendo sido utilizadas como mote para caracterizar a maré na nossa costa.

A grande novidade que este trabalho tem é o facto de caracterizar a propagação da maré ao longo da costa portuguesa a partir de concordâncias entre portos principais comparando também as suas constituintes e constantes harmónicas e a sua variação ao longo de costa, até agora só efetuado entre portos principais e secundários. A partir destas concordâncias entre portos principais é possível caracterizar as diferenças entre eles e assim descrever a velocidade de propagação da onda de maré ao longo da costa ocidental de Portugal Continental.

0.1 Objetivos da dissertação

Este trabalho foi desenvolvido na área da oceanografia e da análise de dados, cujo ensino na Escola Naval teve alguma incidência, nomeadamente com as cadeiras de Oceanografia I e II e Estatística. Para além destas duas áreas basilares, o curso inclui também outras cadeiras que permitiram obter o conhecimento necessário para a realização de um trabalho desta natureza. As unidades curriculares de Análise Matemática, Álgebra, Programação, Hidrografia e Navegação constituem também áreas do conhecimento que ajudam ao enquadramento analítico do tema,

à compreensão dos cálculos efetuados e são ainda uma grande ajuda na análise de todos os dados.

Sendo a investigação uma das diretivas estratégicas da Marinha Portuguesa promulgadas pelo Sr. Almirante Chefe de Estado-Maior da Armada, este trabalho tem o objetivo de dar seguimento ao estudo contínuo da maré, introduzindo algumas novidades já referidas. O principal objetivo deste trabalho é no final, ser capaz de caracterizar a propagação da maré junto à costa ocidental de Portugal e verificar se existe alguma discrepância para estudos anteriormente realizados na mesma área.

O trabalho dividiu-se em três grandes fases. Inicialmente, foi efetuada uma revisão da literatura onde foi possível consolidar e apreender todas as matérias que iriam ser necessárias para a realização de um trabalho desta natureza. Posto isto, a segunda fase do trabalho foi identificar qual a melhor combinação de marégrafos a utilizar para caracterizar a maré ao longo da costa ocidental portuguesa. Para tal, analisam-se os elementos de maré, as constantes harmónicas e calculam-se as constantes não harmónicas. Na terceira fase, foi efetuada uma interpretação dos resultados, interpretando-se os gráficos e valores obtidos ao longo da costa portuguesa para poder concluir como se comporta a maré a partir de comparações entre portos principais, não só comparando as concordâncias mas também a variação das constituintes e ainda fazendo uma análise estatística mais profunda para investigar se a propagação da maré se encontra concordante com estudos anteriores.

0.2 Estrutura da dissertação

Durante todo o processo de investigação e de desenvolvimento do trabalho foi surgindo a necessidade de alterar a estrutura proposta inicialmente no plano da dissertação de mestrado. Na verdade, as expectativas iniciais foram sendo alcançadas e as ilações resultantes justificaram na adição de novos tópicos ao trabalho e, por sua vez, tornaram outros pouco relevantes, tendo sido, por isso removidos.

A divisão final do trabalho que é agora apresentada, permite, a quem lê, compreender melhor a evolução do trabalho desenvolvido, visto que a ordem dos capítulos corresponde à forma como evoluiu a investigação.

No primeiro capítulo encontra-se o enquadramento teórico, que coincidiu com a revisão da literatura, onde se apresenta, sumariamente, toda a teoria necessária para a leitura do documento. Este capítulo baseia-se num resumo histórico inicial seguido da explicação dos fenómenos astronómicos e como eles influenciam a

maré. Do primeiro capítulo, é de realçar a análise harmónica e as concordâncias de maré que irão ser fulcrais para o restante trabalho.

No segundo capítulo é apresentada toda a metodologia utilizada para o estudo da maré ao longo da costa. Sendo neste capítulo, identificadas as estações maregráficas em estudo, como foram obtidos os dados e ainda se produziram as tabelas das constantes não harmónicas que nos permitem perceber como se comporta a maré em cada um dos portos em estudo.

No terceiro e último capítulo é feita uma análise dos resultados obtidos, onde se apresenta o comportamento da onda de maré e das constituintes harmónicas ao longo de costa, tendo sido elaborados vários *scripts* em *R* de onde provieram vários gráficos cuja interpretação tem grande importância para o trabalho. Neste capítulo, para além de estudar as concordâncias e a estabilidade das constituintes, procura-se também fazer uma análise estatística mais profunda com os dados que foram sendo tratados ao longo do processo para verificar se o conhecimento geral que se tem da maré em Portugal, corresponde com os dados que foram obtidos nos últimos anos.

Por fim, este trabalho termina com uma conclusão sobre tudo o que foi desenvolvido em comparação com o que foi proposto, sendo deixadas algumas sugestões de estudos futuros, nomeadamente, questões que entretanto surgiram mas que, devido à sua extensão, não foram respondidas.

Capítulo 1

Enquadramento teórico

1.1 Resumo histórico

O Homem sempre escolheu as zonas ribeirinhas como locais privilegiados de instalação, por isso a variação da maré sempre lhe foi familiar. A relação entre as marés com, principalmente, a Lua, é provavelmente, um dos conhecimentos astrofísicos mais antigos (Ekman 1993). Este conhecimento terá resultado da observação direta entre a correlação da posição da Lua com as ocorrências de preia-mar e baixa-mar, como das amplitudes de maré com as fases da Lua.

Há muitos séculos que o Homem procura estudar e perceber o comportamento das marés; foram elaboradas inúmeras teorias, umas foram creditadas e ainda hoje aceites, outras, apenas serviram para demonstrar a ingenuidade do Homem que tantas vezes se mostrou prejudicial. A revisão histórica que se apresenta não pretende ser exaustiva, mas sim apresentar os principais passos na observação e medição das marés que deram origem às teorias das marés e permitiram chegar ao desenvolvimento de métodos, atuais, de previsão de marés. Para uma revisão histórica exaustiva do tema das marés, pode ser consultada a obra de referência de David Cartwright "Tides: a Scientific History." (Cartwright 2000).

Os primeiros registos sobre o estudo das marés, foram deixados pelo filósofo grego Aristóteles (384 a.C. – 322 a.C.). O seu interesse pelas marés deveu-se às observações das diferenças do nível da água no estreito de Euripo, entre a ilha Eubeia e a costa continental da Beócia, no entanto, este filósofo grego não conseguiu explicar o fenómeno (Simon 2013).

Depois de Aristóteles, o geógrafo Pytheas (350 a.C.-285 a.C.) foi o primeiro a perceber a relação entre as marés e a Lua ao aperceber-se da existência de duas marés baixas e alta em cada dia, além disso, a amplitude da maré dependia da fase da Lua.

Esta descoberta pode ser considerada o ponto de partida para o desenvolvimento da teoria das marés (Cartwright 2000).

Após vários filósofos terem estudado as marés, só 1600 anos depois é que se começou a perceber a verdadeira influência da Lua nas marés (D. Pugh e Philip Woodworth 2014). Foram vários os físicos e matemáticos que estudaram as marés, porém, neste estudo serão apenas abordados os elementos cujos seus contributos foram mais relevantes para o estudo das marés.

O astrónomo alemão Johannes Kepler (1596-1650) sugeriu que a força gravitacional da Lua podia ser responsável pela geração das marés. Kepler, baseado em documentos antigos, já tinha interpretado, embora de forma qualitativa, a razão pela qual as marés apresentam amplitudes distintas dependendo da fase da Lua e comportamentos diferentes, em diferentes locais, conforme a posição da Lua (D. Pugh 1996).

Sir Isaac Newton (1642-1727), em 1687, na sua obra *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica* (Princípios Matemáticos da Filosofia Natural), enunciou a lei da gravitação universal, com base na qual deduziu a forma correta da força geradora da maré como a diferença entre as atrações gravitacionais exercidas pela Lua (ou pelo Sol) num ponto e no centro de massa da Terra. Esta última é igual à aceleração centrípeta que mantém a Terra numa órbita em torno do baricentro do sistema Terra-Lua (ou Terra-Sol), sendo a força geradora da maré uma força de deformação. Utilizando esse modelo, foi-lhe possível, pela primeira vez, calcular para diferentes locais do planeta Terra, as forças resultantes da interação do campo gravítico da Terra com os campos gravíticos da Lua e do Sol. A partir da força resultante e da consequente deformação da superfície do mar o que permitiu, pela primeira vez, que fosse explicado o facto de haver duas marés por dia em algumas regiões do planeta (Doodson e H. D. Warburg 1941).

Edmond Halley (1656-1742) auxiliou Newton e complementou o trabalho por este desenvolvido, tendo sido o primeiro a conduzir um levantamento sistemático das correntes de maré e a elaborar o respetivo mapa (Cartwright 2000).

Em 1740, a *Académie Royale des Sciences de Paris* ofereceu um prémio para o melhor ensaio teórico sobre o fenómeno das marés; o prémio foi partilhado pelos matemáticos Daniel Bernoulli, Leonhard Euler, Colin Maclaurin e Antoine Cavalleri (Cajueiro 2011).

Em 1775, Pierre-Simon Laplace (1749-1827), introduziu o conceito de “potencial gerador da maré”. Mais tarde, desenvolveu a teoria dinâmica incluindo-a

no seu tratado de mecânica celeste. Explicou a dinâmica das marés desenvolvendo um sistema de equações diferenciais com derivadas parciais. O Princípio de Laplace expressa a maré num dado ponto, como sendo a soma de componentes periódicas com as mesmas frequências das componentes da maré de equilíbrio, mas com amplitudes e fases (para cada componente) que variam de ponto para ponto. Ainda hoje, na análise e previsão das marés é utilizada a fórmula harmónica que se baseia no princípio de Laplace (Schureman 1994).

Thomas Young (1773-1829) demonstrou como é que a propagação da onda de maré podia ser representada em cartas cotidianas, alargando os estudos de Newton por forma a considerar o efeito das correntes (Cartwright 2000).

William Thomson (1824-1907), também conhecido como Lorde Kelvin, introduziu o método harmónico de análise e previsão, que foi desenvolvido por Sir George Darwin e mais tarde por A. T. Doodson. Lord Kelvin desenvolveu o primeiro previsor de marés, um computador analógico, usado por grande parte do mundo até à chegada dos meios eletrónicos, e, ainda, apresentou as equações matemáticas para a propagação das ondas de maré tendo em conta a rotação da Terra designadas por “Kelvin waves” (Doodson e H. D. Warburg 1941). O Instituto Hidrográfico (IH) possui um destes previsores de maré sendo provavelmente a peça museológica com maior valor científico existente nesse instituto.

É importante referir Doodson e Warburg autores do livro “*Admiralty Manual of Tides*”, de 1941 que continua a ser um dos manuais de referência para todos aqueles que estudam as marés, pela simplicidade e rigor na exposição da teoria das marés. De salientar ainda, o facto de Doodson ter sido o primeiro a conseguir separar 399 constituintes de maré (Doodson 1921).

Por fim, destaca-se também “*A manual of the harmonic analysis and prediction of tides*” de Schureman 1994, cujo livro contém um desenvolvimento muito extenso e rigoroso, incluindo um conjunto de tabelas que ainda hoje têm valor para verificar programas de cálculo dos argumentos iniciais e dos factores nodais das constituintes de maré.

1.2 Descrição das forças geradoras de maré

Atualmente, é um facto científico bem consolidado que as marés estão associadas à relação de atração gravítica entre a Terra e a Lua e a Terra e o Sol (Thurman 2019). No entanto, devido à superfície irregular do nosso planeta, a força gravítica não é a mesma em todos os pontos na superfície da Terra, tornando o estudo das marés complexo.

A influência que o Sol e a Lua têm nas marés deve-se, principalmente a dois fatores (Doodson e H. D. Warburg 1941):

1. à atração gravitacional entre corpos
2. à aceleração centrípeta que existe associada aos movimentos de translação em torno de um centro de gravidade comum Terra - Lua.

Uma vez que a Lua é o principal astro gerador das marés na Terra, irá ser descrita a força geradora da maré relativa à atração gravítica da Lua, considerando a dinâmica do sistema Terra-Lua. A descrição das forças geradoras da maré relativas ao Sol é análoga, e será referida sempre que necessário.

É de considerar também a inclinação da órbita lunar relativamente ao equador e a obliquidade da elíptica. Esta aceleração centrípeta é o que dá este equilíbrio ao sistema Terra-Lua, fazendo com que a Lua não saia de órbita no seu movimento natural de translação.

A figura 1.1 apresenta o Sistema Terra – Lua.

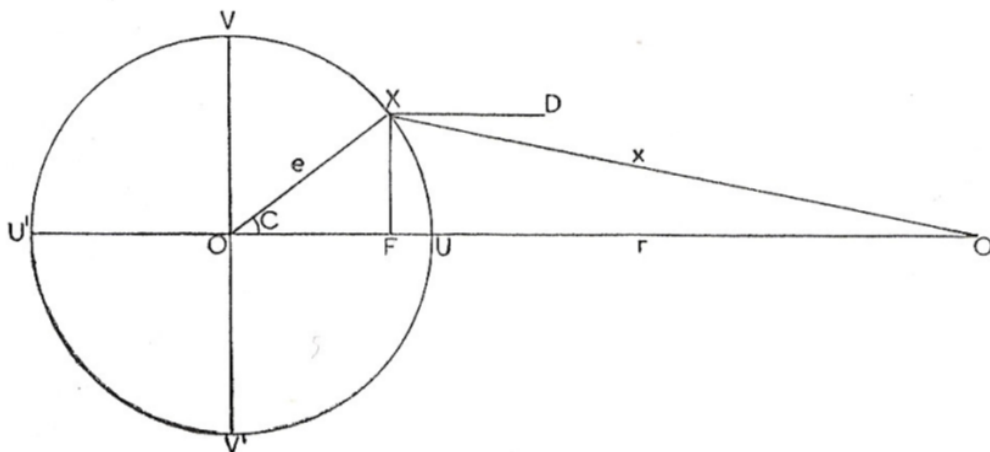


FIGURA 1.1: Representação da força atrativa da Lua em relação à Terra (Fonte: Doodson e H. D. Warburg 1941)

A figura (1.1) introduz alguma nomenclatura que será usada frequentemente ao longo do presente trabalho, a qual é descrita seguidamente:

O, O' – centros de massa da Terra e da Lua, respetivamente

U, U' – pontos onde a reta O'O intercepta com a superfície da Terra

X – Ponto à superfície da Terra

V, V' – pontos em quadratura com U, U'

r – Distância à Lua partindo da Terra

e – Raio da Terra (aproximação esférica)

x – Distância do ponto X à Lua

C – ângulo XOO' (distância zenital geocêntrica da Lua)

XD – Reta paralela a OO'

XF – Reta perpendicular a OO' partindo de X

A Terra e a Lua descrevem um movimento de translação em torno do centro de massa do sistema Terra-Lua. Para que a Terra descreva esse movimento, tem que estar sujeita a uma aceleração centrípeta que é igual à força de atracção gravítica da Lua por unidade de massa no centro de massa da Terra (Schureman 1994).

Assim, segundo Doodson e Warburg (1941), sendo g a aceleração gravítica, E a massa da Terra e M a massa da Lua, a força atrativa da Lua num corpo situado no ponto X à superfície da Terra é dada por:

$$g \frac{M}{E} \frac{e^2}{x^2} \quad (1.1)$$

Se a força de atracção gravítica da Lua fosse igual em todos os pontos da Terra, não existiria maré. A variação da intensidade e direcção dessa força entre pontos distintos da Terra gera uma força de deformação. Assim, a força geradora da maré no ponto X é definida como a diferença entre a força atrativa em X e a força sentida no centro da Terra, sendo assim uma força diferencial (Doodson e H. D. Warburg 1941).

Para se compreender o porquê das forças geradoras de maré serem de baixa intensidade e atuarem continuamente no tempo fazendo com que ocorra o movimento da água à superfície da Terra terá que ser calculada a força geradora da maré nos

pontos U, U', V e V' (figura 1.1) utilizando a fórmula (1.1), onde se irá concluir que as forças geradoras de maré têm uma ordem de grandeza aproximadamente igual a 10^{-7} vezes a força da gravidade à superfície da Terra, sendo que, a força diferencial em U tem o sentido da Lua, enquanto em U', terá o sentido oposto.

A figura 1.2 representa as forças no sistema Terra – Lua, nomeadamente (Reis 2008):

F_c - força centrífuga devido à rotação da Terra em volta do baricentro

F_g - força gravitacional exercida pela Lua

F_t - força geradora de maré componente horizontal exercida pela Lua

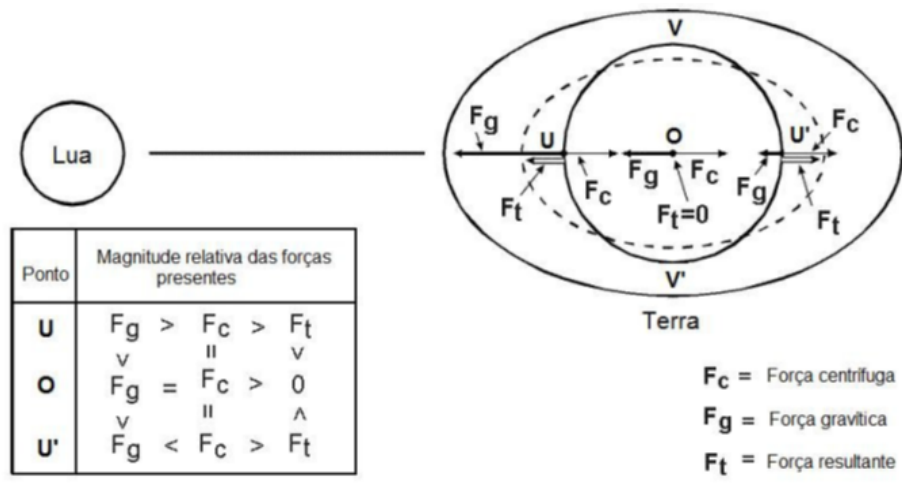


FIGURA 1.2: Forças presentes no sistema Terra-Lua (Fonte: Reis 2008)

A força centrífuga total no do sistema Terra - Lua equilibra, exatamente, a força gravítica induzida pela atração mútua entre a Terra e a Lua. A diferença entre as forças de atração gravítica da Lua em O' e em O (centro de massa da Terra) (figura 1.1) é conhecido como a Força Geradora de Maré sendo assim uma força diferencial. Esta força altera a sua intensidade e direção dependendo da posição na superfície da Terra relativamente à Lua e pode ser direcionada para a superfície da Terra, paralela a esta ou com direção contrária (Foreman 1977).

A força geradora de maré pode decompor-se em duas componentes (Doodson e H. D. Warburg 1941):

Vertical – dirigida segundo a vertical do lugar e pode ser dada pela fórmula

$$g \frac{M}{E} \frac{e^3}{r^3} (2\cos^2 C - \sin^2 C) \quad (1.2)$$

Horizontal – dirigida, tangencialmente, à Terra e pode ser dada pela seguinte fórmula

$$\frac{3}{2} g \frac{M}{E} \frac{e^3}{r^3} \sin 2C \quad (1.3)$$

Devido às forças geradoras de maré terem uma pequena magnitude comparativamente à força de atração gravítica da Terra, estas são insuficientes para, de um modo perceptível, alterar o nível da água, contrariando a atração gravítica da Terra, de onde se poderá concluir que não é a componente vertical a principal responsável pela geração das marés (Doodson e H. D. Warburg 1941). Em vez disso, as marés são geradas pela componente horizontal das forças geradoras de maré dado que esta componente não é contrariada de modo algum pela gravidade, onde pode atuar por forma a fazer deslocar a água sobre a superfície da Terra e em direção aos pontos sublunar e antipodal (figura 1.3).

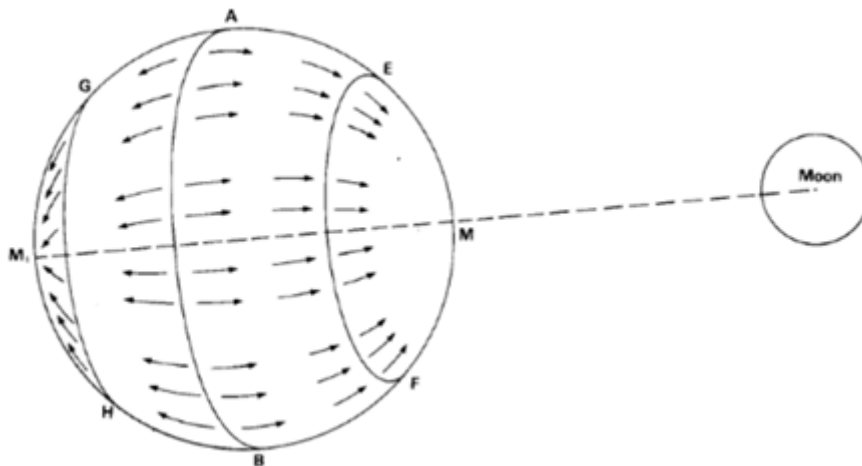


FIGURA 1.3: Esquema ilustrativo da distribuição da componente horizontal da força geradora da maré, conforme descrita pela equação 1.3 (Fonte: <https://classroom.oceanteacher.org/> visitado a 21/10/2021)

A componente horizontal é conhecida por componente de tração da força, sendo este o mecanismo que realmente produz as marés. A força de tração é nula nos pontos sublunar e antipodal, visto que a força geradora de maré é somente vertical nestes pontos (OHI 2005).

Sendo um caso da Lei da Gravitação Universal de Newton, a força geradora de maré varia inversamente com o quadrado da distância do centro de massa do corpo atraente a um dado ponto à superfície da Terra (OHI 2005).

1.3 Maré de equilíbrio

Sendo que os factores astronómicos não são os únicos a explicar a maré, surgiu a necessidade de se definir uma maré de referência. A teoria da maré de equilíbrio, introduzida por Newton, permitiu explicar pela primeira vez a distribuição das forças geradoras da maré. A relação entre a maré de equilíbrio e a maré real só foi estabelecida mais tarde por Laplace (Doodson e H. D. Warburg 1941).

A teoria do equilíbrio pressupõe algumas simplificações que a afastam da realidade por forma a facilitar o cálculo da maré, são essas: esta teoria ser aplicada como se não existissem massas continentais, com o planeta coberto de água, com profundidade constante e densidade homogénea sendo as forças de atrito e de Coriolis desprezadas e o oceano ajusta-se instantaneamente às variações da força geradora da maré. A maré teórica, que resulta destes termos, é denominada por maré de equilíbrio (Schureman 1994). Embora as hipóteses assumidas se afastem da realidade, a teoria do equilíbrio é considerada fulcral para a explicação preliminar e compreensão parcial do fenómeno da maré no planeta Terra.

Na teoria da maré de equilíbrio, as forças geradoras de maré fazem com que sejam gerados dois bolbos de maré com a mesma magnitude: um na direcção da Lua, (pela força gravitacional ser maior que a força centrífuga) e um apontado para o lado oposto da Lua (onde a força centrífuga é maior que a gravitacional) (Parker 2007). A maré de equilíbrio é a elevação do nível das águas relativamente à situação de repouso, e que a superfície que representa a maré de equilíbrio é perpendicular, em cada ponto, à direcção definida pela soma vectorial da componente horizontal da força geradora da maré por unidade de massa e da aceleração gravítica, facilitando assim também os cálculos e sendo usada como um padrão de referência relativamente ao qual as marés reais são comparadas (D. Pugh 1996).

Para melhor compreensão da maré de equilíbrio torna-se necessário introduzir algumas variáveis adicionais, sendo elas:

c – distância média entre os centros de massa dos dois astros (valor médio de r);

ϕ - a latitude do local na Terra, positiva no hemisfério norte e negativa no hemisfério Sul;

d - declinação da Lua, que é considerada positiva quando a Lua está a Norte do Equador e negativa quando está a Sul;

Z - distância angular entre o meridiano do lugar e o meridiano onde se encontra a Lua.

A forma da maré de equilíbrio obtém-se integrando uma equação que descreve a inclinação da superfície, e aplicando a condição de que o volume da água do oceano se mantém constante, isto é, que a média da elevação da superfície que representa a maré de equilíbrio é nula. Este desenvolvimento pode encontrar-se no livro de Doodson e H. D. Warburg 1941. Desse desenvolvimento, obtém-se que a maré de equilíbrio pode ser descrita como a soma de três componentes:

Componente de longo período

$$\frac{3}{4} \left(\frac{c}{r}\right)^3 \left(\frac{1}{3} - \sin^2\phi\right) \left(\frac{2}{3} - 2\sin^2d\right) \quad (1.4)$$

Componente diurna

$$-\frac{1}{2} \left(\frac{c}{r}\right)^3 \sin 2\phi \cdot \sin 2d \cdot \cos Z \quad (1.5)$$

Componente semidiurna

$$\frac{1}{2} \left(\frac{c}{r}\right)^3 \cos^2\phi \cdot \cos^2d \cdot \cos Z \quad (1.6)$$

Multiplicando por um coeficiente comum obtém-se a expressão:

$$\frac{3}{2} \frac{M}{E} \frac{e^3}{r^3} e \quad (1.7)$$

O fator c^3/r^3 é comum às constituintes das três espécies, onde se pode esperar que todas as espécies de constituintes sejam afetadas pelo mesmo fator, que depende da variação da distância entre a Terra e a Lua (Doodson e H. D. Warburg 1941).

1.4 Movimentos da Lua e do Sol

As fórmulas que descrevem as componentes da maré de equilíbrio mostram que esta depende da latitude e de três variáveis que dependem do movimento do astro atrator (Lua ou Sol): distância entre os centros de massa da Terra e do astro atrator, declinação e da distância angular entre o meridiano do lugar e o meridiano de trânsito inferior do astro. Assim, para calcular a altura da maré de equilíbrio num ponto é necessário conhecer as fórmulas que descrevem essas três variáveis em função do tempo (Thurman 2019).

A declinação do Sol varia entre os $23,5^\circ\text{N}$ e $23,5^\circ\text{S}$ enquanto que a retrogradação do plano da órbita lunar causa variações da declinação da Lua com uma amplitude que tem os máximos a variar entre $+ 28^\circ 35'$ e $+ 18^\circ 18'$ e os mínimos entre $- 18^\circ 18'$ e $- 28^\circ 35'$ em ciclos de 18,6 anos (Instituto Hidrográfico 1984a).

Torna-se também relevante apresentar o dia lunar, como sendo o intervalo de tempo entre duas passagens da Lua pelo mesmo meridiano. O tempo que a Lua demora a passar pelo mesmo meridiano não coincide com o dia solar de 24 horas, tendo então uma duração de aproximadamente 24h 50mins (Instituto Hidrográfico 1984a), pelo que as preia-mar e as baixa-mar sejam desfasadas e não ocorram à mesma hora em dias consecutivos, chama-se a isto o dia Lunar.

Em consequência de a Lua e do Sol serem astros com declinação variável, à medida que a Terra roda sobre si ao longo do dia verifica-se que a intensidade e direção da força de tração num ponto varia com o tempo. De realçar também que dependendo da latitude em que o observador se encontre faça variar a intensidade da força de tração que se faz sentir nesse ponto à superfície da Terra relativamente a outro. Estes factos referidos comprovam a existência de uma soma de oscilações de longo período, diurna e semidiurna, o que faz com que as amplitudes das oscilações diurna e semidiurna dependam da declinação e também da latitude (Reis 2008).

A desigualdade diurna que é a diferença de altura da maré entre duas preia-mares ou entre duas baixa-mares que ocorrem no mesmo dia varia com a declinação da Lua e, também, embora de forma menos pronunciada, com a declinação do Sol, sendo significativa em locais de elevada latitude e apenas quando um dos astros,

predominantemente a Lua, se encontra no máximo de declinação. Quando a Lua se encontra no Equador a desigualdade diurna é nula (IH 2021). A figura 1.4 ilustra a relação entre a desigualdade diurna e a declinação da Lua ou do Sol, para um ponto situado numa latitude Sul.

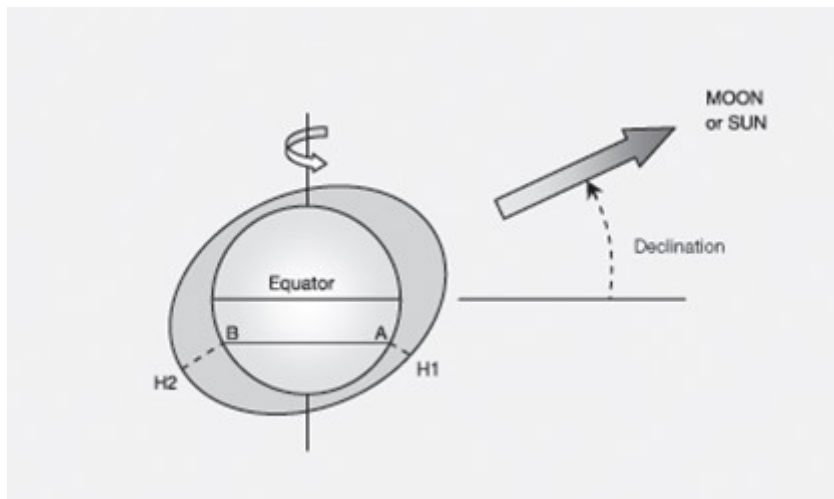


FIGURA 1.4: Relação entre a declinação do astro atrator e a desigualdade diurna, descrita a partir da forma da maré de equilíbrio. (Fonte: <https://www.linz.govt.nz/sea/tides/introduction-tides/cause-and-nature-tides>, visitado a 26/10/2021)

Para além da importância da declinação dos astros nas marés, o seu movimento de translação, quer da Lua à volta da Terra, quer da Terra à volta do Sol também tem o seu impacto nas marés, isto porque, ambos os movimentos de translação são feitos seguindo uma elipse que não tem nenhum astro como centro, havendo lugares da elipse onde os astros se encontram a distâncias diferentes relativamente a outros pontos da mesma elipse, provocando assim uma alteração das forças atrativas e, portanto, das forças geradoras de maré.

Assim, a força geradora de maré é afetada quando a Lua está no perigeu onde a força geradora de maré é 20% maior que o seu valor médio, enquanto com a Lua no apogeu a força geradora de maré é 20% menor que o seu valor médio (Instituto Hidrográfico 1984a).

Quanto ao Sol, existem 2 pontos a ter de referência, o Periélio, quando a Terra está mais próxima do Sol e o Afélio que conseqüentemente é quando a Terra está mais distante do Sol sendo a diferença entre estes dois pontos de apenas 4% da diferença entre o perigeu e o apogeu.

1.4.1 Nodos lunares

Devido à retrogradação do plano da órbita lunar, a Lua tem um movimento mais complexo que o Sol. Havendo uma variação com o período de 18,6 anos correspondente à regressão dos nodos lunares (pontos onde a Lua cruza o plano da eclíptica). Para a compreensão deste fenómeno é necessário considerar 3 planos que se interseçam, são eles: o plano da órbita da Lua, o da eclíptica e o do equador. Nos locais onde estes planos se interseçam há três pontos relevantes (Schureman 1994):

- ponto vernal (γ) que resulta da interseção da eclíptica com o equador;
- nodo ascendente da lua (Ω) que se encontra na interseção da órbita lunar com a eclíptica;
- ponto A que resulta da interseção entre o equador e a órbita da Lua.

A figura 1.5 apresenta todos os planos, pontos e ângulos referidos anteriormente.

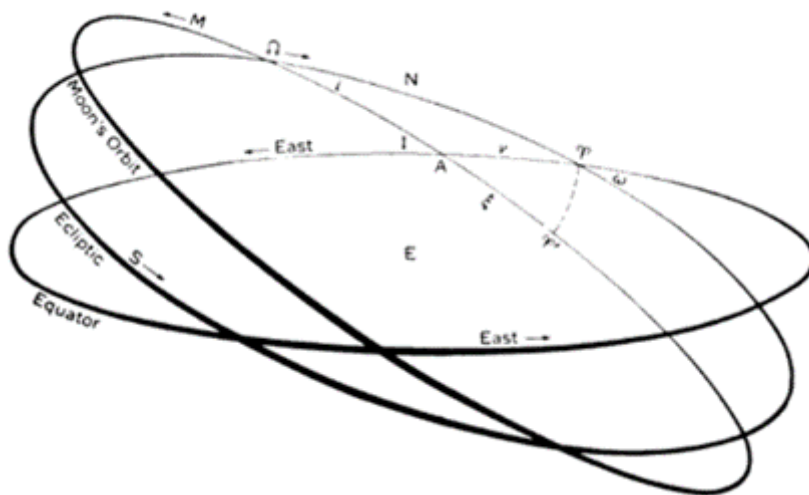


FIGURA 1.5: A órbita da Lua e a eclíptica em relação ao equador
(Fonte: Schureman 1994)

I = inclinação da órbita da Lua relativa ao equador;

i = inclinação da órbita da Lua relativa à eclíptica;

N = longitude do nodo ascendente da Lua;

γ = ponto vernal;

γ' = ponto vernal equivalente na órbita lunar;

Ω = nodo ascendente da Lua;

ξ = ascensão reta da interseção da órbita lunar com o equador referida a γ ;

ν = ascensão reta da interseção da órbita lunar com o equador;

O ângulo ω , entre o equador e a eclíptica, é designado por obliquidade da eclíptica, com um valor atual de $23^{\circ}27'$. O ângulo ι , entre a eclíptica e o plano da órbita da Lua, é designado por inclinação da órbita lunar tendo um valor médio de $5^{\circ}15'$, com uma variação entre $4^{\circ}97'$ e $5^{\circ}32'$ no ciclo nodal que dura, aproximadamente, 18,6 anos (Schureman 1994).

O ângulo I é o ângulo entre a inclinação da órbita lunar e o equador, com um valor a alterar-se com a posição do nodo da Lua, ou com a retrogradação da linha dos nodos no ciclo nodal havendo um movimento retrógrado (de precessão) do plano da órbita lunar, e portanto dos dois nodos, ascendente e descendente. No momento em que o nodo ascendente da Lua coincide com o ponto vernal, o ângulo I passa a ser a soma dos ângulos ω e i que é cerca de $28^{\circ}42'$ e no momento em que o nodo descendente coincide com o equinócio vernal, o ângulo I é igual à diferença dos ângulos ω e i que é cerca de $18^{\circ}12'$. A variação de inclinação da órbita da Lua acompanha o ciclo nodal, sendo um fator relevante, por alterar amplitudes e fases, no contexto da análise e da previsão das marés (Schureman 1994).

O movimento aparente da Lua tem uma ligeira oscilação, não sendo, portanto, uma translação constante, fazendo com que as observações mostrem que, enquanto a Lua completa uma translação completa, num período de 27,3216 dias solares médios (o período Sideral), o ciclo de oscilação norte e sul da eclíptica é completada em 27,2122 dias solares médios (Reis 2008). O nó ascendente (o ponto onde a Lua atravessa a eclíptica do Sul para o Norte) viaja para oeste (para trás uma vez que a lua e o sol para leste) em 0,1094 dias em cada 27,2122 dias, ou seja, $0,053^{\circ}$ por dia solar médio; é chamado a regressão dos nodos da Lua (Warburg 1922).

1.5 Fórmula harmónica para análise e previsão da maré

Após a introdução dos conceitos de maré de equilíbrio e todos os movimentos astronómicos que influenciam as marés, surge agora a necessidade de explicar o desenvolvimento da maré em constituintes. Esse desenvolvimento é necessário porque a declinação dos astros e o ângulo Z não têm variações uniformes ao longo do tempo.

Cada constituinte representa um astro fictício e as forças associadas a esse mesmo astro, as constituintes são representadas sob a forma de uma sinusóide, devido ao movimento de translação do astro fictício à volta da Terra e de todas as forças associadas. Considera-se que os movimentos acima descritos, para além de astros fictícios isolados podem ser dados por uma soma de componentes harmónicas, em que os ângulos das funções trigonométricas variam uniformemente com o tempo e as amplitudes são constantes para um determinado período de tempo (Doodson e H. D. Warburg 1941).

Laplace foi pioneiro na análise harmónica da maré, sendo ainda hoje o Princípio de Laplace muito importante e que se passa a enunciar:

A maré num dado ponto pode ser descrita como a soma de componentes periódicas com as mesmas frequências das componentes da maré de equilíbrio, mas com amplitudes e fases (para cada componente) que variam de ponto para ponto e são determinadas por observação (Reis 2008).

O Princípio de Laplace está na base no método da análise harmónica e da previsão da maré sendo a fórmula harmónica a seguinte:

$$H(t) = H_0 + \sum_{i=1}^n H_i \cos(\xi_i + a_i t) \quad (1.8)$$

H_0 = nível médio adotado

H_i = as amplitudes das constituintes [são constantes harmónicas do local]

$(\xi_i + a_i t)$ = ângulo que varia uniformemente com t , cujo valor num dado instante é a fase

a_i = velocidades angulares das constituintes; têm unidades de graus por hora solar média; cada constituinte tem a sua própria, independentemente do local.

1.5. Fórmula harmónica para análise e previsão da maré

ξ_i = fases iniciais das constituintes em $t=0$. Dependem do local e instante inicial escolhido.

As forças geradoras de maré, que resultam dos movimentos astronómicos, dão origem a marés parciais ou constituintes da maré astronómica, com período, fase e amplitude característicos. As constituintes harmónicas são designadas por uma ou mais letras e um subscrito numérico, que indica o tipo de constituinte (1 para diurna, 2 para semidiurna, 3 para terço diurna, etc.) Cada constituinte tem um período T e uma frequência angular geralmente representada em graus por hora, $n = 360/T$ (Reis 2008).

Existem cerca de 400 constituintes harmónicas (Bell, Vassie e PL Woodworth 1999), porém, nas tabelas de maré produzidas pelo IH são utilizadas apenas 62 constituintes harmónicas e ainda com somente 7 consegue-se prever com 88% de precisão a maré em relação às tais 62.

A Tabela 1.1 apresenta as 7 constituintes principais, os respetivos períodos, amplitudes e descrição:

Nome	Símbolo	Período (hsm)	Amplitude relativa	Descrição
Onda principal lunar semidiurna	M_2	12,42	1,0000	Representa a maré que seria produzida por uma lua fictícia que descrevesse, em movimento uniforme, uma órbita circular situada no plano do equador celeste (lua média).
Onda principal solar semidiurna	S_2	12,00	0,4652	Representa a maré que seria produzida por um sol fictício que descrevesse, em movimento uniforme, uma órbita circular situada no plano do equador celeste (sol médio).
Onda lunar semidiurna elíptica maior	N_2	12,66	0,1915	Resulta da elipticidade da órbita lunar.
Onda semidiurna declinacional luni-solar	K_2	11,97	0,1266	Representa as variações em declinação da Lua e do Sol. Também designada por sideral semidiurna.
Onda diurna declinacional luni-solar	K_1	23,93	0,5838	Representa as variações em declinação da Lua e do Sol. Também designada por sideral diurna.
Onda diurna declinacional lunar	O_1	25,82	0,4151	Traduz as variações da declinação da Lua.
Onda diurna declinacional solar	P_1	24,07	0,1932	Traduz as variações da declinação do Sol.

TABELA 1.1: Principais constituintes harmónicas (Adaptado de Dodson e H. D. Warburg 1941)

No início do século XIX, Pierre-Simon de Laplace constatou a existência de marés parciais e que estas podiam ser expressas pelo cosseno de um ângulo que aumentava uniformemente com o tempo, e aplicou os princípios da análise harmónica na determinação de preia-mares e baixa-mares (Schureman 1994).

Assim, a altura de água no instante Ht pode ser representada através de uma expressão semelhante à apresentada abaixo conhecida como fórmula harmónica da maré. Esta fórmula é universal e pode ser aplicada a qualquer tipo de maré (Doodson e H. D. Warburg 1941).

$$H(t) = H_0 + \sum_i^n f_i H_i \cos[a_i t + (V_0 + u)_i - g_i] \quad (1.9)$$

Esta expressão é bastante importante para toda a previsão das marés e será uma base para este trabalho, pelo que, serão explicados os termos que a compõem:

- H_0 , representa, para o caso da previsão, o nível médio adotado e no caso da análise, o nível médio encontrado na série;
- f_i é o fator nodal, função da obliquidade da órbita lunar sobre o equador;
- H_i é a amplitude da onda (constante harmónica);
- a_i representa a velocidade angular da constituinte ($0/h$);
- $(V_0 + u)$ é o argumento inicial e representa a situação da onda no início da série temporal e referida ao meridiano de Greenwich;
- u é uma correção ao argumento inicial;
- g_i é a fase da onda (constante harmónica);
- n é o número total de constituintes consideradas.

Nesta expressão, a velocidade angular a de cada onda é conhecida, o argumento inicial V_0 referido a qualquer tempo inicial t_0 e os argumentos u e f são determinados para o meio da série de dados e calculados a partir de tabelas publicadas em livros da especialidade (Schureman 1994).

Como já foi referido, os valores das constantes harmónicas (CH), amplitude e fase, são determinados por análise harmónica. Para se conseguir separar todas as ondas constituintes da maré, o ideal seria dispor de 19 anos de dados consecutivos, em virtude do ciclo nodal lunar de 18,6 anos. Como raramente se consegue obter uma série tão longa de dados sem qualquer falha e, uma vez que se deve considerar

as alterações da maré devidas a assoreamentos e obras portuárias, utiliza-se na prática um ano de dados o que permite separar a maior parte das ondas constituintes. As constituintes que não são separáveis num ano de dados são separadas “artificialmente” através da aplicação dos fatores nodais f e argumentos astronómicos u (Instituto Hidrográfico 1984a).

Em baixo, a tabela 1.2 contém as fórmulas de cálculo do argumento inicial e fator nodal para 4 das constituintes harmónicas (Schureman 1994).

Onda	V_0	f	u
M_2	$2T - 2s + 2h$	$1.004 - 0.0373\cos(N) + 0.0002\cos(2N)$	$-2.14\sin(N)$
S_2	$2T$	1	0
K_1	$T + h - 90^\circ$	$1.0060 + 0.1150\cos(N) - 0.0088\cos(2N) + 0.0006\cos(3N)$	$-0.86\sin(N) + 0.68\sin(2N) - 0.07\sin(3N)$
O_1	$T - 2s + h + 90^\circ$	$1.0089 + 0.1871\cos(N) - 0.0147\cos(2N) + 0.0014\cos(3N)$	$10.80\sin(N) - 1.34\sin(2N) + 0.19\sin(3N)$

TABELA 1.2: Fórmulas de cálculo do argumento inicial e fator nodal (Adaptado de Schureman 1994)

Na Figura 1.6 estão representados os vetores das constituintes semidiurnas M_2 , S_2 , N_2 e K_2 e as constituintes diurnas K_1 e O_1 . Este gráfico permite uma visão geral da importância das quatro constituintes de maior amplitude. Vão ser estas as constituintes que irão ter mais impacto na previsão das marés (Martins e Reis 2007).

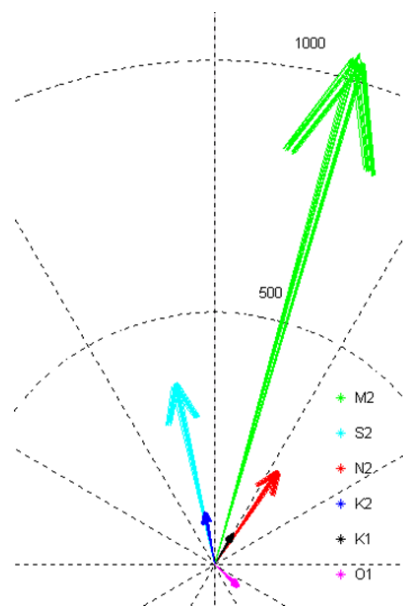


FIGURA 1.6: Visualização gráfica dos vetores representativos das constituintes M_2 , S_2 , N_2 , K_2 , K_1 e O_1 (Adaptado de Martins e Reis 2007)

No que toca à previsão das marés o Instituto Hidrográfico, sempre foi o principal responsável pelo cálculo das previsões das marés em Portugal desde a sua criação, tendo também em sua posse um dos poucos previsores de Lord Kelvin que é um instrumento ímpar na história das marés e cuja imagem 1.7 se apresenta representada abaixo, encontrando-se também a figura 1.8 que permite compreender a utilização das roldanas, que representam as constituintes, para conseguir obter a previsão final já com todas as constituintes a entrarem nesta mesma previsão.



FIGURA 1.7: Previsor de marés desenvolvido por Lord Kelvin que se encontra no IH

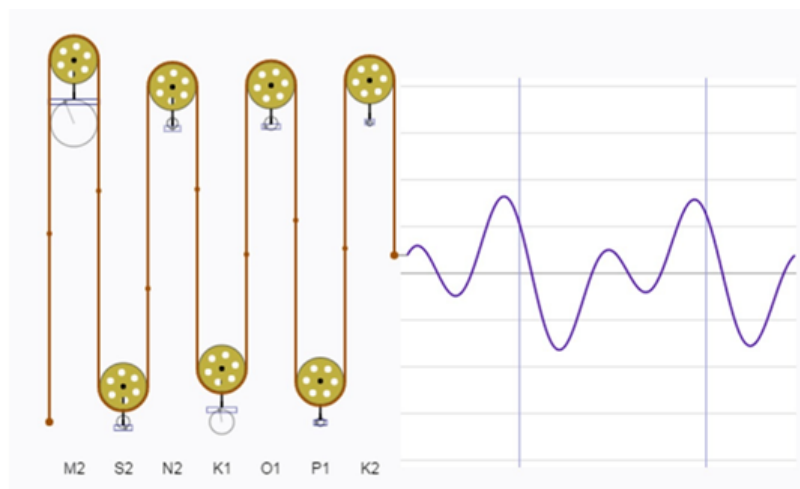


FIGURA 1.8: Detalhe do previsor de Lord Kelvin onde se apresenta a soma das sete CH principais

1.6 Constantes não harmónicas

Para além dos métodos harmónicos, existem também os métodos não harmónicos, que nos permitem deduzir as principais características da maré para determinado local (Instituto Hidrográfico, 1984). Antigamente, antes da existência da análise harmónica, as constantes não harmónicas eram deduzidas, empiricamente, com base em observações de grandezas astronómicas. Hoje em dia, as constantes não harmónicas são obtidas diretamente através de expressões que as relacionam com as constantes harmónicas. Para se poder determinar as características fundamentais da maré de um porto basta saber as CH das seguintes ondas: M_2 , S_2 , K_2, K_1 e O_1 (Doodson e H. D. Warburg 1941).

Estas constantes podem ser usadas como método expedito de análise de um porto não conhecido. O uso das constantes não harmónicas depende também do facto de haver, ou não constantes harmónicas para aquele local, sendo assim as constantes não harmónicas são uma das soluções para uma análise mais detalhada do comportamento da maré. A grande vantagem deste tipo de constantes deve-se ao facto de ser possível calcular as constantes não harmónicas com poucas CHs, simplificando assim a análise da maré (Instituto Hidrográfico 1984b).

As constantes não harmónicas são:

R: Tipo de maré

β : Relação das forças atrativas

U: Unidade de altura

c: Coeficiente de maré

EM: Estabelecimento médio

EP: Estabelecimento do porto

IM: Idade da maré

1.6.1 Tipo de maré (R)

Esta primeira constante não harmónica permite perceber, como o próprio nome indica, o tipo de maré que vigora em determinado local. As marés podem ser classificadas em quatro tipos de acordo com o valor de R que for obtido. Se $0 < R < 0,25$ a maré é considerada semidiurna regular, se $0,25 < R < 1,5$ a maré é

semidiurna com forte desigualdade diurna, se $1,5 < R < 3$ a maré é mista e se $R > 3$ a maré é diurna (Instituto Hidrográfico 1984b).

O tipo de maré deve ser a primeira constante não harmónica a ser calculada, pois este parâmetro mostra quais são as influências que a maré sofre sejam mais diurnas ou semidiurnas sendo calculada comparando as amplitudes (H) das 2 principais constituintes diurnas (K_1 e O_1) e das 2 principais semidiurnas (M_2 e S_2), tendo como fórmula de cálculo a seguinte (Instituto Hidrográfico 1984b):

$$R = \frac{H_{K_1} + H_{O_1}}{H_{M_2} + H_{S_2}} \quad (1.10)$$

A medição das restantes constantes não harmónicas depende exclusivamente do resultado do tipo de maré, se a maré for do tipo semidiurno regular como é o caso da costa portuguesa, podem-se calcular as restantes constantes não harmónicas que são representadas em seguida.

1.6.2 Relação das forças atrativas (β)

A relação das forças atrativas compara a amplitude da onda lunar média (M_2) com a amplitude da onda solar média (S_2). Quanto mais alto for o valor de β menor é a diferença entre as amplitudes das águas-vivas e das águas-mortas. Inversamente, valores baixos de β fazem prever grandes diferenças entre águas-vivas e águas mortas (Instituto Hidrográfico 1984b).

Na costa portuguesa e para a maioria dos portos portugueses, a relação das forças atrativas é à volta de 3, demonstrando que a influência da Lua na maré é cerca de 3 vezes maior que a influencia do Sol. Em Moçambique, ao calcular a relação das forças atrativas obtiveram-se valores de β abaixo de 2, o que demonstra as grandes diferenças que existem entre os níveis da água nas marés-vivas e nas marés-mortas para este local.

$$\beta = \frac{H_{M_2}}{H_{S_2}} \quad (1.11)$$

1.6.3 Unidade de altura (U)

A unidade de altura é a soma das amplitudes das constituintes M_2 , S_2 e K_2 e descreve a ordem de grandeza das amplitudes registadas em determinado local. A constituinte K_2 , que representa as variações da declinação da Lua e do Sol, está em fase com a S_2 duas vezes por ano (nos equinócios), daí também se chamar à unidade de altura semi-amplitude das marés vivas equinociais (Instituto Hidrográfico 1984b).

Para todos os portos da costa continental portuguesa, a unidade de altura é muito próxima de 1,5 m. Na Ilha da Madeira é perto de 1 m e no arquipélago dos Açores, não ultrapassa muito os 0,7 m.

Nos estuários, se não existirem outros fatores externos, a tendência é para a amplitude da onda de maré diminuir à medida que se progride para montante até certo ponto, devido ao impacto dos fundos pouco profundos e das alterações que podem provocar devido ao atrito sobre o fundo e sobre a margem induzindo perdas de energia.

$$U = H_{M_2} + H_{S_2} + H_{K_2} \quad (1.12)$$

1.6.4 Coeficiente de maré (c)

Associado ao conceito de unidade de altura, surge o coeficiente de maré, este de variação temporal. A comparação de qualquer amplitude H que facilmente é obtido, neste caso particular, subtraindo a PM pela BM e posteriormente dividindo por 2 com a correspondente unidade de altura (U) define o coeficiente de maré. A unidade de altura constitui um valor padrão para cada porto, ao qual é atribuído o coeficiente de maré 100 dado pela fórmula (Instituto Hidrográfico 1984b):

$$c = \frac{H}{U} \times 100 \rightarrow H = \frac{c}{100} \times U \quad (1.13)$$

Pode-se, assim, estabelecer uma escala de coeficientes de maré correspondentes a situações típicas, útil quando se pretende estimar o valor da amplitude de maré (apresentado na tabela abaixo).

Coeficiente de Maré (c)	Situação Típica
20	Águas-mortas mínimas
45	Águas-mortas médias
95	Águas-vivas médias
100	Águas-vivas de equinócio
120	Águas-vivas máximas

TABELA 1.3: Coeficientes de maré de situações típicas (Fonte: Instituto Hidrográfico 1984b)

1.6.5 Estabelecimento médio (EM), Estabelecimento do porto (EP) e Idade da maré (IM)

O Estabelecimento médio (EM) representa o atraso médio de uma preia-mar em relação à passagem da lua média (constituente M_2), pelo meridiano do lugar, sendo, k_{M_2} a fase k da onda M_2 . Este valor antigamente era obtido com a média dos atrasos ao longo de pelo menos um mês lunar, ou seja, 29 dias. Por essa razão era mais utilizada a constante não harmónica designada de Estabelecimento do porto (EP), que se obtinha mais facilmente a partir de um número menor de observações (Instituto Hidrográfico 1984b).

$$EM = \frac{k_{M_2}}{a_{M_2}} \quad (1.14)$$

O Estabelecimento do porto (EP) é o atraso que é obtido em dias de lua cheia ou lua nova, quando a passagem meridiana inferior ou superior da lua ocorre à meia-noite. Atualmente o seu valor é calculado com as diferenças de fase entre as constituintes S_2 e M_2 e da sua relação de amplitudes. A fase k, contrariamente à fase g usada na fórmula harmónica, considera tempo local, e trânsito local (e não em Greenwich) do astro fictício que dá origem à constituinte (Doodson e H. D. Warburg 1941).

$$EP = \frac{k_{M_2}}{a_{M_2}} + \frac{1}{a_{M_2}} \arctan \left[\frac{\sin(k_{S_2} - k_{M_2})}{\frac{H_{M_2}}{H_{S_2}} + \cos(k_{S_2} - k_{M_2})} \right] \quad (1.15)$$

Quanto à Idade da maré (IM) é o atraso médio da maré viva em relação à sizígia, ou seja, o atraso entre a ocorrência da maré viva, e a Lua Nova ou Lua Cheia correspondente (Instituto Hidrográfico 1984b).

$$IM = \frac{k_{S_2} - k_{M_2}}{a_{S_2} - a_{M_2}} \quad (1.16)$$

1.7 Elementos de maré

Outros parâmetros caracterizadores da maré num porto são os elementos de maré. Antes da apresentação dos elementos de maré, há que considerar alguns níveis de referência vertical para se efetuar uma análise e previsão de marés.

A Figura 1.9 apresenta os diferentes níveis, a partir dos quais são medidas as marés, bem como os planos de referência que são utilizados.

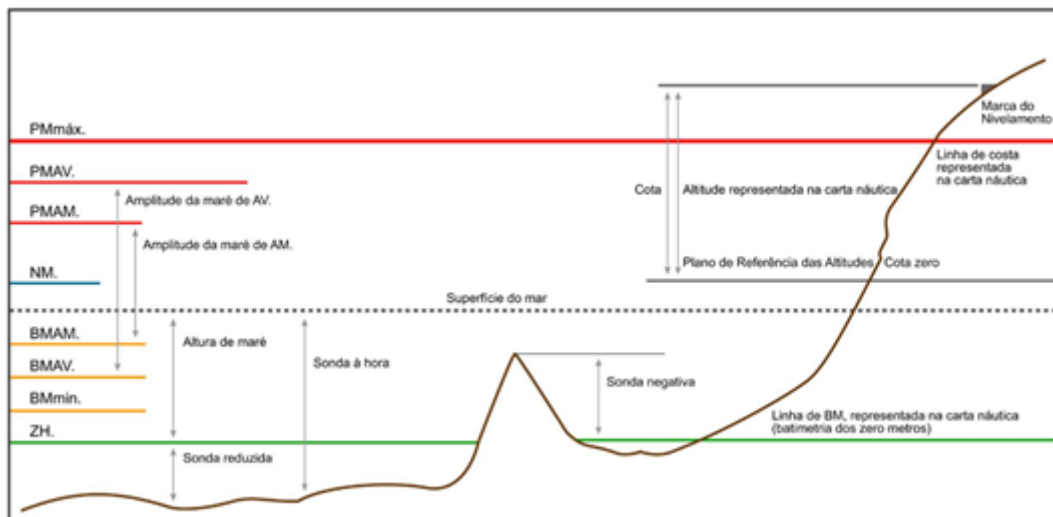


FIGURA 1.9: Níveis da maré e planos de referência (Adaptado de Tabela de Marés 2021)

Com (IH 2021),

PM_{máx} - preia-mar máxima: nível de maré astronómica mais alta;

PM_{AV} - preia-mar de águas-vivas: é o valor médio das alturas de maré de duas preias mares consecutivas que ocorrem quinzenalmente e onde a amplitude de maré é maior (próximo de Lua Nova ou Lua Cheia);

PM_{AM} - preia-mar de águas-mortas: é o valor médio das alturas de maré de duas preias mares consecutivas que ocorrem quinzenalmente e onde a amplitude de maré é menor (próximo de Quarto Crescente ou Quarto Minguante);

NM - nível médio: é o valor médio adotado para as alturas de maré de um determinado porto;

BM_{AM} - baixa-mar de águas-mortas: é o valor médio das alturas de maré de duas baixa mares consecutivas que ocorrem quinzenalmente e onde a amplitude de maré é menor (próximo de Quarto Crescente ou Quarto Minguante);

BM_{AV} - baixa-mar de águas-vivas: é o valor médio das alturas de maré de duas baixa mares consecutivas que ocorrem quinzenalmente e onde a amplitude de maré é maior (próximo de Lua Nova ou Lua Cheia);

BM_{min} - baixa-mar mínima: nível de maré astronómica mais baixa;

ZH - Zero Hidrográfico: é o plano de referência em relação ao qual são referidas as sondas e as linhas isobatimétricas das cartas náuticas, e as previsões de maré que constam nas Tabelas de Marés do IH.

De um modo geral, os elementos de maré são os valores médios e os valores extremos das PM e BM, sendo o seu cálculo diferente, conforme a sua aplicação. Os seus cálculos são diferentes se estes elementos se destinam ou às cartas náuticas oficiais ou para as tabelas de marés. É de realçar que os elementos de maré são referentes ao ZH e apenas consideram causas astronómicas.

Os elementos de maré que se encontram na Tabela de Marés são calculados com base nos valores das previsões para esse ano, sendo os valores extremos (PM_{máx} e BM_{min}) os encontrados nas previsões para esse ano.

Para as cartas náuticas, devido a estas não serem atualizadas todos os anos, tenciona-se que os elementos de maré, sejam calculados com valores representativos de todo o ciclo nodal lunar. Assim, calcula-se os valores médios a partir das constantes harmónicas e, para o caso da PM máxima e BM mínima, publicam-se os valores extremos encontrados em previsões com menos, 19 anos consecutivos.

1.8 Maré meteorológica

Na maré real existem variações do nível da água não associadas à maré astronómica. A essas variações dá-se o nome de maré meteorológica onde são considerados os fatores meteorológicos que não podem ser previstos com exatidão. As diferenças entre a maré prevista e a maré observada devem-se, principalmente, a ventos fortes ou de longa duração e por pressões atmosféricas, anormalmente, baixas ou altas. As diferenças em tempo são devidas à ação do vento.

O fator meteorológico que mais afeta as marés é a pressão atmosférica. Baixas pressões fazem subir o nível do mar enquanto que altas pressões têm o efeito inverso. Aproximadamente, uma variação de pressão de 10 hectopascal (milibares) corresponde a uma variação do nível da água de 0.09 metros (IH 2021). As variações descritas podem-se verificar em qualquer gráfico que apresente uma relação entre a altura da maré prevista, a altura de maré real e a pressão atmosférica como no exemplo da figura 1.10 (D. Pugh e Philip Woodworth 2014).

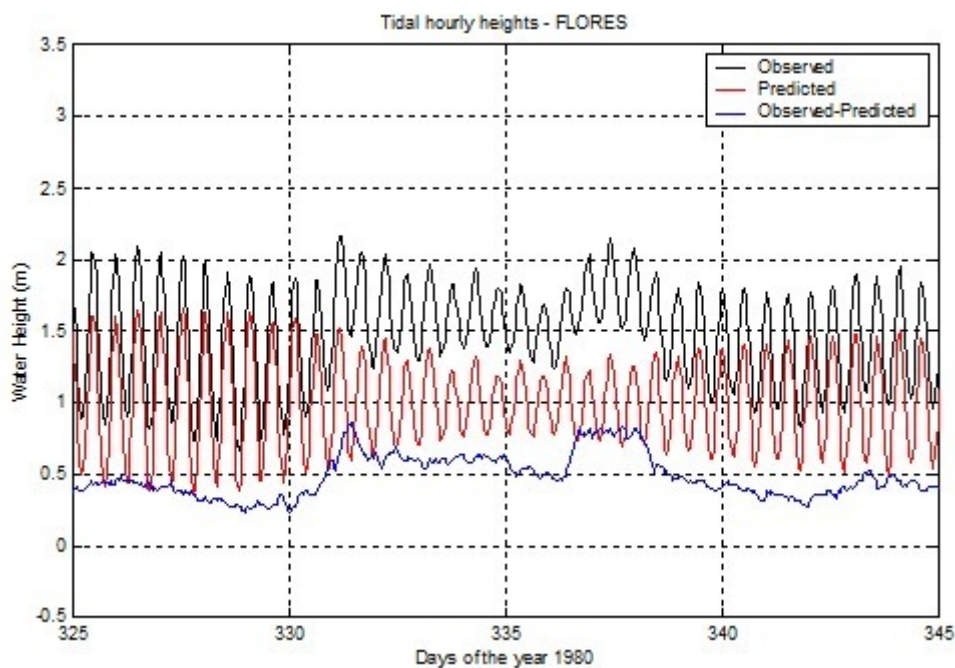


FIGURA 1.10: Influência da pressão na maré (Fonte: Instituto Hidrográfico)

O vento também tem uma grande influência e as tempestades que de tempos em tempos se fazem sentir ainda mais, como a tempestade de 12 de novembro de 1970 no Bangladesh, o nível das águas subiu 9 metros após ventos com mais de 60 m/s. Assim mostra-se a importância das marés meteorológicas.

Estas marés têm outro fator importante a ter em conta, sendo a topografia do fundo do mar, pois com os mesmos fatores meteorológicos em sítios com topografias de fundo diferentes irão ter, também, um resultado diferente, devendo ter em conta a forma complexa e irregular dos continentes (D. Pugh e Philip Woodworth 2014).

1.9 Sistemas anfdrómicos

Devido à forma complexa e irregular dos continentes, por estarem compartimentados em bacias, e à rotação da Terra, a propagação da onda de maré assume um formato bastante complicado. A propagação da onda de maré faz-se à volta de um ponto central, denominado por ponto anfdrómico e onde a amplitude da maré é nula. São pontos nas bacias oceânicas onde o nível da água não é alterado pelo fenómeno das marés. Usualmente, este ponto está situado, aproximadamente, no centro de cada bacia e em cada hemisfério (D. Pugh e Philip Woodworth 2014).

A rotação das linhas cotidais dá-se à volta destes pontos devido ao efeito de Coriolis tendendo a girar no sentido anti-horário no hemisfério norte e no sentido horário no hemisfério sul (D. Pugh e Philip Woodworth 2014). Esta circulação complexa das marés constitui o chamado sistema anfdrómico como se apresenta na figura 1.11.

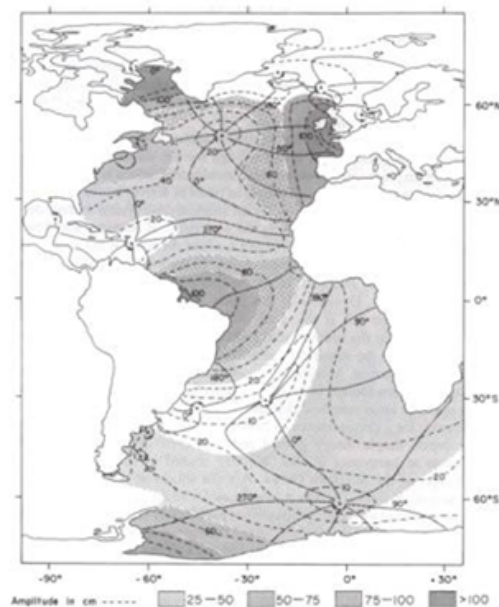


FIGURA 1.11: Mapa cotidal do Oceano Atlântico (Fonte: D. T. Pugh 1987)

Num sistema anfifrómico, a crista da onda de maré circula em torno de um ponto anfifrómico. Em cada sistema, as linhas cotidais, linhas sobre as quais uma determinada fase da maré ocorre simultaneamente, partem de forma radial dos pontos anfifrómicos e as linhas de igual amplitude de maré formam trajetórias quase concêntricas em torno dos pontos anfifrómicos (D. Pugh e Philip Woodworth 2014). É a partir destas linhas cotidais e dos pontos anfifrómicos que são feitos os mapas cotidais, para entender como circula a maré em todo o globo ou numa determinada região.

1.10 Caracterização geral da costa portuguesa

A maré astronómica que se faz sentir em Portugal (continente e ilhas) é do tipo semidiurno, com uma desigualdade diurna (diferença entre duas PM ou BM consecutivas) relativamente reduzida podendo variar entre 5 a 20 cm (Martins e Reis 2007).

Este tipo de maré semidiurna é conhecido por uma onda com um período médio de 12h 25 min, tendo duas Preia-mar e duas Baixa-mar diárias, o que resulta num atraso diário médio de 50 minutos. Ao longo da costa continental portuguesa, a onda de maré, propaga-se à semelhança de uma onda de Kelvin, de Sul para Norte, onde a sua amplitude aumenta em direção à costa, demorando, aproximadamente, 35 minutos entre Lagos e Leixões com uma velocidade média de 840 km/h (APA 2013). Este efeito justifica os atrasos médios que se vão fazendo sentir entre os portos em estudo.

O Zero Hidrográfico (ZH) está situado a alguns centímetros abaixo do nível da maré Astronómica mais baixa (BMmin), pelo que, as previsões da altura de maré (publicadas nas Tabelas de Maré do IH) são sempre positivas. Nos portos do Continente, o ZH encontra-se 2 metros abaixo do Nível Médio do Mar Adotado (NMA), com exceção de Lisboa e Cascais onde se encontra a 2.20 metros e 2.08 metros, respetivamente. No Arquipélago da Madeira o ZH encontra-se a 1.40 metros abaixo do NMA, enquanto que, no Arquipélago dos Açores encontra-se a 1 metro abaixo do NMA.

Entre Portugal Continental e os Arquipélagos dos Açores e da Madeira é de notar uma diferença de amplitude de maré entre estes três locais. Em Portugal Continental, a amplitude é superior à das Ilhas, não chegando a atingir os 2 m. Nos arquipélagos encontram-se amplitudes inferiores, devido ao facto de se encontrarem em pleno oceano, fora da influência da plataforma continental, onde a profundidade

é menor. O Arquipélago dos Açores é o local que apresenta a amplitude de maré menor (cerca de 1 m) por se encontrar perto do ponto anfifrómico da bacia do Atlântico Norte.

Capítulo 2

Metodologia

2.1 Aquisição de dados

Entende-se por estação maregráfica, uma estação de medição do nível da água do mar composta por:

- Equipamentos de registo de níveis de água ou marégrafos – que podem ser compostos por sensores de medição e sistema de controlo e registo das aquisições ou mais frequentemente denominados por dataloggers;
- Rede de marcas de nivelamento, para controlo das medições relativamente a um determinado datum;
- Estrutura para abrigo dos componentes da estação;
- Sempre que possível, sistema de comunicações para envio dos dados por via remota.

As estações maregráficas podem ser divididas em dois tipos: estações maregráficas principais ou de referência e estações maregráficas secundárias ou de campanha.

O primeiro tipo tem um carácter permanente, isto é, trata-se de estações maregráficas instaladas em locais estratégicos da região costeira, cujo intuito é uma medição contínua dos níveis de água, principalmente da maré, nesse local, como se pode observar na figura 2.1.



FIGURA 2.1: Estação maregráfica permanente em Peniche (esquerda); Estação maregráfica de campanha Terminal XXI - Sines (direita) (Fonte: Imagens cedidas pela Divisão de Oceanografia do IH)

Ao equipamento utilizado para medir e registar a maré num determinado local dá-se o nome de marégrafo. Este equipamento, para além da maré, regista também a variação do nível médio do mar e, dependendo do intervalo de registo dos dados, outras variações do nível das águas do mar, como agitação marítima, seichas e outras de origem meteorológica (Instituto Hidrográfico 1984c).

Um marégrafo deve ter uma elevada exatidão, com erro inferior a 1 cm, em qualquer instante e em quaisquer condições de maré, agitação marítima, correntes, meteorologia, etc. Este nível de exatidão requer um bom nível de manutenção e de controlo de qualidade (COI 1985; OHI 2005).

Atualmente existem 4 tipos de marégrafos distintos, facilmente identificáveis de acordo com a tecnologia que utilizam para medir o nível do mar: marégrafos de flutuador, sensores de pressão, sensores acústicos e sensores radar. Seguidamente são descritas, de forma resumida, as principais características dos diferentes tipos de marégrafos.

Quanto aos marégrafos de flutuador e contrapeso já não se encontram a ser utilizados pelo IH, não só devido a já existirem equipamentos melhores e mais precisos, mas também porque necessitam de um abrigo, de um poço tranquilizador, de um operador e de manutenção diária, o que faz com que os novos equipamentos sejam mais práticos e de mais fácil utilização.

2.1. Aquisição de dados

A mediação de um marégrafo de sensor de pressão é realizada através de uma membrana que sofre com a variação da pressão com a subida/descida do nível da água, transformando esta alteração em sinais elétricos permitindo a sua leitura. Este tipo de marégrafo não necessita de poço tranquilizador, no entanto, necessitam de alguma limpeza temporária do sensor e não permitem recolha de dados remotamente não sendo por isso utilizados, devido a, atualmente, os dados serem recolhidos remotamente pelo IH.

Os marégrafos acústicos emitem um sinal acústico que se propaga através de um tubo de 16 mm refletindo na água sendo assim possível saber a altura de maré. Estes marégrafos necessitam de poço tranquilizador, não necessitam de operador, têm baixas necessidades de manutenção e permitem recolha de dados remotamente.

Apesar dos marégrafos acústicos serem aparelhos úteis para a leitura das marés, os marégrafos mais utilizados são os marégrafos de radar que não necessitam de poço tranquilizador, não precisam de um operador, têm uma baixa necessidade de manutenção, permitem a recolha de dados remotamente e há uma grande exatidão do equipamento, ou seja, uma grande precisão dos dados observados.

A Figura 2.2 mostra a evolução cronológica dos marégrafos utilizados no IH.



FIGURA 2.2: Evolução tecnológica dos equipamentos maregráficos
(Fonte: Imagens cedidas pela Divisão de Oceanografia do IH)

Para uma descrição mais detalhada do seu funcionamento sugere-se a consulta dos quatro volumes dos Manuais de Medição e Interpretação do Nível do Mar, elaborados pela Comissão Oceanográfica Internacional (COI 1985).

As estações maregráficas incluídas neste estudo, são estações permanentes onde estão instalados marégrafos de radar. Estes marégrafos são instalados acima

da linha de água e conseguem medir a distância entre a superfície e o aparelho através de frequências radar, sendo do mais avançado que existe para a leitura de marés. É usado um sinal de alta frequência na ordem dos 10 Ghz, através da emissão de micro-ondas, que aumentam linearmente 1 GHz durante a medida. O radar é instalado juntamente com um Logger, que serve para armazenar e enviar os dados para a entidade reguladora que, neste caso, todos os marégrafos em estudo estão sobre jurisdição do Instituto Hidrográfico, sendo enviados os dados para o servidor em tempo real, através de um modem que utiliza a rede móvel GPRS.

Na imagem (2.3) encontra-se representado um esquema de um marégrafo de radar, onde se pode observar a disposição do marégrafo e as linhas de referência para a sua instalação.

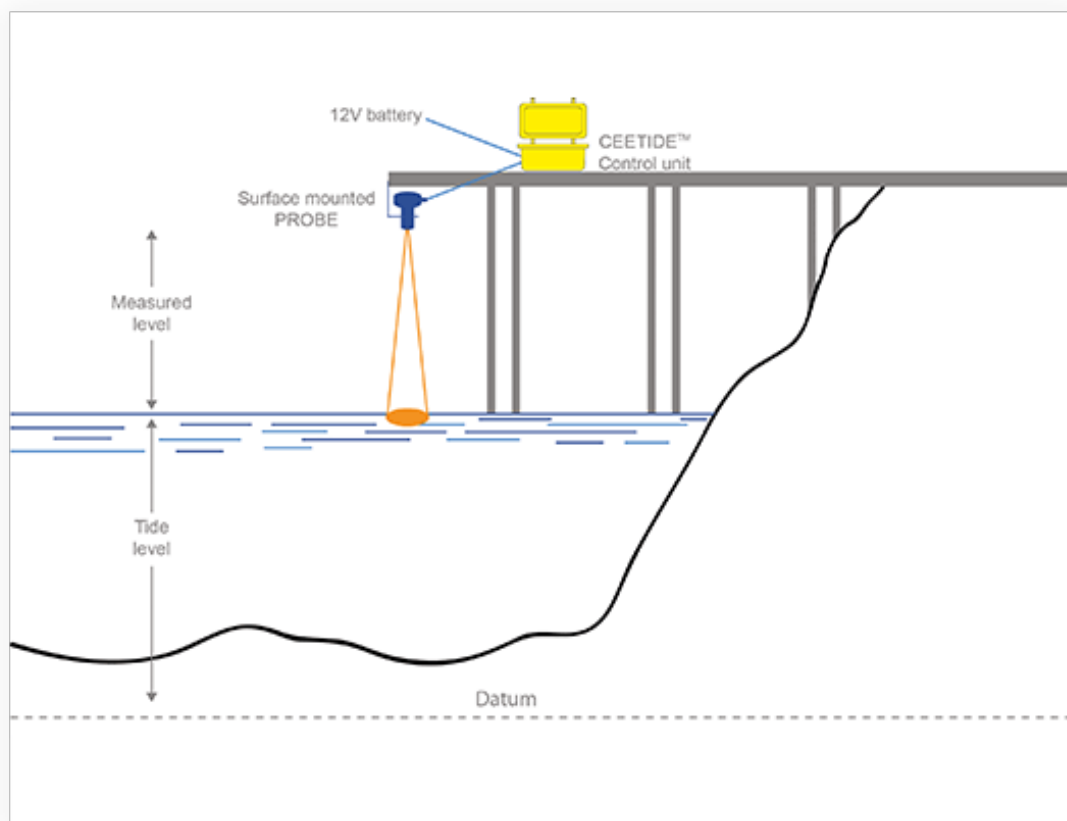


FIGURA 2.3: Esquema de montagem de um sensor de radar
 (Fonte: <https://ceehydrosystems.com/products/tide-gauge/ceetide/>
 (Visitado a 27/05/2022)

2.2 Descrição dos portos em estudo

Para este trabalho, foram selecionados várias estações maregráficas ao longo da costa ocidental portuguesa de modo a que fosse possível fazer a caracterização da mesma.

Dos 13 portos principais cujas previsões de maré se encontram na Tabela de Marés foram excluídos, inicialmente, quatro, nomeadamente, os portos de Cascais e Lagos cuja gestão é da responsabilidade da Direção Geral do Território (DGT); os portos de Faro e Vila Real de Santo António foram retirados por se encontrarem na costa Sul de Portugal Continental, fora da área de estudo.

Os portos não oceânicos, localizados em zonas de estuário também foram excluídos por serem influenciados tanto por correntes, descargas bem como pela existência de fundos baixos. Com estas características foram excluídos os portos de Lisboa e Setúbal-Troia.

A tabela 2.1 apresenta a localização dos portos estudados e ainda a data de início de funcionamento das respetivas estações maregráficas:

ESTAÇÃO MAREGRÁFICA	LATITUDE	LONGITUDE	DATA DO INÍCIO DA SÉRIE
VIANA DO CASTELO	41° 41'.10 N	008° 50'.38 W	31/12/1977
LEIXÕES	41° 11'.1 N	008° 42'.2 W	01/01/1956
AVEIRO	40° 38'.65 N	008° 44'.92 W	13/11/1975
FIGUEIRA DA FOZ	40° 08'.90 N	008° 51'.37 W	15/09/1977
PENICHE	39° 20'.99 N	009° 22'.48 W	20/10/1957
SESIMBRA	38° 26'.29 N	009° 06'.77 W	01/08/1974
SINES	37° 56'.8 N	008° 53'.2 W	09/05/1977

TABELA 2.1: Localização dos marégrafos georreferenciada e data do início da série (Fonte: IH 2021)

Fonte: IH 2021

Na figura 2.4 apresentam-se os portos incluídos neste trabalho. Os esquemas de nivelamento de cada estação maregráfica encontram-se no Anexo I.



FIGURA 2.4: Localização dos marégrafos em estudo (Adaptado da Tabela de Marés 2021)

2.2.1 Estações maregráficas

Anteriormente, foi referido os vários tipos de marégrafos que existiam, sendo agora necessário compreender quais é que efetivamente são usados na nossa costa para a medição das marés e ainda o tipo de equipamento que é utilizado. A maioria das estações maregráficas é composta por, pelo menos, dois equipamentos maregráficos cujo objetivo é garantir redundância das observações. Em toda a costa portuguesa está instalada uma rede de marégrafos somente do tipo radar, existindo dois equipamentos distintos a serem utilizados: o radar Vega e o radar Krohne, há também algumas estações maregráficas capazes de medir a pressão atmosférica a partir de um medidor de pressão que apenas algumas estações possuem.

Na tabela (2.2) apresenta-se os equipamentos que se encontram em cada estação maregráfica ao longo da costa.

ESTAÇÃO MAREGRÁFICA	RADAR VEGA	RADAR KROHNE	SENSOR DE PRESSÃO
VIANA DO CASTELO	2	0	SIM
LEIXÕES	2	0	NÃO
AVEIRO	2	0	NÃO
FIGUEIRA DA FOZ	1	1	SIM
PENICHE	2	0	NÃO
SESIMBRA	1	1	SIM
SINES	1	1	SIM

TABELA 2.2: Equipamentos de cada estação maregráfica

De seguida encontra-se a imagem (2.5) de uma estação maregráfica onde se pode observar os 2 tipos de radares utilizados, à esquerda um radar da marca Vega e à direita um radar da marca Krohne.

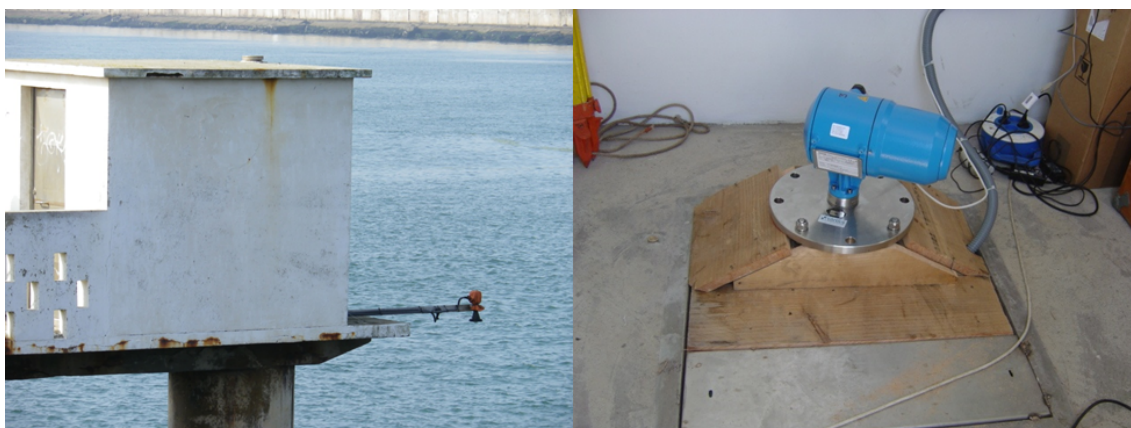


FIGURA 2.5: Radar Vega e Krohne (Fonte: Imagens cedidas pela Divisão de Oceanografia do IH)

2.2.2 Constantes harmónicas

Como anteriormente foi referido, para se caracterizar um porto torna-se necessário conhecer as constantes harmónicas, não só para a análise da maré nesse local, mas também para a previsão. Estas constantes são também importantes para o cálculo das constantes não harmónicas e para os elementos de maré que nos permitem um aprofundamento no estudo de um porto.

Na tabela 2.3 apresentam-se as constantes harmónicas para as estações maregráficas em estudo. Estes dados foram fornecidos pela Divisão de Oceanografia do

IH, na tabela de marés, apenas estão disponibilizadas as constantes harmónicas a altura (H) e a fase g , das constituintes M_2 , S_2 , K_1 , O_1 .

ESTAÇÃO MAREGRÁFICA	M2		S2		K1		O1		K2	
	H.m	Gº	H.m	Gº	H.m	Gº	H.m	Gº	H.m	Gº
VIANA DO CASTELO	1.044	75.9	0.364	104.1	0.071	61.3	0.062	319.0	0.104	102.5
LEIXÕES	1.044	76.1	0.366	104.4	0.070	60.2	0.062	319.4	0.104	102.4
AVEIRO	0.969	78.9	0.330	107.5	0.062	63.4	0.055	321.1	0.093	104.5
FIGUEIRA DA FOZ	1.033	75.4	0.361	104.1	0.066	63.0	0.061	319.4	0.101	100.4
PENICHE	1.030	69.8	0.360	97.2	0.075	55.6	0.062	315.6	0.101	93.9
SESIMBRA	0.980	64.0	0.346	90.0	0.069	54.7	0.060	314.9	0.097	87.9
SINES	0.988	63.3	0.351	90.3	0.071	53.8	0.061	314.2	0.096	87.0

TABELA 2.3: Constantes harmónicas para as estações maregráficas em estudo

A tabela 2.4 apresenta a velocidade angular (a_i) e os retardos (k) de cada constituinte.

ESTAÇÃO MAREGRÁFICA	M2		S2		K1		O1		K2	
	a_i	k°	a_i	k°	a_i	k°	a_i	k°	a_i	k°
VIANA DO CASTELO	28.98	58.3	30.00	86.4	15.04	52.4	13.94	310.2	30.08	84.8
LEIXÕES	28.98	58.7	30.00	87.3	15.04	51.2	13.94	309.4	30.08	85.0
AVEIRO	28.98	61.4	30.00	90.0	15.04	54.7	13.94	312.4	30.08	87.0
FIGUEIRA DA FOZ	28.98	57.7	30.00	86.4	15.04	54.1	13.94	310.6	30.08	82.7
PENICHE	28.98	51.0	30.00	78.5	15.04	46.3	13.94	306.2	30.08	75.2
SESIMBRA	28.98	45.8	30.00	71.8	15.04	45.6	13.94	305.8	30.08	69.7
SINES	28.98	45.5	30.00	72.5	15.04	45.0	13.94	305.3	30.08	69.2

TABELA 2.4: Constantes harmónicas para as estações maregráficas em estudo

2.2.3 Constantes não harmónicas

A partir das equações (1.10, 1.11, 1.12, 1.14, 1.15, 1.16), apresentadas na secção 1.6, e com base nas informações que se encontram nas tabelas (2.3) e (2.4) é possível calcular as constantes não harmónicas. Estas permitem uma análise mais concreta da maré na nossa costa.

A tabela seguinte (2.5) apresenta os resultados das constantes não harmónicas para os diferentes portos:

ESTAÇÃO MAREGRÁFICA	R	β	U	EM	EP	IM
VIANA DO CASTELO	0.09	2.87	1.512	2:01	2:16	27:33
LEIXÕES	0.09	2.85	1.514	2:02	2:17	28:03
AVEIRO	0.09	2.94	1.392	2:07	2:22	28:02
FIGUEIRA DA FOZ	0.09	2.86	1.495	1:59	2:14	28:08
PENICHE	0.10	2.86	1.491	1:46	2:00	26:58
SESIMBRA	0.10	2.83	1.423	1:35	1:49	25:29
SINES	0.10	2.81	1.435	1:34	1:49	26:28

TABELA 2.5: Constantes não harmónicas para as estações maregráficas em estudo

Começando pelo Tipo de maré (R), é notório que nenhum resultado se encontra acima dos 0,25 o que significa que a maré em toda a costa portuguesa é do tipo semidiurna regular.

Quanto à Relação das forças atrativas (β) como se pode observar os valores andam perto do número 3, o que exprime que a influência da Lua em toda a costa portuguesa é quase 3 vezes superior à influência do Sol.

Anteriormente, já tinha sido referido que a Unidade de altura (U) rondava o valor 1,5 em praticamente toda a costa o que acabou por se confirmar, no entanto, nos resultados obtidos pode-se verificar o que já tinha sido dito quanto ao facto de existir uma tendência para a amplitude da onda de maré aumentar à medida que progride para montante, o que se verifica nos estuários e neste caso, ao olhar para o resultado obtido na estação maregráfica de Lisboa, verifica-se que é um marégrafo colocado mais a montante, já dentro do rio Tejo.

O Estabelecimento médio (EM) que é o atraso médio de uma PM em relação à passagem da lua média pelo meridiano de lugar e o Estabelecimento do porto (EP) que é o atraso obtido em dias de Lua cheia ou nova, sempre que a passagem meridiana inferior ou superior da Lua ocorre à meia-noite, são ambos na costa portuguesa da ordem das duas horas com ligeiras diferenças.

Quanto à idade de maré que é o atraso entre a ocorrência da maré viva e a Lua nova ou cheia correspondente, em toda a costa temos atrasos superiores a 24 horas podendo chegar a quase 30 horas no porto de Lisboa.

Como se pode verificar, ao longo da nossa costa não existem variações significativas nas constantes não harmónicas o que indica termos uma maré uniforme ao longo da nossa costa que irá ser aprofundada a sua propagação no capítulo seguinte.

2.2.4 Elementos de maré

Os elementos de maré, que se apresentam, foram calculados com base em 36 anos de previsões (1990 a 2025). Estes são publicados nas cartas náuticas e apenas dizem respeito à maré astronómica, previsível a longo prazo, não tendo em conta causas aleatórias como ventos e, sobretudo, variações na pressão atmosférica.

A tabela 2.6 mostra os valores extremos (PMmáx e BMmin) fornecidos pela Divisão de Oceanografia do IH para as estações maregráficas em estudo.

ESTAÇÃO MAREGRÁFICA	PMMAX	PMAV	PMAM	NMA	BMAM	BMAV	BMMIN
VIANA DO CASTELO	3.95	3.41	2.68	2.00	1.32	0.59	0.10
LEIXÕES	3.90	3.41	2.68	2.00	1.32	0.59	0.14
AVEIRO	3.77	3.30	2.64	2.00	1.36	0.70	0.25
FIGUEIRA DA FOZ	3.94	3.39	2.67	2.00	1.33	0.61	0.14
PENICHE	3.94	3.39	2.67	2.00	1.33	0.61	0.13
SESIMBRA	3.86	3.33	2.63	2.00	1.37	0.67	0.18
SINES	3.87	3.34	2.64	2.00	1.36	0.66	0.19

TABELA 2.6: Elementos de maré para as estações maregráficas em estudo

2.3 Análise estatística preliminar

Para uma visualização geral do comportamento dos dados maregráficos, deve ser realizada uma análise estatística preliminar destes, utilizando programas estatísticos, que no caso do presente trabalho será utilizado o programa *R* (Team 2013). Devem ser calculadas as medidas de tendência central (média, mediana e alguns quantis de interesse), medidas de dispersão (mínimo, máximo, desvio padrão, coeficiente de variação e desvio inter-quartis) e medidas de assimetria e curtose (para detalhe veja-se Murteira 1990).

Para este tipo de bases de dados com uma extensão considerável, há vários fatores que deverão ser tidos em conta, um dos mais importantes será verificar a existência de outliers e a sua remoção ou filtragem a partir de um filtro que é definido à priori.

Devido ao facto de os dados das marés serem de carácter temporal, neste subcapítulo torna-se necessário compreender como é feita a análise de uma série temporal e as particularidades que tem, assim como os testes para avaliar a sua variabilidade. Vão agora ser abordados todos estes fatores referidos em maior profundidade.

2.3.1 Detecção de *outliers*

Em qualquer operação de recolha de dados da maré podem ocorrer observações que não correspondem à realidade. Estas observações anómalas podem ter várias causas associadas, como por exemplo, erros de medição, pelo próprio método de medição, erros de computação de dados, ou outros motivos. Estas observações anormais são denominados por *outliers*. A presença destes *outliers* pode ser indicação de variabilidade do processo, insuficiências do modelo, dos dados, ou ambas as situações (Maroco 2007).

Uma das principais razões para serem detetados *outliers* é o facto de ser necessário garantir a qualidade dos dados e que estes sejam representativos de uma situação real. Ainda assim, os *outliers* isolados vão ter um efeito na média e no desvio padrão de qualquer uma das grandezas, a ponto de fazer com que a distribuição estatística gerada já não represente a realidade (Maroco 2007).

Os métodos clássicos de detecção de *outliers* são tanto mais eficazes quanto menor o número de *outliers* existentes numa dada base de dados, e torna-se necessário compreender que um *outlier* pode não ser apenas um “número errado”, mas sim parte integrante de um conjunto de dados que pode contribuir para explicar um dado comportamento, seja esse comportamento uma anomalia ou não. Sendo assim, o analista deve ter cuidado a avaliar as causas que geraram o mesmo.

Existem diversos métodos estatísticos para detetar *outliers*, no entanto, neste trabalho vai ser utilizado o método gráfico, nomeadamente, utilizando um diagrama da caixa de bigodes (*boxplot*) que nos permite observar valores anómalos como é o exemplo dos dados representados abaixo que foram detetados num *boxplot* do mês de janeiro de 2019 para Leixões representado na figura 2.6, onde se pode observar medições na ordem dos 6 metros que claramente não correspondem à realidade que se apresentou nesse dia, sendo por isso *outliers* e devem ser excluídos do estudo (para mais detalhe sobre *outliers* recomenda-se consultar Oliveira 2008).

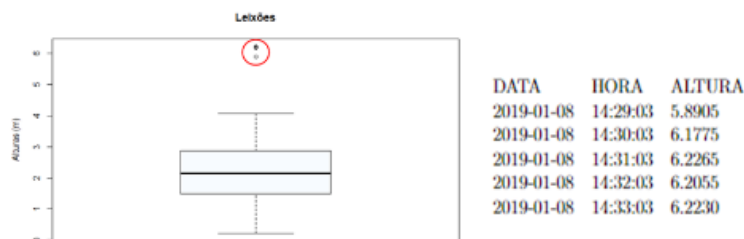


FIGURA 2.6: Detecção de *outliers* em registos maregráficos da estação de Leixões, janeiro de 2019

2.3.2 Aplicação de Filtros

O que se pretende neste subcapítulo é apenas fazer uma introdução que permita compreender o que são os filtros e como os mesmos funcionam.

A aplicação de filtros tem como objetivos eliminar, selecionar ou separar sinais com frequências diferentes. De acordo com as diferentes frequências existem vários tipos de filtros, sendo estes: filtros passa-baixo, passa-alto, passa-banda ou rejeita-banda. Este tema é tão vasto e tão importante quer na estatística quer na eletrónica para a modelação das ondas que não se torna possível a sua profunda abordagem para o presente trabalho.

Existem inúmeros tipos de filtros que servem para fazer a filtragem de dados de forma diferente, no IH, no que diz respeito às marés, o filtro mais utilizado é o filtro de Butterworth que elimina os ruídos da maré e da movimentação da superfície da água (para mais detalhe consultar Selesnick e Burrus 1998).

2.3.3 Análise de séries temporais

A análise de dados das marés é feita a partir de uma série temporal que é definida como sendo uma sequência de dados recolhidos por ordem cronológica ao longo do tempo. É possível, vários tipos de dados surgirem sob a forma de séries temporais, em áreas muito diferentes como por exemplo: a economia, oceanografia, engenharia, ciências sociais, meteorologia, ciências naturais entre outras tantas áreas. Um fator inerente a uma série temporal é que, normalmente, as observações adjacentes são dependentes e a natureza da sua dependência tem algum interesse a níveis práticos.

Um dos grandes motivos para o estudo de séries temporais ser importante é o facto de a partir de observações passadas se poder prever o comportamento da série no futuro (para mais detalhe consultar Murteira, Müller e Turkman 2000 e Morettin e Toloí 2004).

2.4 Concordâncias de maré

No IH, a previsão de marés é efetuada usando o programa desenvolvido em Fortran por Bernard Simon. Este programa tem por base um algoritmo denominado por “alturas reduzidas” que está descrito no manual que foi entregue, aquando da sua implementação, juntamente com o programa (Norma Técnica 2010).

As concordâncias de marés, representam as diferenças em altura e tempo, quer das preias-mar (PM) quer das baixa-mares (BM), entre um porto principal e um porto ou local secundário, que, regra geral se encontram próximos.

Para se calcularem concordâncias, é necessário ter séries de valores observados ou previstos das PM e BM de pelo menos 15 dias (no IH é prática a utilização de um período de 3 meses) para o porto principal e o secundário. Um dos objetivos deste trabalho é ampliar a aplicação do método das concordâncias entre portos principais. Os resultados obtidos permitirão perceber como se propaga a onda de maré ao longo da costa ocidental portuguesa.

Geralmente, as concordâncias são utilizadas para prever a maré em locais onde não existem previsões ou marégrafo instalado. Neste trabalho pretende-se, também, estender a sua utilização entre portos principais, com vista a poder preencher lacunas nas séries das observações.

Este método, de previsão através da aplicação das concordâncias, baseia-se no cálculo de um valor médio de correção a aplicar em altura e tempo à PM e BM de uma estação maregráfica principal em relação à outra (Hidrográfico 2008). Nas Tabelas de Marés portuguesas encontra-se a aplicação desta metodologia na forma de tabelas de concordâncias.

As concordâncias entre dois locais irão sempre ser mais confiáveis se estes dois locais tiverem um regime de maré semelhante (Instituto Hidrográfico 1984c). O método para determinar as concordâncias consiste na execução de um diagrama de dispersão dos valores que comparam as PM e BM entre os dois locais em tempo e altura. A partir desse diagrama de dispersão é obtido um valor médio de correção para aplicar nos casos de marés vivas e marés mortas. Para poder ser aplicado o método das concordâncias é preciso determinar, para o cálculo da altura de água, a unidade de altura do porto e o valor do coeficiente de maré que corresponde ao dia que se está a avaliar (Instituto Hidrográfico 1984c).

A vantagem da utilização, do método das concordâncias, para a previsão das marés deve-se à sua simplicidade em comparação com o método harmónico. A desvantagem prende-se com o facto que a informação obtida é menos rigorosa não sendo adequada para estudos científicos.

Capítulo 3

Análise dos dados e discussão dos resultados

Relativamente a este capítulo optou-se por dividi-lo em três secções, sendo a primeira dedicada ao comportamento das constituintes e constantes harmónicas.

Na segunda secção apresentam-se análises estatísticas dos dados, registos maregráficos, e ainda outras informações relevantes que permitiram concluir sobre a propagação da maré na costa ocidental portuguesa.

A terceira secção contém as concordâncias entre os portos em estudo, no entanto, de entre os portos principais foram eleitos dois como referência, em relação aos quais são feitas as comparações.

3.1 Comportamento das constituintes e constantes harmónicas

Os resultados apresentados na tabela 2.3 mostram que a amplitude das constituintes harmónicas (M_2 , S_2 , K_1 e O_1) aumentam de Sul para Norte. A exceção deste comportamento é encontrada no porto de Aveiro. As fases também mostram o mesmo aumento de Sul para Norte. Estes resultados são consistentes com o trabalho de Marta-Almeida e Dubert 2006.

A Figura 3.1 apresenta as amplitudes (em metros) e as fases (em graus) das principais constituintes harmónicas semidiurnas (M_2 e S_2) ao longo da costa ocidental portuguesa. Para uma melhor perceção, as fases estão representadas em escala de cores.

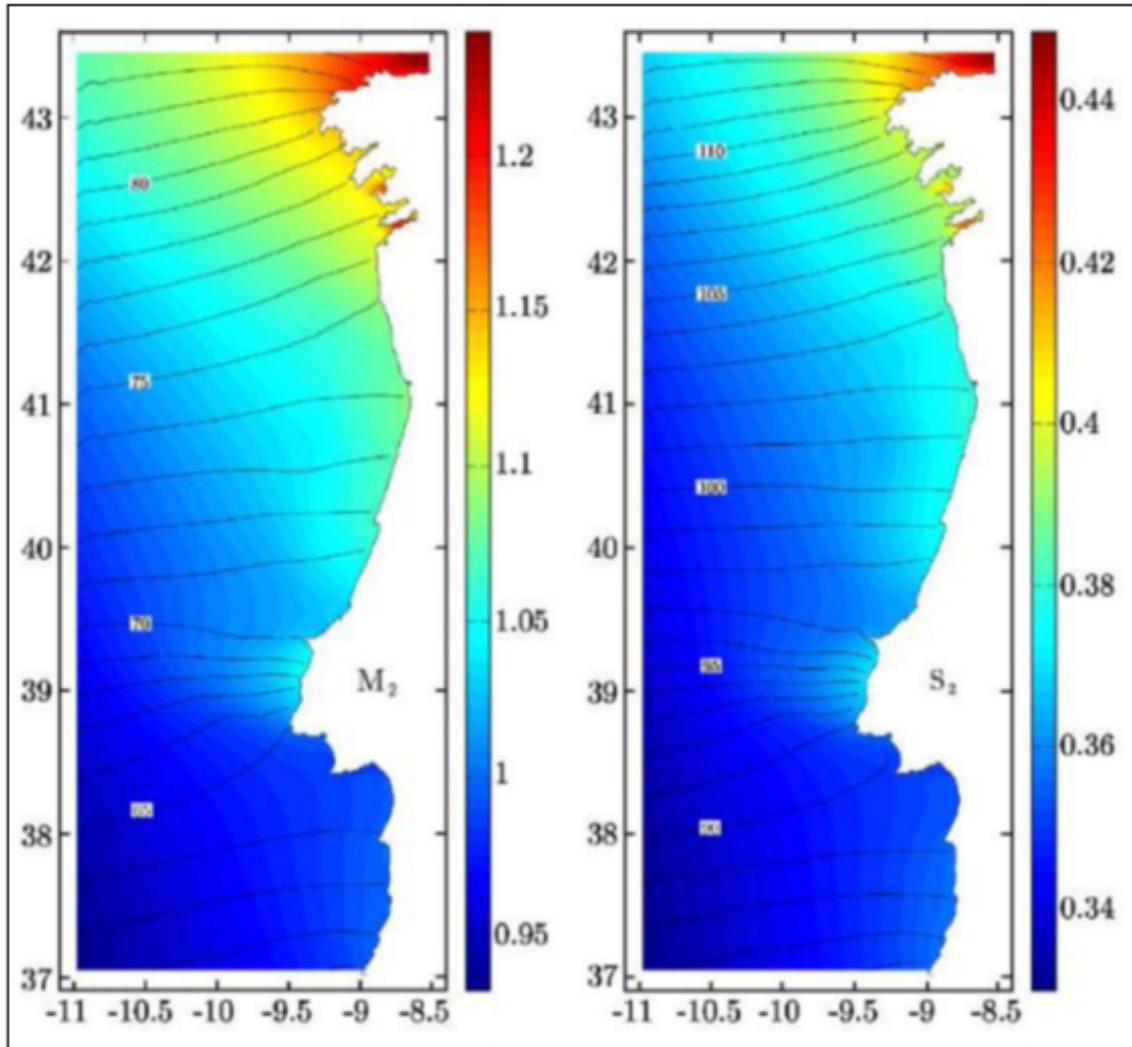


FIGURA 3.1: Amplitude (escala de cores em metros) e fase (graus) das constituintes harmónicas M_2 e S_2 (Fonte: Retirado de Marta-Almeida e Dubert, 2006)

A amplitude das amplitudes da M_2 e da S_2 são, respetivamente, 0.056 metros e 0.013 metros. Na figura anterior, pode-se observar que, aparentemente, as constituintes semidiurnas mantêm-se regulares ao longo da costa.

A Figura 3.2 apresenta as amplitudes (em metros) e as fases (em graus) das principais constituintes harmónicas diurnas (K_1 e O_1) ao longo da costa ocidental portuguesa. Para uma melhor perceção, as fases estão representadas em escala de cores.

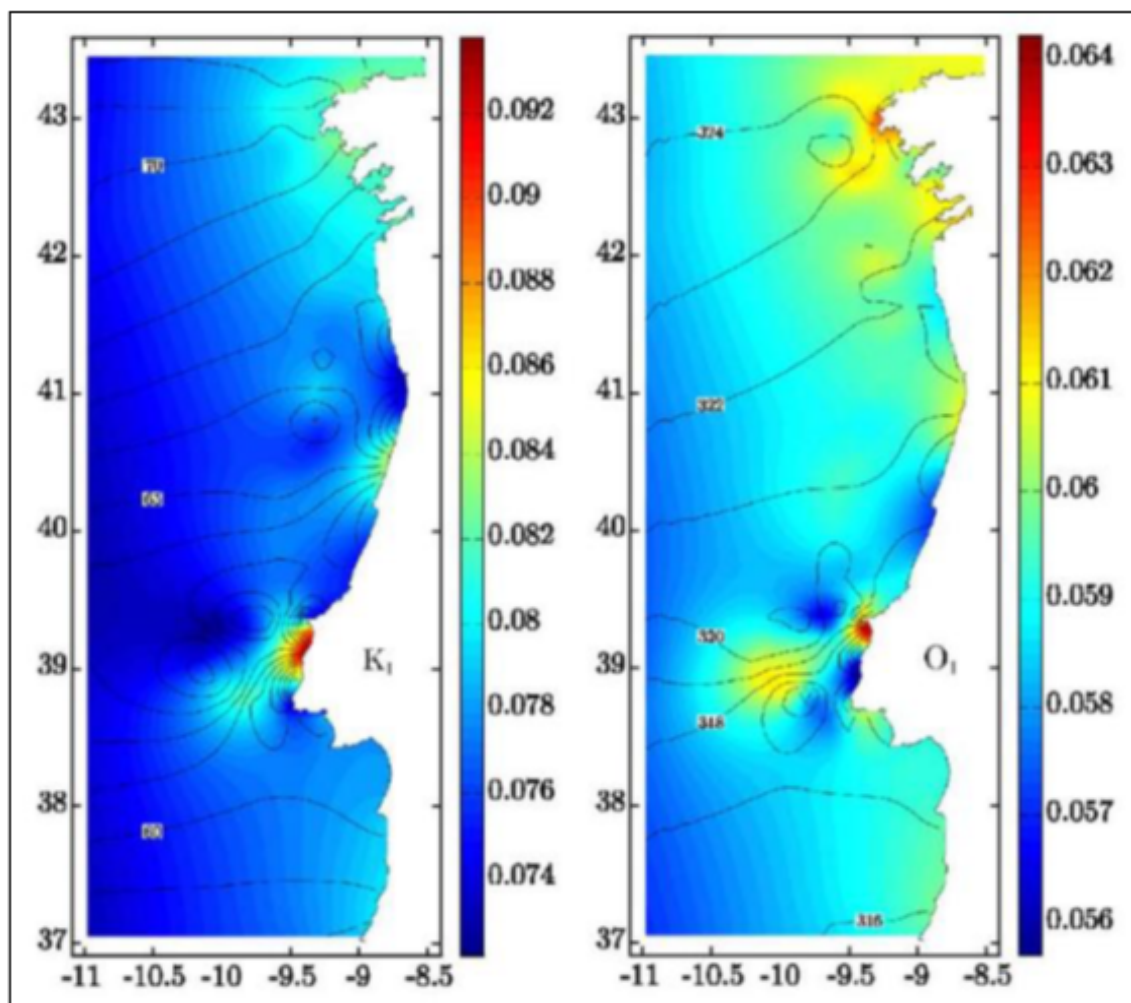


FIGURA 3.2: Amplitude (escala de cores em metros) e fase (graus) das constituintes harmônicas K_1 e O_1 (Fonte: Retirado de Marta-Almeida e Dubert, 2006)

A amplitude das amplitudes da K_1 e da O_1 são, respetivamente, 0.005 metros e 0.002 metros. Na figura anterior, pode-se observar que, aparentemente, as constituintes diurnas mantêm-se regulares ao longo da costa.

Pode-se, ainda, observar algumas variações, em amplitude e fase, ao largo do cabo da Roca e do cabo Raso nas constituintes diurnas.

Os resultados anteriores foram obtidos através das constantes harmônicas oficiais calculadas pelo IH. Um trabalho, em curso, ainda não publicado pela orientadora e pelo coorientador desta tese, indica que as constantes harmônicas têm uma boa qualidade para todos os portos do estudo, ou seja, são pouco sensíveis ao período escolhido para as obter.

3.2 Estatísticas descritivas dos portos

Foram analisadas diversas séries de observações maregráficas por forma a encontrar quais os melhores períodos para o cálculo das concordâncias. Os resultados desta secção ainda permitiram a escolha dos portos de referência para a construção das tabelas de concordâncias.

A Figura 3.3 mostra as alturas horárias da maré, em diferentes períodos para os portos de Viana do Castelo, Leixões, Aveiro, Figueira da Foz, Peniche e Sines. O porto de Sesimbra não se encontra representado porque não tem uma série de dados suficientemente longa e com poucas lacunas. Para os seis portos foram construídos um histograma, um *boxplot* e uma curva cumulativa das frequências de alturas horárias da maré observadas.

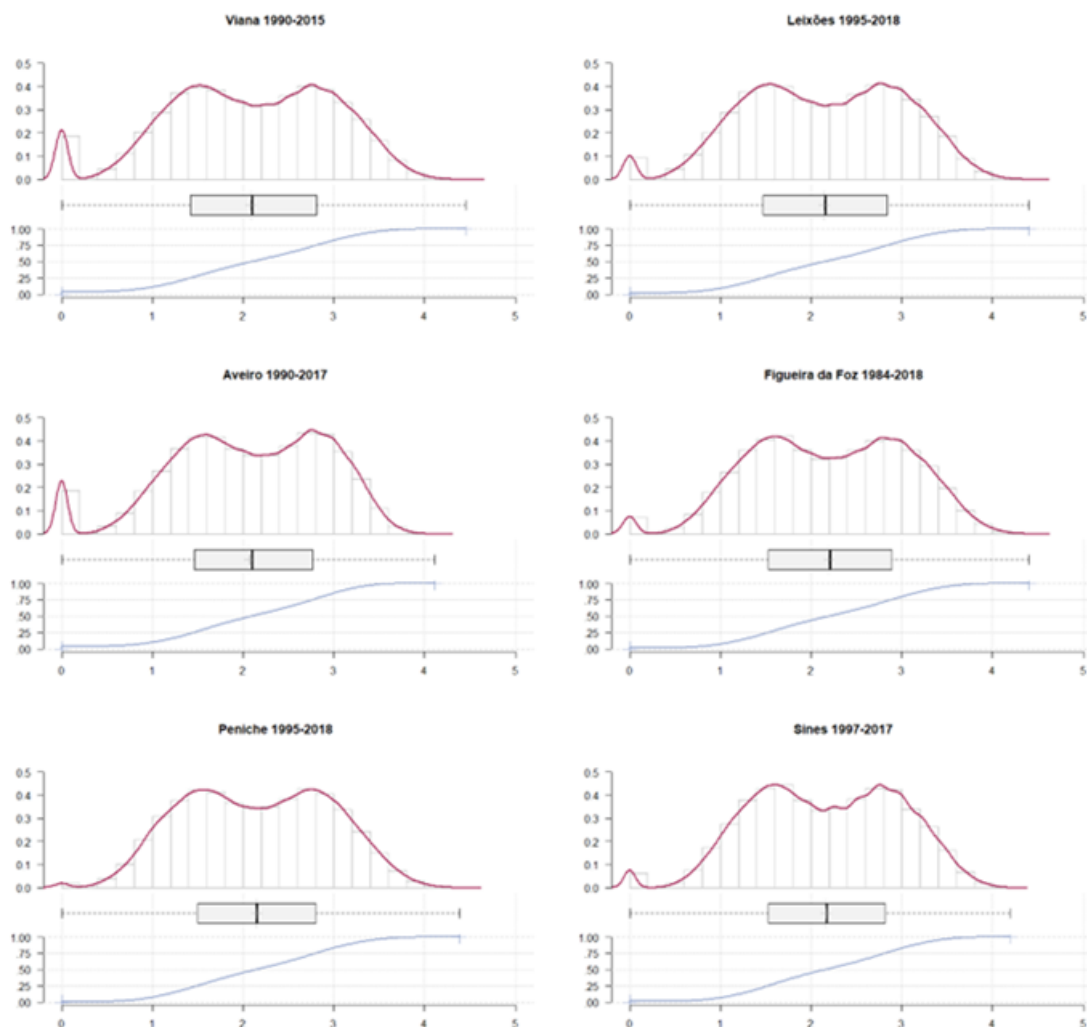


FIGURA 3.3: Representação das alturas horárias de maré observadas

3.2. Estatísticas descritivas dos portos

Através dos histogramas acima verifica-se a existência de duas modas que representam as AH da maré mais frequentes.

A frequência de variação dos níveis horários observados, num longo período de observação, apresenta um padrão bem definido. Os portos com marés semidiurnas, os níveis mais frequentes situam-se num nível médio das PMs e BMs das marés mortas (COI 1985). Estas observações bimodais são consistentes com a representação da Figura 3.4.

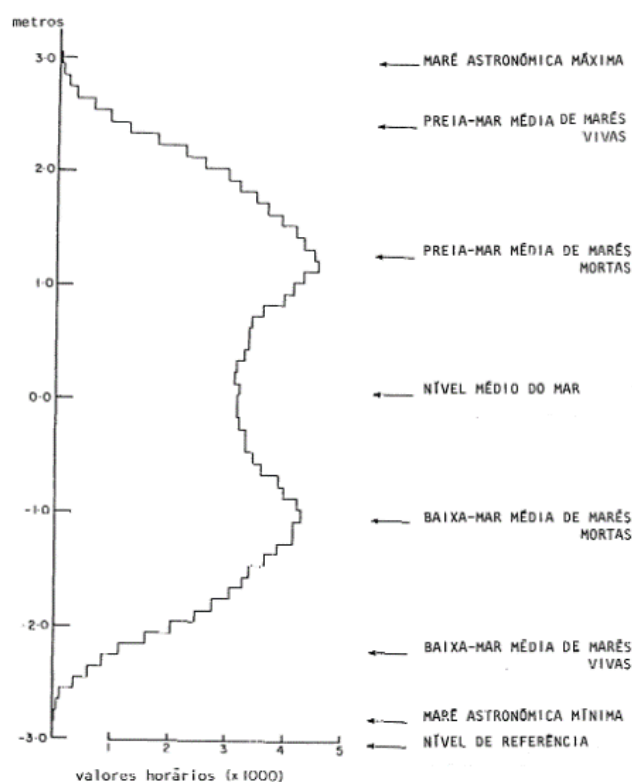


FIGURA 3.4: Distribuição das frequências das Alturas Horárias em portos de regime semidiurno (Adaptado de COI 1985)

As séries, de observações de alturas horárias da maré, não têm a mesma dimensão, além disso verificam-se períodos sem dados (número de observações com zero). Esse facto, e ainda com vista a evitar a influência de efeitos meteorológicos, levou à utilização das previsões em detrimento das observações de maré.

As estatísticas descritivas que se apresentam na Tabela 3.1 referem-se às previsões de 2021.

	Viana do Castelo	Leixões	Aveiro	Figueira da Foz	Peniche	Sesimbra	Sines
Média (m)	2,01	2,01	2,01	2,01	2,01	2,00	2,00
Mediana (m)	2,02	2,01	2,01	2,01	1,99	2,00	2,00
Desvio-padrão (m)	0,78	0,79	0,73	0,78	0,78	0,74	0,75
Mínimo (m)	0,20	0,21	0,35	0,24	0,24	0,26	0,30
Máximo (m)	3,84	3,86	3,65	3,83	3,83	3,71	3,75

TABELA 3.1: Estatísticas gerais dos portos em estudo

Salienta-se a semelhança entre AH da maré nos sete portos estudados, assim, mostra-se que a curva de maré é bastante homogénea na costa ocidental.

A Figura 3.5 faz uma representação da variabilidade da maré prevista para 2021:

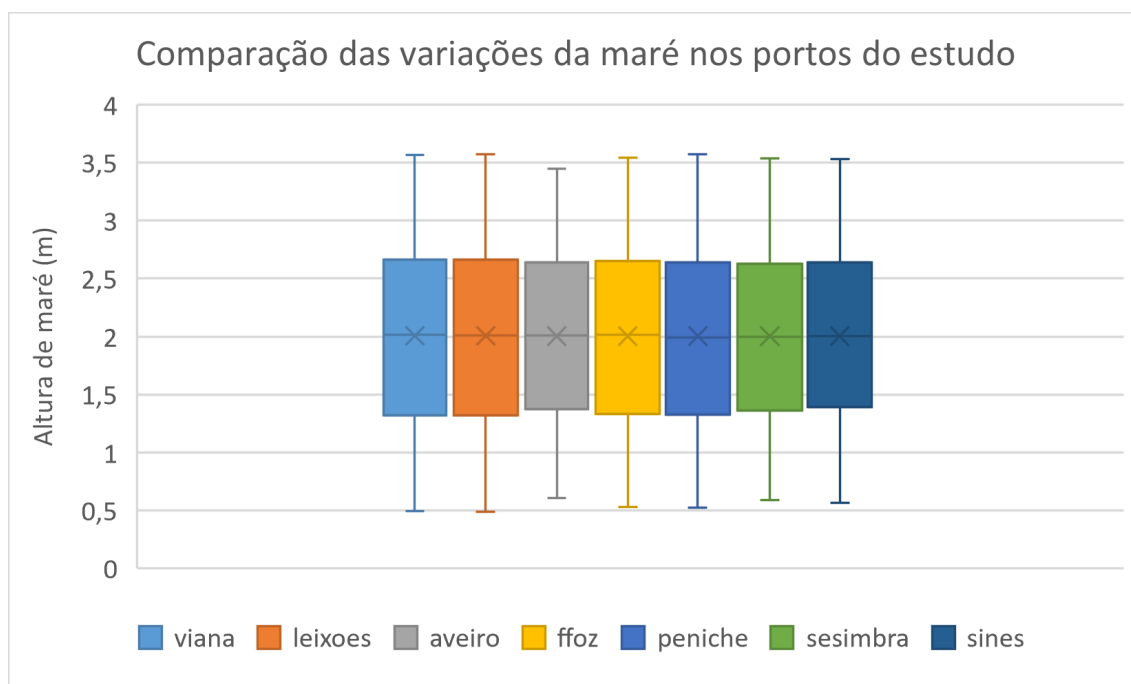


FIGURA 3.5: Comparação das variações da maré para os portos em estudo

Antes do cálculo das concordâncias, realizou-se uma avaliação para identificar os portos que serão considerados portos de referência. Os resultados anteriores permitiram identificar os portos de Leixões (para a região Norte) e Sines (para a região Sul). A geografia da costa portuguesa pesou na escolha uma vez que o cabo

da Roca se apresenta como um separador natural do comportamento das constantes harmónicas.

3.3 Concordâncias entre os portos de estudo

A análise das concordâncias iniciou-se com uma avaliação da diferença, das AH dos portos considerados de referência, Leixões e Sines, e restantes portos. As tabelas seguintes, 3.2 e 3.3 apresentam as principais estatísticas descritivas dos desvios de altura de maré encontrados.

	<i>leixões-viana</i>	<i>leixões-aveiro</i>	<i>leixões-ffoz</i>
Média	-0,00001	0,0004	0,0001
Mediana	-0,0003	-0,0249	0,0063
Moda	0,0089	-0,0491	0,0129
Desvio-padrão	0,0146	0,0791	0,0218
Variância da amostra	0,0002	0,0063	0,0005
Curtose	-0,1210	0,1362	-0,6984
Assimetria	0,0593	0,9129	-0,5186
Mínimo	-0,0476	-0,1239	-0,0563
Máximo	0,0409	0,2498	0,0416
Soma	-0,0075	0,2755	0,1018
Nível de confiança (95,0%)	0,0011	0,0057	0,0016

TABELA 3.2: Estatísticas descritivas das diferenças entre as AH de Viana do Castelo, Aveiro e Figueira da Foz e o porto de referência

	<i>sines-ffoz</i>	<i>sines-peniche</i>	<i>sines-sesimbra</i>
Média	-0,0008	-0,0005	0,0020
Mediana	0,0080	0,0002	0,0021
Moda	0,1873	-0,1243	-0,0399
Desvio-padrão	0,1677	0,0958	0,0261
Variância da amostra	0,0281	0,0092	0,0007
Curtose	-1,0133	-1,2019	0,0451
Assimetria	-0,1178	-0,0509	0,1509
Mínimo	-0,3714	-0,1917	-0,0630
Máximo	0,3324	0,1819	0,0786
Soma	-0,6218	-0,3420	1,4864
Nível de confiança (95,0%)	0,0121	0,0069	0,0019

TABELA 3.3: Estatísticas descritivas das diferenças entre as AH de Figueira da Foz, Peniche e Sesimbra e o porto de referência

Como é possível observar, em ambas as tabelas, os desvios encontrados têm média próxima de zero. Assim, é possível continuar o trabalho e calcular as concordâncias entre estes portos.

Como descrito na secção 2.4, a metodologia para encontrar as concordâncias entre portos requer a construção de gráficos de dispersão entre o porto de referência e o porto para o qual se irá fazer a previsão.

A Figura 3.6 apresenta os diagramas de dispersão, os coeficientes de determinação (R^2) e as equações de regressão linear.

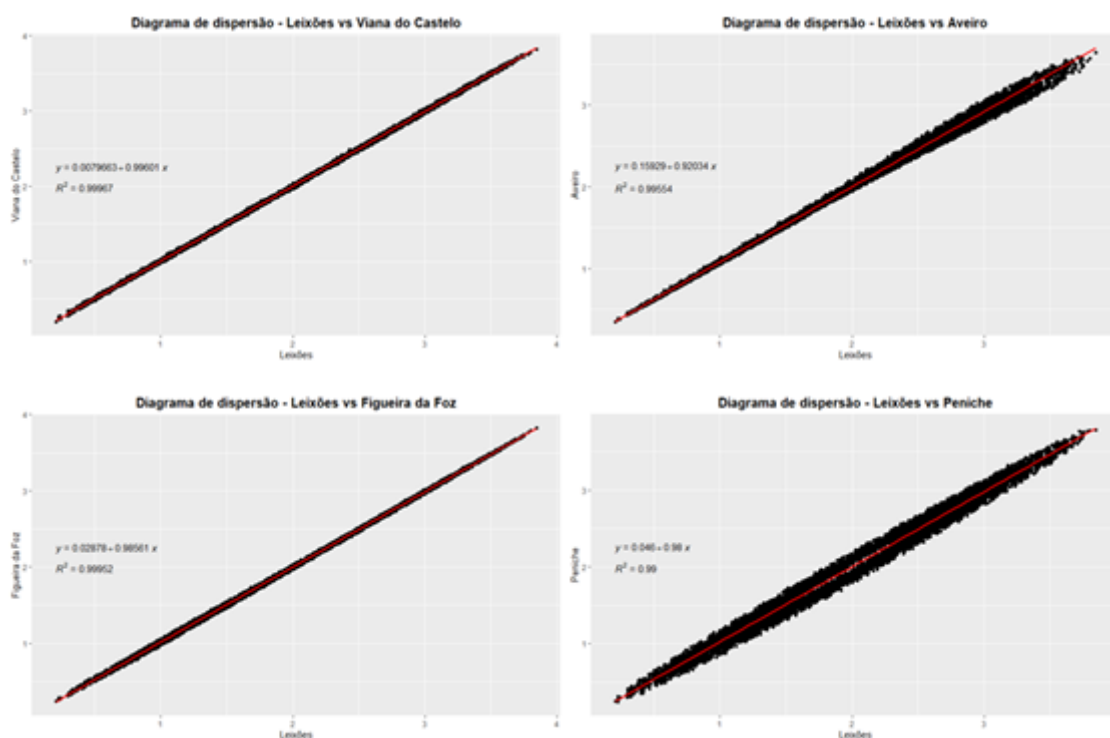


FIGURA 3.6: Diagramas de dispersão considerando o porto de referência Leixões

Constata-se que existe um comportamento linear entre as AH de Leixões com Viana do Castelo, Aveiro, Figueira da Foz e Peniche:

i) **Leixões e Viana do Castelo**

- Coeficiente de correlação igual a 0.9998 é a evidência de uma forte relação entre as marés nos dois portos (este resultado é altamente significativo, aplicado o teste de Pearson obteve-se uma estatística de teste $t = 5186.6$ com $p\text{-value} < 0.05$);

- A regressão linear permite encontrar a equação:

$$V_{Castelo} = 0.00797 + 0.99601 \times Leixões$$

Este modelo é altamente significativo e explica uma proporção elevada dos níveis de maré entre estes portos (estatística de teste $F = 2.69 \times 10^7$ com $p\text{-value} < 0.05$; $R^2 = 0.9997$).

ii) **Leixões e Aveiro**

- Coeficiente de correlação igual a 0.9978 é a evidência de uma forte relação entre as marés nos dois portos (este resultado é significativo, aplicado o teste de Pearson obteve-se uma estatística de teste $t = 1398.9$ com $p\text{-value} < 0.05$);

- A regressão linear permite encontrar a equação:

$$Aveiro = 0.15929 + 0.92034 \times Leixões$$

Este modelo é altamente significativo e explica uma proporção elevada dos níveis de maré entre estes portos (estatística de teste $F = 1.957 \times 10^6$ com $p\text{-value} < 0.05$; $R^2 = 0.9955$).

iii) **Leixões e Figueira da Foz**

- Coeficiente de correlação igual a 0.9998 é a evidência de uma forte relação entre as marés nos dois portos (este resultado é altamente significativo, aplicado o teste de Pearson obteve-se uma estatística de teste $t = 4282.1$ com $p\text{-value} < 0.05$);

- A regressão linear permite encontrar a equação:

$$FFoz = 0.02878 + 0.98561 \times Leixões$$

Este modelo é altamente significativo e explica uma proporção elevada dos níveis de maré entre estes portos (estatística de teste $F = 1.834 \times 10^7$ com $p\text{-value} < 0.05$; $R^2 = 0.9995$).

iv) **Leixões e Peniche**

- Coeficiente de correlação igual a 0.9936 é a evidência de uma forte relação entre as marés nos dois portos (este resultado é significativo, aplicado o teste de Pearson obteve-se uma estatística de teste $t = 820.51$ com $p\text{-value} < 0.05$);

- A regressão linear permite encontrar a equação:

$$Peniche = 0.00797 + 0.99601 \times Leixões$$

Este modelo é altamente significativo e explica uma proporção elevada dos níveis de maré entre estes portos (estatística de teste $F = 2.69 \times 10^7$ com $p\text{-value} < 0.05$; $R^2 = 0.99$).

A Figura 3.7 apresenta os diagramas de dispersão, os coeficientes de determinação (R^2) e as equações de regressão linear.

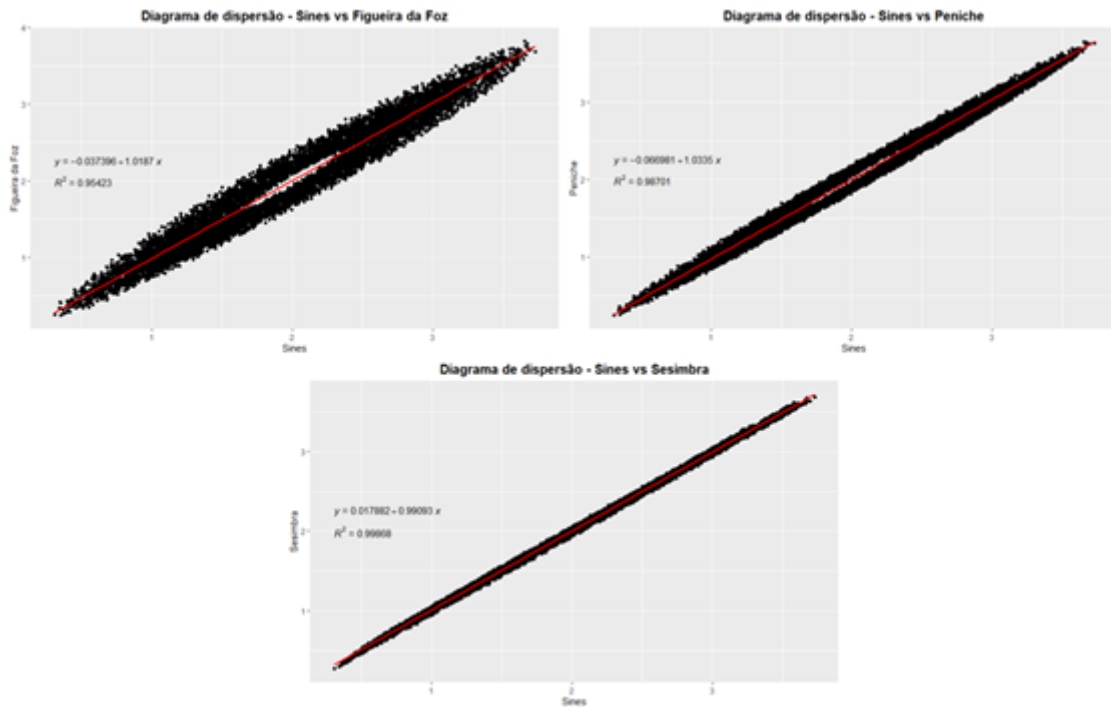


FIGURA 3.7: Diagramas de dispersão considerando o porto de referência Sines

Constata-se que existe um comportamento linear entre as AH de Sines com Figueira da Foz, Peniche e Sesimbra:

i) Sines e Figueira da Foz

- Coeficiente de correlação igual a 0.9768 é a evidência de uma forte relação entre as marés nos dois portos (este resultado é altamente significativo, aplicado o teste de Pearson obteve-se uma estatística de teste $t = 427.3$ com $p\text{-value} < 0.05$);

- A regressão linear permite encontrar a equação:

$$FFoz = -0.03739 + 1.01866 \times Sines$$

Este modelo é altamente significativo e explica uma proporção elevada dos níveis de maré entre estes portos (estatística de teste $F = 1.826 \times 10^5$ com $p\text{-value} < 0.05$; $R^2 = 0.9542$).

ii) Sines e Peniche

- Coeficiente de correlação igual a 0.9935 é a evidência de uma forte relação entre as marés nos dois portos (este resultado é significativo, aplicado o teste de Pearson obteve-se uma estatística de teste $t = 815.81$ com $p\text{-value} < 0.05$);

- A regressão linear permite encontrar a equação:

$$Peniche = -0.06698 + 1.03348 \times Sines$$

Este modelo é altamente significativo e explica uma proporção elevada dos níveis de maré entre estes portos (estatística de teste $F = 6.656 \times 10^5$ com $p\text{-value} < 0.05$; $R^2 = 0.9870$).

iii) Sines e Sesimbra

- Coeficiente de correlação igual a 0.9993 é a evidência de uma forte relação entre as marés nos dois portos (este resultado é altamente significativo, aplicado o teste de Pearson obteve-se uma estatística de teste $t = 2578.8$ com $p\text{-value} < 0.05$);

- A regressão linear permite encontrar a equação:

$$Sesimbra = 0.01788 + 0.99093 \times Sines$$

Este modelo é altamente significativo e explica uma proporção elevada dos níveis de maré entre estes portos (estatística de teste $F = 6.65 \times 10^6$ com $p\text{-value} < 0.05$; $R^2 = 0.9987$).

Nesta fase do trabalho, vai-se proceder à apresentação das tabelas de concordâncias. Da análise anterior, observou-se que as previsões de maré para os portos de Peniche e Figueira da Foz podem ser obtidas tanto a partir da maré de Leixões como da maré de Sines. Assim, optou-se por escolher Leixões como porto de referência para a Figueira da Foz e Sines como porto de referência para Peniche.

Estas concordâncias foram calculadas para dois períodos distintos do ano: para o Inverno e Verão.

As tabelas de concordâncias que se apresentam (3.4 e 3.5) fornecem informação das PMs e BMs previstas em situação de águas-mortas médias e águas-vivas médias. Nas colunas dos portos Viana do Castelo, Aveiro e Figueira da Foz encontram-se as correções a aplicar em tempo e em altura relativamente às marés observadas em Leixões:

INVERNO			Viana do Castelo	Aveiro	Figueira da Foz
Águas-vivas	Preia-mar	Tempo (min)	-3	19	-2
		Altura (cm)	-1	-9	-2
	Baixa-mar	Tempo (min)	-1	0	-5
		Altura (cm)	2	9	3
Águas-mortas	Preia-mar	Tempo (min)	0	15	-2
		Altura (cm)	1	-5	-1
	Baixa-mar	Tempo (min)	2	3	-6
		Altura (cm)	0	4	2

TABELA 3.4: Concordâncias em relação ao porto de Leixões no Inverno

VERÃO			Viana do Castelo	Aveiro	Figueira da Foz
Águas-vivas	Preia-mar	Tempo (min)	-2	21	-1
		Altura (cm)	1	-11	-2
	Baixa-mar	Tempo (min)	0	0	-4
		Altura (cm)	0	10	-2
Águas-mortas	Preia-mar	Tempo (min)	-1	15	-1
		Altura (cm)	0	-7	-2
	Baixa-mar	Tempo (min)	3	1	-6
		Altura (cm)	1	6	2

TABELA 3.5: Concordâncias em relação ao porto de Leixões no Verão

Salientam-se os resultados das concordâncias entre os portos de Leixões e Aveiro. Na generalidade, a onda de maré chega a Aveiro mais tarde do que em Leixões. Esta situação pode dever-se ao facto de o marégrafo de Aveiro estar instalado nas proximidades da Ria de Aveiro, forçando que a maré, nesse local, sofra a sua influência mais do que esperado no início deste trabalho.

Assim, conclui-se que as marés do porto de Aveiro, apesar de terem as constantes harmónicas estáveis e bons parâmetros estatísticos, não são indicadoras de que essa estação maregráfica não seja considerada como porto de referência para concordâncias entre portos principais.

As tabelas de concordâncias que se apresentam (3.6 e 3.7) fornecem informação das PMs e BMs previstas em situação de águas-mortas médias e águas-vivas médias. Nas colunas dos portos Peniche e Sesimbra encontram-se as correções a aplicar em tempo e em altura relativamente às marés observadas em Sines:

3.3. Concordâncias entre os portos de estudo

INVERNO			Peniche	Sesimbra
Águas-vivas	Preia-mar	Tempo (min)	13	0
		Altura (cm)	5	0
	Baixa-mar	Tempo (min)	14	0
		Altura (cm)	-5	2
Águas-mortas	Preia-mar	Tempo (min)	15	2
		Altura (cm)	4	0
	Baixa-mar	Tempo (min)	15	1
		Altura (cm)	-4	0

TABELA 3.6: Concordâncias em relação ao porto de Sines no Inverno

VERÃO			Peniche	Sesimbra
Águas-vivas	Preia-mar	Tempo (min)	14	2
		Altura (cm)	4	2
	Baixa-mar	Tempo (min)	14	2
		Altura (cm)	-5	3
Águas-mortas	Preia-mar	Tempo (min)	13	4
		Altura (cm)	4	-3
	Baixa-mar	Tempo (min)	14	4
		Altura (cm)	-4	0

TABELA 3.7: Concordâncias em relação ao porto de Sines no Verão

As tabelas de concordâncias, apresentadas, permitem corroborar o resultado já apresentado de que a onda de maré se propaga de Sul para Norte com uma velocidade, aproximadamente, constante. Também se pode confirmar que a amplitude da onda de maré também aumenta de Sul para Norte.

Para uma interpretação mais geral, foram realizadas concordâncias entre as duas estações maregráficas de Leixões e Sines. A Figura 3.8 apresenta o diagrama de dispersão das marés entre os portos de Leixões e Sines.

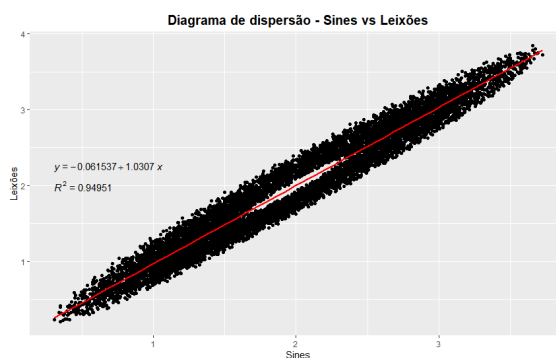


FIGURA 3.8: Diagrama de dispersão das marés entre os portos de Leixões e Sines

Constata-se que existe um comportamento linear entre as AH de Leixões e Sines:

- Coeficiente de correlação igual a 0.9978 é a evidência de uma forte relação entre as marés nos dois portos (este resultado é significativo, aplicado o teste de Pearson obteve-se uma estatística de teste $t = 405.85$ com $p\text{-value} < 0.05$);

- A regressão linear permite encontrar a equação:

$$Leixões = -0.06154 + 1.03071 \times Sines$$

Este modelo é significativo e explica uma proporção elevada dos níveis de maré entre estes portos (estatística de teste $F = 1.647 \times 10^5$ com $p\text{-value} < 0.05$; $R^2 = 0.95$).

A partir destes resultados, construíram-se duas tabelas de concordâncias (3.8 e 3.9, para estes portos, nos períodos de Verão e Inverno.

INVERNO			Leixões
Águas-vivas	Preia-mar	Tempo (min)	26
		Altura (cm)	6
	Baixa-mar	Tempo (min)	26
		Altura (cm)	-8
Águas-mortas	Preia-mar	Tempo (min)	28
		Altura (cm)	5
	Baixa-mar	Tempo (min)	29
		Altura (cm)	-6

TABELA 3.8: Concordâncias entre Sines e Leixões no Inverno

VERÃO			Leixões
Águas-vivas	Preia-mar	Tempo (min)	27
		Altura (cm)	6
	Baixa-mar	Tempo (min)	27
		Altura (cm)	-7
Águas-mortas	Preia-mar	Tempo (min)	26
		Altura (cm)	6
	Baixa-mar	Tempo (min)	26
		Altura (cm)	-7

TABELA 3.9: Concordâncias entre Sines e Leixões no Verão

Analisando as duas tabelas é possível perceber, mais uma vez, que a propagação da maré se faz de Sul para Norte. É ainda possível verificar que a onda da

3.3. Concordâncias entre os portos de estudo

maré é semelhante durante o ano, quando não são considerados os efeitos da maré meteorológica.

Com base nos cálculos das concordâncias, foi possível determinar o tempo médio da deslocação da onda de maré entre Sines e Leixões. A onda de maré, não considerando efeitos meteorológicos, demora, aproximadamente, **26 minutos e 15 segundos** (com um intervalo de confiança de 95% igual a [26' 9"; 26' 20"]). Este resultado é consistente com o estudo de 2013 "Caracterização do regime de marés"(APA 2013).

Ainda foi possível determinar a velocidade média da onda de maré entre os portos de Sines e Leixões. Para este efeito, recorreu-se ao método "Triângulo de Rumo"(Figura 3.9).

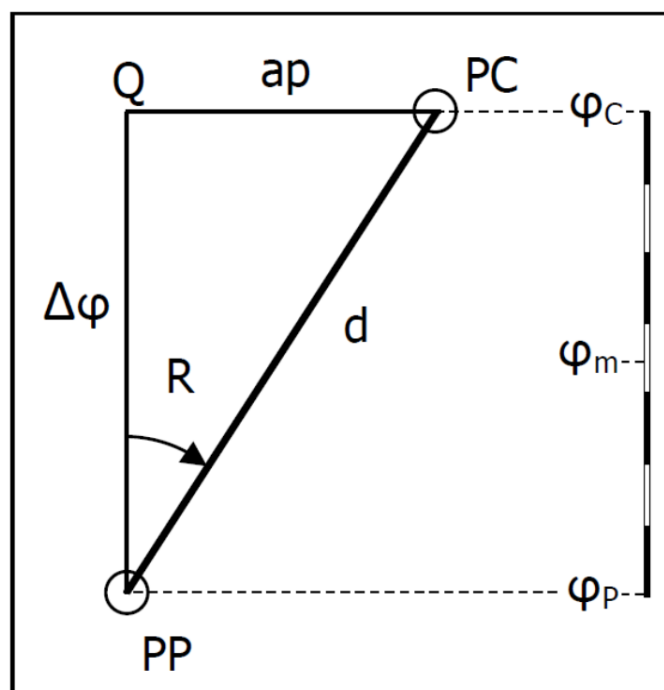


FIGURA 3.9: Representação do Triângulo de Rumo (Fonte:EN 1989)

Com:

R – Rumo

ap – apartamento

L – Longitude

φ – Latitude

PP – ponto de partida

PC – ponto de chegada

d - distância

O cálculo do apartamento (ap) é efetuado com recurso à fórmula 3.1 (EN 1989):

$$ap = \Delta L' \cos(\varphi_m) \quad (3.1)$$

Sendo ΔL a diferença de longitude em minutos e φ_m a latitude média.

Obteve-se a distância de 194 milhas náuticas que é o equivalente a 359.3 km, entre o porto de Sines e o de Leixões.

Em seguida, calculou-se a velocidade média da onda de maré entre Sines e Leixões, obteve-se o resultado de 821.38 km/h. Este resultado está de acordo com o obtido no trabalho de 2013 "Caracterização do regime de marés"(APA 2013).

Conclusão

O estudo das marés é um tópico complexo mas fundamental para conseguir compreender o comportamento do mar na nossa costa e as alterações que dela advêm. Este trabalho surgiu da necessidade existente em realizar um estudo periódico das marés, neste caso, relativo à costa ocidental portuguesa, ao trazer uma inovação do uso de concordâncias entre portos principais.

Após terem sido selecionadas as sete estações maregráficas que iam ser alvo de estudo, realizou-se uma avaliação do comportamento das constantes harmónicas (amplitude e altura) das principais constituintes harmónicas diurnas e semidiurnas. Com recurso à informação das constantes harmónicas das constituintes M_2 , S_2 , K_1 , O_1 e K_2 encontraram-se as constantes não harmónicas com vista à caracterização da maré nos portos. Ainda se apresentaram os elementos de maré, informação extremamente importante para a navegação.

O estudo destas constituintes revelou que em toda a nossa costa temos uma maré muito uniforme e com variações mínimas o que deu mais confiança para poder realizar as concordâncias entre portos principais, sendo ainda suportado pelos parâmetros estatísticos que foram sendo encontrados e produzidos que vieram a confirmar que para além das constituintes serem muito estáveis ao longo da costa as medições dos marégrafos e parâmetros estatísticos também têm uma grande uniformidade.

O principal objetivo, desta dissertação era calcular as correções a aplicar em tempo e em altura, quer em águas-mortas, quer em águas-vivas, relativamente aos valores previstos para um porto de referência. Assim, foi aplicado o método das concordâncias considerando como portos de referência os portos de Leixões e Sines. Devido à sua localização, o porto de Aveiro foi considerado candidato a porto de referência, no entanto, face aos resultados obtidos tal não foi considerado. Neste trabalho sugere-se que:

(1) as previsões de maré para os portos de Viana do Castelo e Aveiro sejam efetuadas em função da maré de Leixões;

(2) as previsões de maré para o porto de Sesimbra sejam efetuadas em função da maré de Sines.

As marés dos portos de Figueira da Foz e Peniche mostraram um comportamento concordante tanto com os portos de Leixões como Sines, assim, neste trabalho sugere-se que as previsões de maré do porto da Figueira da Foz sejam efetuadas em função da maré de Leixões e as previsões da maré do porto de Peniche sejam efetuadas em função da maré de Sines.

Neste trabalho, apresentam-se também as equações que explicam a proporção de variabilidade dos níveis de maré entre os portos de referência e os portos para os quais se fará a previsão de maré.

O cálculo das concordâncias de maré permitiu compreender a forma como a onda de maré se propaga na costa ocidental. A onda de maré desloca-se de Sul para Norte e, entre Sines e Leixões demora, aproximadamente, 26 minutos e 15 segundos com uma velocidade média de 821 km/h

A principal dificuldade, sentida neste trabalho, deveu-se ao facto de apesar de existirem longas séries de observações de alturas de maré, foi difícil encontrar um período suficientemente longo coincidente aos portos estudados. Essa situação foi colmatada utilizando as previsões da altura de marés em detrimento das observações das respetivas estações maregráficas.

No entanto, os objetivos deste trabalho foram todos cumpridos e conseguiu-se gerar conhecimento na área das marés, que será útil, não só ao Instituto Hidrográfico, mas a todos aqueles que queiram aprofundar o estudo que a maré exige.

O resultado deste estudo poderá ser aproveitado, inclusive, para processamento de dados de registos maregráficos quando ocorrem falhas nos equipamentos.

Desenvolvimentos futuros

Com base nos resultados apresentados, sugerem-se as seguintes linhas de investigação:

- Considerar um estudo mais detalhado por forma a compreender a influência dos canais da Ria de Aveiro no comportamento da propagação da onda de maré na área do porto de Aveiro;

- Ampliar este trabalho, efetuado na costa ocidental, à costa Sul e aos portos dos Arquipélagos da Madeira e Açores;

3.3. Concordâncias entre os portos de estudo

- Aplicar, a metodologia utilizada, a observações de alturas de maré por forma a promover a validação desta.

A evolução tecnológica permite considerar outras formas de observação do nível da água do mar, nomeadamente, a utilização de registos de maré com recurso à altimetria por satélite. Assim, há que continuar a monitorização constante e contínua das alturas do nível de maré, com vista a evitar interrupções nas séries dos dados.

Bibliografia

- APA (2013). «Caracterização do regime de mares». Em: *Entregável 1.1.3.a*.
- Bell, C, JM Vassie e PL Woodworth (1999). «POL/PSMSL tidal analysis software kit 2000 (TASK-2000)». Em: *Permanent Service for Mean Sea Level, CCMS Proudman Oceanographic Laboratory, Bidston Observatory, Birkenhead, UK* 20, pp. 32–46.
- Cajueiro, Marcelo Papini de F (2011). «Contribuição ao estudo histórico e crítico do pensamento matemático». Tese de doutoramento. Universidade Federal da Bahia.
- Cartwright, David Edgar (2000). *Tides: a scientific history*. Cambridge University Press.
- COI, Comissão Oceanográfica Internacional (1985). *Manual de Medição e Interpretação do Nível do Mar*, UNESCO.
- Doodson, Arthur Thomas (1921). «The harmonic development of the tide-generating potential». Em: *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical and Physical Character* 100.704, pp. 305–329.
- Doodson, Arthur Thomas e Harold Dreyer Warburg (1941). *Admiralty manual of tides*. HM Stationery Office.
- Ekman, Martin (1993). «A concise history of the theories of tides, precession-nutation and polar motion (from antiquity to 1950)». Em: *Surveys in Geophysics* 14.6, pp. 585–617.
- EN, Escola Naval (1989). «Caderno de Cálculos Náuticos». Em: *Serviço de publicações escolares*.
- Foreman, Michael George Garvin (1977). *Manual for tidal heights analysis and prediction*. Institute of Ocean Sciences, Patricia Bay.
- Hidrográfico, Instituto (2008). *NT.OC.03 - Cálculo das concordâncias de maré, v00*. — (2022). *Instituto Hidrográfico*. URL: <http://https://www.hidrografico.pt/>.
- IH, Instituto Hidrográfico (2021). *Tabela de Marés*. Instituto Hidrográfico.
- Instituto Hidrográfico, Divisão de marés e correntes de maré (1984a). «Apontamentos sobre marés e correntes de maré». Em: I.

- Instituto Hidrográfico, Divisão de marés e correntes de maré (1984b). «Apontamentos sobre marés e correntes de maré». Em: II.
- (1984c). «Apontamentos sobre marés e correntes de maré». Em: III.
- Maroco, João (2007). *Análise estatística com utilização do SPSS*.
- Marta-Almeida, Martinho e Jesús Dubert (2006). «The structure of tides in the Western Iberian region». Em: *Continental Shelf Research* 26.3.
- Martins, Leonor e Joana Reis (2007). «Nível médio, maré e análise harmónica». Em: *5ª Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária*.
- Morettin, Pedro Alberto e Clélia Maria de Castro Tolo (2004). *Análise de séries temporais*.
- Murteira, Bento (1990). *Probabilidades e estatística*.
- Murteira, Bento, Daniel Müller e Kamil Feridun Turkman (2000). *Análise de sucessões cronológicas*.
- OHI, Organização Hidrográfica Internacional (2005). *Manual de Hidrografia*. Instituto Hidrográfico.
- Oliveira, EC De (2008). «Comparação das diferentes técnicas para a exclusão de “outliers”». Em: *ENQUALAB—Congresso da Qualidade em Metrologia Rede Metrologica do Estado de São Paulo-REMESP*. Vol. 9.
- Parker, Bruce B (2007). *Tidal analysis and prediction*. NOAA, NOS Center for Operational Oceanographic Products e Services.
- Pugh, David (1996). *Tides, surges and mean sea-level (reprinted with corrections)*. John Wiley & Sons, Ltd.
- Pugh, David e Philip Woodworth (2014). *Sea-level science: understanding tides, surges, tsunamis and mean sea-level changes*. Cambridge University Press.
- Pugh, David T (1987). *Tides, surges and mean sea level*. John Wiley e Sons Inc., New York, NY.
- Reis, Joana (2008). *Caracterização da maré no estuário do minho*. Instituto superior técnico.
- Schureman, Paul (1994). *Manual of harmonic analysis and prediction of tides*. US Department of Commerce, Coast e Geodetic Survey.
- Selesnick, Ivan W e C Sidney Burrus (1998). «Generalized digital Butterworth filter design». Em: *IEEE Transactions on signal processing* 46.6, pp. 1688–1694.
- Simon, Bernard (2013). *Coastal Tides*. Institut océanographique éd.
- Team, R Core (2013). «R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria». Em: <http://www.R-project.org/>.
- Thurman, Harold V (2019). *Essentials of oceanography*.

Warburg (1922). *Tides and tidal stream*. Cambridge university press.

Apêndice A

Scripts em R realizados para o trabalho

1. Exemplo de como foram lidas as alturas horárias para todos os portos.

Caso de Viana do Castelo

```

1
2 # OBJECTIVO: Ler alturas horarias de Viana do Castelo
3
4 library (DescTools)
5 library (pracma)
6 library (imputeTS)
7 library (TideHarmonics)
8 rm(list = ls())
9
10 "%nin%" <- Negate("%in%")
11
12
13 setwd("D:/Escola Naval/5 ANO/Tese de Mestrado/R/TideHarmonics_scripts")
14 source("./SCRIPTS/findGaps.R")
15 list.files()
16
17 # Leitura do ficheiro de alturas horarias de Viana
18 # -----
19 H <- read.table(file = "./DADOS/VIANA_1990_2015.txt",
20               col.names = c("YYYY", "MM", "DD", "hh", "mm", "ss", "h"),
21               header = FALSE, skipNul = TRUE)
22 H$Time <- with(H, as.POSIXct(paste(paste(YYYY,MM,DD, sep = "-"), paste(hh
23                               ,mm,ss, sep = ":"), sep = " "), tz = "GMT"))
24 Desc(H$h, main = "Viana 1990-2015", xlab = "Alturas", ylab = "
25     Frequencia")
26 Desc(H$Time)
27
28 # Gerar o GDH e criar um vector com as alturas hor rias substituindo
29 # as lacunas por <NA>
30 # -----
31 TimeWindow <- range(H$Time)
32 DateTime <- seq(TimeWindow[1], TimeWindow[2], by = "hour")
33 SeaLevel <- rep(NA, length(DateTime))
34 Observed <- which(DateTime %in% H$Time)
35 SeaLevel[Observed] <- H$h

```

```
35 SeaLevel[SeaLevel == 0] <- NA
36
37 dev.new()
38 Desc(SeaLevel)
39
40 # Estatística dos valores em falta
41 # -----
42 statsNA(SeaLevel)
43
44 # Informação para seleção dos períodos a analisar
45 gaps <- findGaps(SeaLevel)
46 gaps$from_DateTime <- DateTime[gaps[,1]]
47 gaps$to_DateTime <- DateTime[gaps[,2]]
48
49 range(DateTime)
50 gaps
51
52 observed <- findGaps(ifelse(!is.na(SeaLevel),NA,1))
53 observed$from_DateTime <- DateTime[observed[,1]]
54 observed$to_DateTime <- DateTime[observed[,2]]
55 observed
56
57 Viana <- list(TidalRecord = data.frame(DateTime, SeaLevel),
58             Gaps = gaps, Observed = observed)
59 save(Viana, file = "./DADOS/VianaHourlyHeights.RData")
60
61 # END OF SCRIPT
62 # -----
```

2. Script para calcular as estatísticas de regressão linear e respetivos diagramas de dispersão.

```

1
2 Viana<-read.table("PminViana.txt")
3 Leixoes<-read.table("PminLeixoes.txt")
4 Aveiro<-read.table("PminAveiro.txt")
5 FFoz<-read.table("PminFFoz.txt")
6 Peniche<-read.table("PminPeniche.txt")
7 Sesimbra<-read.table("PminSesimbra.txt")
8 Sines<-read.table("PminSines.txt")
9 #####
10 Viana = subset(Viana, V2 != 13)
11 Leixoes = subset(Leixoes, V2 != 13)
12 Aveiro = subset(Aveiro, V2 != 13)
13 FFoz = subset(FFoz, V2 != 13)
14 Peniche = subset(Peniche, V2 != 13)
15 Sesimbra= subset(Sesimbra, V2 != 13)
16 Sines = subset(Sines, V2 != 13)
17 #####
18 cor(Viana$V7, Leixoes$V7) ##correla o entre as variáveis##
19 cor.test(Viana$V7, Leixoes$V7) ##avaliar se o coef. de correla o
    significativo##
20 ajuste=lm(Viana$V7~Leixoes$V7) ## ajustar um modelo de regress o
    linear##
21 summary(ajuste) ## ver coeficientes do modelo
22 anova(ajuste)
23 confint(ajuste) ## encontrar os intervalos de confian a para os
    coeficientes do modelo
24 #####
25 cor(Aveiro$V7, Leixoes$V7) ##correla o entre as variáveis##
26 cor.test(Aveiro$V7, Leixoes$V7) ##avaliar se o coef. de correla o
    significativo##
27 ajuste2=lm(Aveiro$V7~Leixoes$V7) ## ajustar um modelo de regress o
    linear##
28 summary(ajuste2) ## ver coeficientes do modelo
29 anova(ajuste2)
30 confint(ajuste2) ## encontrar os intervalos de confian a para os
    coeficientes do modelo
31 #####
32 cor(FFoz$V7, Leixoes$V7) ##correla o entre as variáveis##
33 cor.test(FFoz$V7, Leixoes$V7) ##avaliar se o coef. de correla o
    significativo##

```

```

34 ajuste3=lm(FFoz$V7~Leixoes$V7) ## ajustar um modelo de regressão
    linear##
35 summary(ajuste3) ## ver coeficientes do modelo
36 anova(ajuste3)
37 confint(ajuste3) ## encontrar os intervalos de confiança para os
    coeficientes do modelo
38 #####
39 cor(Peniche$V7, Leixoes$V7) ##correlação entre as variáveis##
40 cor.test(Peniche$V7, Leixoes$V7) ##avaliar se o coef. de correlação
    significativo##
41 ajustex=lm(Peniche$V7~Leixoes$V7) ## ajustar um modelo de regressão
    linear##
42 summary(ajustex) ## ver coeficientes do modelo
43 anova(ajustex)
44 confint(ajustex) ## encontrar os intervalos de confiança para os
    coeficientes do modelo
45 #####
46 cor(FFoz$V7, Sines$V7) ##correlação entre as variáveis##
47 cor.test(FFoz$V7, Sines$V7) ##avaliar se o coef. de correlação
    significativo##
48 ajuste4=lm(FFoz$V7~Sines$V7) ## ajustar um modelo de regressão linear
    ##
49 summary(ajuste4) ## ver coeficientes do modelo
50 anova(ajuste4)
51 confint(ajuste4) ## encontrar os intervalos de confiança para os
    coeficientes do modelo
52 #####
53 cor(Peniche$V7, Sines$V7) ##correlação entre as variáveis##
54 cor.test(Peniche$V7, Sines$V7) ##avaliar se o coef. de correlação
    significativo##
55 ajuste5=lm(Peniche$V7~Sines$V7) ## ajustar um modelo de regressão
    linear##
56 summary(ajuste5) ## ver coeficientes do modelo
57 anova(ajuste5)
58 confint(ajuste5) ## encontrar os intervalos de confiança para os
    coeficientes do modelo
59 #####
60 cor(Sesimbra$V7, Sines$V7) ##correlação entre as variáveis##
61 cor.test(Sesimbra$V7, Sines$V7) ##avaliar se o coef. de correlação
    significativo##
62 ajuste6=lm(Sesimbra$V7~Sines$V7) ## ajustar um modelo de regressão
    linear##
63 summary(ajuste6) ## ver coeficientes do modelo
64 anova(ajuste6)

```

```

65 confint(ajuste6)  ## encontrar os intervalos de confian a para os
      coeficientes do modelo
66 #####
67 cor(Leixoes$V7,Sines$V7) ##correla o entre as vari veis##
68 cor.test(Leixoes$V7,Sines$V7)  ##avaliar se o coef. de correla o
      significativo##
69 ajusten=lm(Leixoes$V7~Sines$V7) ## ajustar um modelo de regress o
      linear##
70 summary(ajusten) ## ver coeficientes do modelo
71 anova(ajusten)
72 confint(ajusten)  ## encontrar os intervalos de confian a para os
      coeficientes do modelo
73 #####
74 all_vals <- data.frame(Leixoes$V7, Viana$V7, Aveiro$V7, FFoz$V7,
      Peniche$V7, Sesimbra$V7, Sines$V7)
75
76 library(ggplot2)
77 library(ggpubr)
78
79 ggplotRegression <- function (fit) {
80
81   require(ggplot2)
82
83   ggplot(fit$model, aes_string(x = names(fit$model)[2], y = names(fit$
      model)[1])) +
84     geom_point() +
85     stat_smooth(method = "lm", col = "red") +
86     stat_regline_equation(label.y =2.25, aes(label = ..eq.label..)) +
87     stat_regline_equation(label.y =2, aes(label = ..rr.label..)) +
88     ggtitle("Diagrama de dispers o – Leix es vs Viana do Castelo") +
89     xlab("Leix es") + ylab("Viana do Castelo") + theme(plot.title =
      element_text(size = 15, face = "bold", hjust = 0.5))
90 }
91
92 fit1 <- lm(Viana.V7 ~ Leixoes.V7, data=all_vals)
93 ggplotRegression(fit1)
94 #####
95 ggplotRegression <- function (fit) {
96
97   require(ggplot2)
98
99   ggplot(fit$model, aes_string(x = names(fit$model)[2], y = names(fit$
      model)[1])) +
100     geom_point() +
101     stat_smooth(method = "lm", col = "red") +

```

```

102   stat_regline_equation(label.y =2.25, aes(label = ..eq.label..)) +
103   stat_regline_equation(label.y =2, aes(label = ..rr.label..)) +
104   ggtitle("Diagrama de dispers o – Leix es vs Aveiro") +
105   xlab("Leix es") + ylab("Aveiro") + theme(plot.title = element_text
106   (size = 15, face = "bold", hjust = 0.5))
107 }
108 fit1 <- lm(Aveiro.V7 ~ Leixoes.V7, data=all_vals)
109 ggplotRegression(fit1)
110 #####
111 ggplotRegression <- function (fit) {
112
113   require(ggplot2)
114
115   ggplot(fit$model, aes_string(x = names(fit$model)[2], y = names(fit$
116   model)[1])) +
117     geom_point() +
118     stat_smooth(method = "lm", col = "red") +
119     stat_regline_equation(label.y =2.25, aes(label = ..eq.label..)) +
120     stat_regline_equation(label.y =2, aes(label = ..rr.label..)) +
121     ggtitle("Diagrama de dispers o – Leix es vs Figueira da Foz") +
122     xlab("Leix es") + ylab("Figueira da Foz") + theme(plot.title =
123     element_text(size = 15, face = "bold", hjust = 0.5))
124 }
125 fit1 <- lm(FFoz.V7 ~ Leixoes.V7, data=all_vals)
126 ggplotRegression(fit1)
127 #####
128 ggplotRegression <- function (fit) {
129
130   require(ggplot2)
131
132   ggplot(fit$model, aes_string(x = names(fit$model)[2], y = names(fit$
133   model)[1])) +
134     geom_point() +
135     stat_smooth(method = "lm", col = "red") +
136     stat_regline_equation(label.y =2.25, aes(label = ..eq.label..)) +
137     stat_regline_equation(label.y =2, aes(label = ..rr.label..)) +
138     ggtitle("Diagrama de dispers o – Sines vs Figueira da Foz") +
139     xlab("Sines") + ylab("Figueira da Foz") + theme(plot.title =
140     element_text(size = 15, face = "bold", hjust = 0.5))
141 }
142 fit1 <- lm(FFoz.V7 ~ Sines.V7, data=all_vals)
143 ggplotRegression(fit1)

```

```

142 #####
143 ggplotRegression <- function (fit) {
144
145   require(ggplot2)
146
147   ggplot(fit$model, aes_string(x = names(fit$model)[2], y = names(fit$
148     model)[1])) +
149     geom_point() +
150     stat_smooth(method = "lm", col = "red") +
151     stat_regline_equation(label.y = 2.25, aes(label = ..eq.label..)) +
152     stat_regline_equation(label.y = 2, aes(label = ..rr.label..)) +
153     ggtitle("Diagrama de dispers o – Sines vs Peniche") +
154     xlab("Sines") + ylab("Peniche") + theme(plot.title = element_text(
155       size = 15, face = "bold", hjust = 0.5))
156 }
157
158 fit1 <- lm(Peniche.V7 ~ Sines.V7, data=all_vals)
159 ggplotRegression(fit1)
160 #####
161 ggplotRegression <- function (fit) {
162
163   require(ggplot2)
164
165   ggplot(fit$model, aes_string(x = names(fit$model)[2], y = names(fit$
166     model)[1])) +
167     geom_point() +
168     stat_smooth(method = "lm", col = "red") +
169     stat_regline_equation(label.y = 2.25, aes(label = ..eq.label..)) +
170     stat_regline_equation(label.y = 2, aes(label = ..rr.label..)) +
171     ggtitle("Diagrama de dispers o – Sines vs Sesimbra") +
172     xlab("Sines") + ylab("Sesimbra") + theme(plot.title = element_text(
173       size = 15, face = "bold", hjust = 0.5))
174 }
175
176 fit1 <- lm(Sesimbra.V7 ~ Sines.V7, data=all_vals)
177 ggplotRegression(fit1)
178 #####
179 ggplotRegression <- function (fit) {
180
181   require(ggplot2)
182
183   ggplot(fit$model, aes_string(x = names(fit$model)[2], y = names(fit$
184     model)[1])) +
185     geom_point() +
186     stat_smooth(method = "lm", col = "red") +

```



```

182     stat_regline_equation(label.y =2.25, aes(label = ..eq.label..)) +
183     stat_regline_equation(label.y =2, aes(label = ..rr.label..)) +
184     ggtitle("Diagrama de dispers o – Leix es vs Peniche") +
185     xlab("Leix es") + ylab("Peniche") + theme(plot.title = element_
186     text(size = 15, face = "bold", hjust = 0.5))
187 }
188 fit1 <- lm(Peniche.V7 ~ Leixoes.V7, data=all_vals)
189 ggplotRegression(fit1)
190 #####
191 ggplotRegression <- function (fit) {
192
193     require(ggplot2)
194
195     ggplot(fit$model, aes_string(x = names(fit$model)[2], y = names(fit$
196     model)[1])) +
197     geom_point() +
198     stat_smooth(method = "lm", col = "red") +
199     stat_regline_equation(label.y =2.25, aes(label = ..eq.label..)) +
200     stat_regline_equation(label.y =2, aes(label = ..rr.label..)) +
201     ggtitle("Diagrama de dispers o – Sines vs Leix es") +
202     xlab("Sines") + ylab("Leix es") + theme(plot.title = element_text(
203     size = 15, face = "bold", hjust = 0.5))
204 }
205 fit1 <- lm(Leixoes.V7 ~ Sines.V7, data=all_vals)
206 ggplotRegression(fit1)

```


Apêndice B

Resumo Alargado para presença nas 7^{as} Jornadas de Engenharia Hidrográfica / 2^{as} Jornadas Luso-Espanholas de Hidrografia

Caracterização da propagação da maré na costa ocidental portuguesa

Autores: F. Silva (1), D. Carinhas (2) e C. Lemos (1)

(1) Escola Naval; fredericorsilva@gmail.com.

(2) Instituto Hidrográfico.

Resumo: A configuração dos fundos e da linha de costa na zona costeira de Portugal Continental influenciam a propagação da onda de maré junto à costa. Os registos maregráficos, obtidos nas estações da Rede Maregráfica Nacional, permitiram caracterizar o tipo de maré e efetuar análise e previsão da maré astronómica nos principais portos nacionais. Ao longo da costa de Portugal Continental, a maré é do tipo semidiurno regular, o que permite deduzir certas relações entre a amplitude e o retardo das principais constituintes semidiurnas, através do método não-harmónico. Neste trabalho, apresentam-se comparações e concordâncias entre maregrafos próximos, para diferentes áreas e portos principais. Foram também analisadas possíveis alterações dessas relações ao longo do tempo. Os métodos descritos no presente trabalho têm interesse para a previsão expedita da altura de maré, por exemplo em operações anfíbias em pontos para os quais não é possível calcular previsões da maré através do método harmónico.

Palavras-chave: concordâncias de maré, constituintes harmónicas, constituintes não harmónicas, dados maregráficos, maré.

1. INTRODUÇÃO

O Instituto Hidrográfico (IH) gere a maior rede de observações maregráficas nacional, operando e mantendo 23 estações maregráficas em cooperação com entidades públicas ou privadas.

O conhecimento da maré é de grande importância para as mais variadas aplicações, como por exemplo: navegação em canais, estuários, baías e portos; projetos de engenharia como a construção de pontes, docas e quebra-mares; apoio a levantamentos hidrográficos, inclusivamente no estabelecimento do *datum* de cartas, e na delimitação da linha de costa oficial; para calibração de modelos hidrodinâmicos; no fornecimento de informação à engenharia militar, à pesca profissional e recreativa, à navegação e noutras atividades aquáticas para a população em geral (Pugh, 1987).

O estudo e análise dos fenómenos das marés é um assunto há muito estudado e resolvido, sendo algo complexo tendo em vista a obtenção de modelos de alta precisão e exatidão. O fenómeno da força geradora (diferença entre a força centrífuga e a força gravitacional de cada astro) da maré de origem astronómica é perfeitamente conhecido, no entanto, a propagação da onda de maré ao longo da costa é perturbada por diversos fatores: variação da profundidade, fenómenos oceânicos diversos, o contorno dos continentes, entre outros.

A maré astronómica que se faz sentir em Portugal é do tipo semidiurno, com uma desigualdade diurna (diferença entre duas preias-mar (PM) ou baixas-mar (BM) consecutivas) reduzida, variando entre os 5 e os 20 cm (Reis e Martins, 2005). No território

continental, a amplitude média da maré astronómica é de, aproximadamente, 2m, podendo atingir uma altura em águas-vivas de 4m (APA, 2013). A maré semidiurna é caracterizada por uma onda com um período médio de 12h 25min, tendo duas preia-mar e duas baixa-mar diárias, o que resulta num atraso diário médio de 50 minutos, aproximadamente, ao longo da costa portuguesa, a onda de maré, no seu movimento diário, progride de sul para norte, demorando cerca de 35 minutos de Lagos a Leixões, o que equivale a uma velocidade média de 840 km/h (APA, 2013) este facto justifica os atrasos que se vão fazendo sentir entre os diferentes portos.

A Figuras 1 apresenta as amplitudes (em metros) e as fases (em graus) das principais constituintes harmónicas semi-diurnas ao longo da costa ocidental portuguesa.

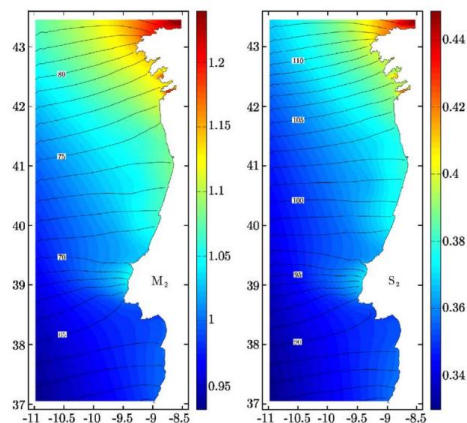


Fig. 1. Amplitude (escala de cores em metros) e fase (graus) das constituintes harmónicas M_2 e S_2 (adaptado de Marta-Almeida e Dubert, 2006).

A Figuras 2 apresenta as amplitudes (em metros) e as fases (em graus) das principais constituintes harmónicas diurnas ao longo da costa ocidental portuguesa.

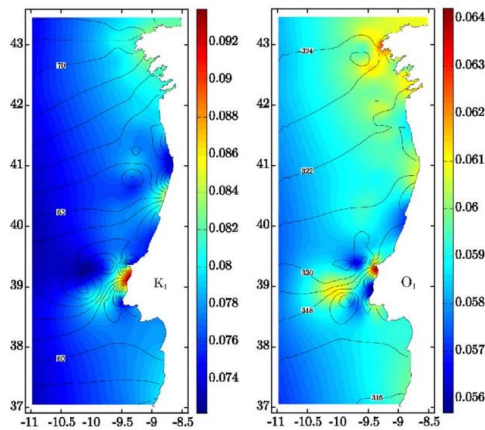


Fig. 2. Amplitude (escala de cores em metros) e fase (graus) das constituintes harmónicas K1 e O1 (adaptado de Marta-Almeida e Dubert, 2006).

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Cada maré é definida por uma série de parâmetros caracterizadores, as constantes não harmónicas, que variam de local para local, as constantes não harmónicas são obtidas através de expressões que relacionam as constantes harmónicas, método que permite a identificação, para cada local, da amplitude e da fase de cada constituinte de maré. No IH são calculadas várias constantes não harmónicas para definir a maré para cada porto, nomeadamente, o tipo de maré, a relação das forças atrativas, a unidade de altura, o estabelecimento médio e o estabelecimento do porto e também a idade de maré. Estes valores serão determinados a partir das constantes harmónicas e estas obtêm-se através de uma série temporal de observações, com o recurso à análise harmónica. As constantes harmónicas não dependem do tempo e, como são típicas de cada porto, constituem uma base fundamental para a caracterização da maré num dado local, dependendo delas a boa qualidade das previsões. Os seus valores podem ser afetados por fenómenos como a erosão, assoreamentos e obras portuárias, pelo que é recomendado (Schureman, 1988; Pugh, 1987) uma renovação periódica, sempre que possível, das constantes harmónicas nos diversos portos.

As concordâncias de maré são parâmetros de desfasamento da onda de maré entre dois portos que apresentem o mesmo regime de maré, habitualmente entre um porto principal e um porto secundário existente nas imediações. Estes parâmetros são usados e aplicados para a determinação da maré em portos secundários, onde não foi observado um período anual completo de registo de maré, com vista à sua parametrização por via do método de análise harmónica (cálculo das constituintes harmónicas de maré), usando dados maregráficos obtidos através das

diversas estações maregráficas localizadas em diversos portos da costa portuguesa e disponíveis no IH. Para aplicar este método, algumas premissas têm de ser verificadas, nomeadamente, marés do mesmo tipo nos dois portos, proximidade geográfica (desejável), dispor de pelo menos 15 dias de observações, com 15 dias de observações inferem-se as constantes harmónicas das constituintes M2, S2, K1 e O1 (Reis e Martins, 2005).

Os elementos de maré são, também, bons caracterizadores da maré num porto; são os valores médios e os valores extremos das PM e BM, sendo o seu cálculo diferente, conforme a sua aplicação, quer se destinem às cartas náuticas ou às tabelas de marés. Os elementos de maré que se encontram na publicação, Tabela de Marés, são calculados com base nos valores das previsões para esse ano, sendo os valores da preia-mar máxima (PM_{máx}) e da baixa-mar mínima (BM_{mín}) os extremos. Para as cartas náuticas, devido a estas não serem atualizadas todos os anos, tenciona-se que os elementos de maré, sejam calculados com valores representativos de todo o ciclo nodal lunar. Assim, calculam-se os valores médios a partir das constantes harmónicas e, para o caso da PM máxima e BM mínima, publicam-se os valores extremos encontrados em previsões com, pelo menos, 19 anos consecutivos.

3. RESULTADOS

Para este trabalho, foram considerados 7 dos 13 portos, continentais, incluídos no volume 1 da publicação Tabela de Marés. Na Figura 3 encontram-se as localizações dos portos estudados.

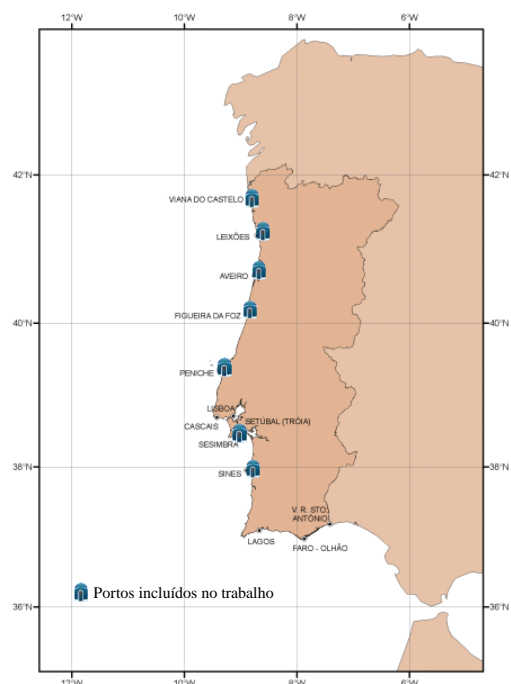


Fig. 3. Identificação dos portos estudados (adaptado da Tabela de Marés Volume I – Portugal 2022).

A Tabela 1 apresenta os elementos de maré calculados a partir de 36 de previsão (1990-2025).

Tabela 1. Elementos de maré.

ESTAÇÃO MAREGRÁFICA	PMMAX	PMAV	PMAM	NMA	BMAM	BMAV	BMMIN
VIANA DO CASTELO	3.95	3.41	2.68	2.00	1.32	0.59	0.10
LEIXÕES	3.90	3.41	2.68	2.00	1.32	0.59	0.14
AVEIRO	3.77	3.30	2.64	2.00	1.36	0.70	0.25
FIGUEIRA DA FOZ	3.94	3.39	2.67	2.00	1.33	0.61	0.14
PENICHE	3.94	3.39	2.67	2.00	1.33	0.61	0.13
SESIMBRA	3.86	3.33	2.63	2.00	1.37	0.67	0.18
SINES	3.87	3.34	2.64	2.00	1.36	0.66	0.19

Legenda:

- PMmáx - preia-mar máxima (metros)
- PMAV - preia-mar de águas-vivas (metros)
- PMAM - preia-mar de águas-mortas (metros)
- NMA - nível médio adotado (metros)
- BMAM - baixa-mar de águas-mortas (metros)
- BMAV - baixa-mar de águas-vivas (metros)
- BMmin - baixa-mar mínima (metros)

Para determinar as características fundamentais da maré de um porto são necessários poucos termos agrupados nas espécies de ondas diurna e semidiurna: no grupo diurno a K1 e O1 e no grupo semidiurno a M2, S2 e K2 (Tabela 2).

Tabela 2. Constantes harmónicas das contituíntes usadas para o cálculo das contantes não harmónicas.

ESTAÇÃO MAREGRÁFICA	M2		S2		K1		O1		K2	
	H.m	Gº	H.m	Gº	H.m	Gº	H.m	Gº	H.m	Gº
VIANA DO CASTELO	1.044	75.9	0.364	104.1	0.071	61.3	0.062	319.0	0.104	102.5
LEIXÕES	1.044	76.1	0.366	104.4	0.070	60.2	0.062	319.4	0.104	102.4
AVEIRO	0.969	78.9	0.330	107.5	0.062	63.4	0.055	321.1	0.093	104.5
FIGUEIRA DA FOZ	1.033	75.4	0.361	104.1	0.066	63.0	0.061	319.4	0.101	100.4
PENICHE	1.030	69.8	0.360	97.2	0.075	55.6	0.062	315.6	0.101	93.9
SESIMBRA	0.980	64.0	0.346	90.0	0.069	54.7	0.060	314.9	0.097	87.9
SINES	0.988	63.3	0.351	90.3	0.071	53.8	0.061	314.2	0.096	87.0

As constantes não harmónicas calculadas são apresentadas na Tabela 3.

O Tipo de Maré (R) permite aferir que a maré em toda a costa portuguesa é do tipo semidiurna regular (valores de R < 0,25).

Tabela 3. Constantes não harmónicas

ESTAÇÃO MAREGRÁFICA	R	β	U	EM	EP	IM
VIANA DO CASTELO	0.09	2.87	1.512	2:01	2:16	27:33
LEIXÕES	0.09	2.85	1.514	2:02	2:17	28:03
AVEIRO	0.09	2.94	1.392	2:07	2:22	28:02
FIGUEIRA DA FOZ	0.09	2.86	1.495	1:59	2:14	28:08
PENICHE	0.10	2.86	1.491	1:46	2:00	26:58
SESIMBRA	0.10	2.83	1.423	1:35	1:49	25:29
SINES	0.10	2.81	1.435	1:34	1:49	26:28

Três dos parâmetros apresentados podem ser usados como métodos expeditos de previsão de maré, nomeadamente, o estabelecimento do porto (EP) ou o estabelecimento médio (EM) para o cálculo da hora da maré, a idade da maré (IM) para se saber quando

ocorre a maré viva e, ainda, a unidade de altura (U) para o cálculo da altura da maré na PM e na BM.

A relação das forças atrativas (β) compara a amplitude da onda lunar média (M2) com a onda solar média (S2). Quanto maior o valor de β menor é a diferença e amplitudes entre águas vivas e águas mortas. Inversamente, valores baixos de β indicam grandes diferenças entre águas vivas e águas mortas. Para a maioria dos portos portugueses a relação das forças atrativas é aproximadamente 3, confirmando a ideia de que a influência da Lua na maré é cerca de 3 vezes superior à do Sol.

A unidade de altura (U), ou semi-amplitude das marés vivas equinociais (denominada, deste modo, por autores que consideram a amplitude de maré desde a PM à BM) é a soma das amplitudes das constituintes M2, S2 e K2 e fornece uma ideia geral da ordem de grandeza das amplitudes registadas num dado local. A constituinte K2, que representa as variações em declinação da Lua e do Sol, está em fase com a S2 duas vezes no ano, precisamente nos equinócios. Para todos os portos da costa continental portuguesa, a unidade de altura é muito próxima de 1,5 m.

Como se pode verificar, ao longo da nossa costa não existem variações significativas nas constantes não harmónicas o que indica termos uma maré uniforme ao longo da nossa costa que irá ser aprofundada a sua propagação no capítulo seguinte.

Com o objetivo de caracterizar as diferenças entre as marés de Leixões, Viana do Castelo e Aveiro, apresentam-se as concordâncias de maré, calculadas, entre os dados maregráficos de Leixões e os registos maregráficos dos outros dois portos. Os valores de concordância de maré apresentados na Tabela 4 foram determinados por comparação direta entre os valores observados, nos três portos, durante o mês de janeiro de 2021.

Tabela 4. Concordâncias de maré de Viana do Castelo e Aveiro, relativamente às marés de Leixões (baseadas nas observações de janeiro de 2021)

		Aveiro		Viana do Castelo	
Águas-vivas	Preia-mar	Tempo (min)	+19		-3
		Altura (cm)	-11		-1
	Baixa-mar	Tempo (min)	-1		0
		Altura (cm)	+10		+1
Águas-mortas	Preia-mar	Tempo (min)	+15		-1
		Altura (cm)	-7		0
	Baixa-mar	Tempo (min)	0		+2
		Altura (cm)	+5		+1

As diferenças em tempo e em altura são valores médios o que significa que a precisão é menor, para a obtenção de marés a partir das observações de Leixões.

Tendo em conta que o número de constituintes harmónicas que podem ser usadas, no IH é de 62, para

as previsões de maré, e sendo as constantes harmónicas (CH) dois valores, amplitude e fase, por cada constituinte, torna-se difícil, quer a comparação visual das diversas listas, quer a avaliação das discrepâncias encontradas. Para facilitar a análise dos resultados, calculou-se a média vectorial das CH em diversos troços; se assumirmos que as CH são tanto melhores quanto a semelhança entre si nos vários troços, então as mesmas deverão ser próximas da média.

A análise harmónica tem como finalidade determinar a amplitude e a fase de cada constituinte da maré. Apesar de ser o método por excelência do estudo das componentes da maré, a análise de Fourier, nomeadamente a aplicação de FFT (Fast Fourier Transform), continua a ser utilizada como ferramenta na análise/testes de dados maregráficos.

A Figura 4 apresenta as CH obtidas para a onda Sa (solar anual), para cada um dos 9 troços em estudo dos dados do porto de Leixões (1995-2018).

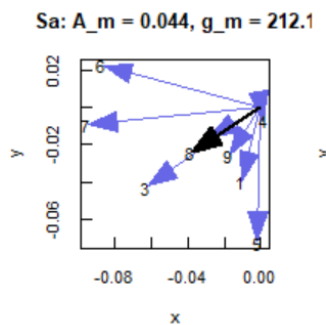


Fig. 4. Análise gráfica das CH para diferentes troços de maré para o porto de Leixões.

Verifica-se bastante inconsistência nos resultados, dado que para cada um dos períodos analisados se obtiveram diferenças quer na amplitude quer na fase. A razão destes resultados pode ser explicado pelo facto que o nível médio do mar depende de vários factores alheios à maré, como ventos e pressão atmosférica; esses factores aleatórios de origem meteorológica funcionam como ruído, afectando o cálculo das ondas de longo período.

A Figura 5 apresenta exemplos de constituintes semi-diurnas estáveis e com boa qualidade.

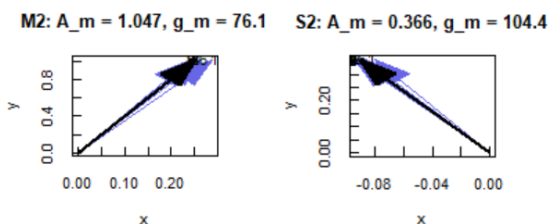


Fig. 5. Análise gráfica das CH de M2 e S2 para os 9 troços de maré do porto de Leixões.

Este tipo de análise gráfica dos vetores de cada CH, pode ser usado para estudar a estabilidade e qualidade das CH a incluir para a previsão da maré de um dado porto.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho pretende apresentar técnicas que permitem caracterizar a maré de um porto deduzindo certas relações entre a amplitude e o retardo das principais constituintes semidiurnas, recorrendo às constantes não harmónicas.

Os valores das preia-mar máximas, e em águas vivas e águas mortas são semelhantes nos portos de Leixões, Aveiro e Viana do Castelo, observando-se apenas pequenas diferenças, de alguns centímetros, nas marés e menos de cinco minutos em tempo entre Leixões e Viana do Castelo, sendo que as marés nesses portos são muito semelhantes.

Demonstrou-se a importância da utilização da análise em frequência, nomeadamente FFT e análise harmónica. A análise em frequência permite analisar cada constituinte da maré individualmente, sendo um método bastante útil quando se pretende determinar quais as constituintes a incluir ou não no programa de previsão de maré. Apresentou-se, também, o método para visualização gráfica das CH de cada constituinte, o qual, de uma forma intuitiva, nos permite avaliar a estabilidade e qualidade de cada constituinte da maré.

REFERÊNCIAS

- APA (2013). Caracterização do regime de mares. Entregável 1.1.3.a
- Foreman, M. G. G. (1977). Manual for tidal heights analysis and prediction. Patricia Bay, Sidney, B.C: Institute of Ocean Science, (Pacific Marine Science Reports 77-10).
- Marta-Almeida, M., Dubert, J. (2006). The structure of tides in the Western Iberian region. Continental Shelf Research, Volume 26, Issue 3, p. 385-400.
- Pugh, D. T. (1987). Tides, Surges and Mean Sea Level. Wiley.
- Reis, J., Martins, L. (2005). Caracterização da Maré de um Porto, 4 as Jornadas de Engenharia Costeira e Portuária, Angra do Heroísmo, Portugal.
- Simon, B., (1974), Calcul des Constantes Harmoniques de la Marée, EPSHOM
- Schureman, P., (1988), Manual of Harmonic Analysis and Prediction of Tides, U.S. Government Printing Office.

Apêndice C

Poster apresentado nas 7^{as} Jornadas de Engenharia Hidrográfica / 2^{as} Jornadas Luso-Espanholas de Hidrografia

Caracterização da propagação da maré na costa ocidental portuguesa

Frederico Silva¹, Dora Carinhas², Carlos Lemos¹

¹Escola Naval; ² Instituto Hidrográfico

Enquadramento

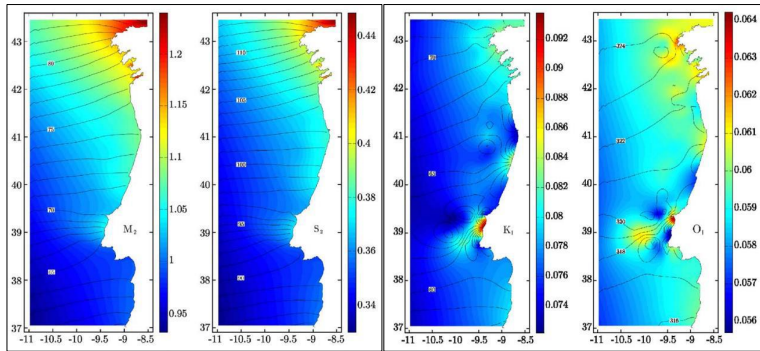
O conhecimento da maré sempre foi de grande importância devido a poder ser utilizado para as mais variadas aplicações, como por exemplo: navegação em canais, estuários, baías e portos; projetos de engenharia como a construção de pontes, docas e quebra-mares; apoio a levantamentos hidrográficos, inclusivamente no estabelecimento do datum de cartas, e na delimitação da linha de costa oficial; para calibração de modelos hidrodinâmicos; no fornecimento de informação à engenharia militar, à pesca profissional e recreativa, à navegação e noutras atividades aquáticas para a população em geral (D. T. Pugh 1987).

Daí surge este trabalho, que analisando os portos indicados à direita tenciona-se caracterizar a propagação da maré na costa ocidental portuguesa.

Objetivos

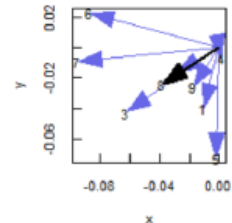
- > Caracterizar a maré na costa portuguesa a partir de concordâncias entre portos principais;
- > Verificar a estabilidade das constantes harmónicas ao longo da costa ocidental portuguesa;
- > Cálculo das constantes não harmónicas para os portos em estudo;
- > Análise estatística dos dados retirados, em alturas horárias, de minuto a minuto e preia-mares e baixa-mares.

Análise dos dados



Amplitude (escala de cores em metros) e fase (graus) das constituintes harmónicas M2, S2, K1 e O1 (adaptado de Marta-Almeida e Dubert, 2006).

Sa: $A_m = 0.044$, $g_m = -212.1$



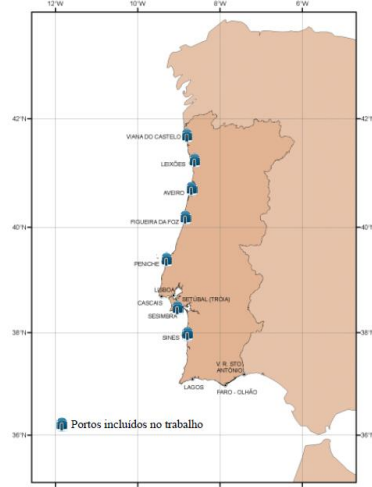
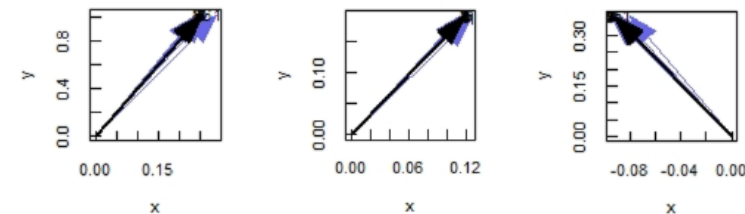
Constantes não-harmónicas calculadas para os portos em estudo

ESTAÇÃO MAREGRÁFICA	R	β	U	EM	EP	IM
VIANA DO CASTELO	0.09	2.87	1.512	2:01	2:16	27:33
LEIXÕES	0.09	2.85	1.514	2:02	2:17	28:03
AVEIRO	0.09	2.94	1.392	2:07	2:22	28:02
FIGUEIRA DA FOZ	0.09	2.86	1.495	1:59	2:14	28:08
PENICHE	0.10	2.86	1.491	1:46	2:00	26:58
SESIMBRA	0.10	2.83	1.423	1:35	1:49	25:29
SINES	0.10	2.81	1.435	1:34	1:49	26:28

R: Tipo de maré
 β : Relação das forças atrativas
 U: Unidade de altura
 EM: Estabelecimento médio
 EP: Estabelecimento do porto
 IM: Idade da maré

No canto superior direito são apresentadas as CH obtidas para a onda Sa (solar anual), para cada um dos 9 troços em estudo dos dados do porto de Leixões (1995-2018) onde se pode verificar alguma inconsistência nos resultados, no entanto, em baixo apresentam-se exemplos de constituintes semidiurnas estáveis e com boa qualidade para o mesmo período de dados.

M2: $A_m = 1.047$, $g_m = 7$ N2: $A_m = 0.224$, $g_m = !$ S2: $A_m = 0.366$, $g_m = 10$



Localização dos mareógrafos em estudo

ESTAÇÃO MAREGRÁFICA	LATITUDE	LONGITUDE
VIANA DO CASTELO	41° 41'.10 N	008° 50'.38 W
LEIXÕES	41° 11'.1 N	008° 42'.2 W
AVEIRO	40° 38'.65 N	008° 44'.92 W
FIGUEIRA DA FOZ	40° 08'.90 N	008° 51'.37 W
PENICHE	39° 20'.99 N	009° 22'.48 W
SESIMBRA	38° 26'.29 N	009° 06'.77 W
SINES	37° 56'.8 N	008° 53'.2 W

Localização georreferenciada dos mareógrafos em estudo (fonte: Instituto Hidrográfico)

ESTAÇÃO MAREGRÁFICA	VEGA	KROHNE	SENSOR
VIANA DO CASTELO	2	0	SIM
LEIXÕES	2	0	NÃO
AVEIRO	2	0	NÃO
FIGUEIRA DA FOZ	1	1	SIM
PENICHE	2	0	NÃO
SESIMBRA	1	1	SIM
SINES	1	1	SIM

Tipo de radar utilizado em cada estação mareográfica e indicação da existência de sensor de pressão (fonte: Instituto Hidrográfico)

Elementos de maré

ESTAÇÃO MAREGRÁFICA	PMMAX	PMVA	PMAM	NMA	BMAM	BMAV	BMMIN
VIANA DO CASTELO	3.95	3.41	2.68	2.00	1.32	0.59	0.10
LEIXÕES	3.90	3.41	2.68	2.00	1.32	0.59	0.14
AVEIRO	3.77	3.30	2.64	2.00	1.36	0.70	0.25
FIGUEIRA DA FOZ	3.94	3.39	2.67	2.00	1.33	0.61	0.14
PENICHE	3.94	3.39	2.67	2.00	1.33	0.61	0.13
SESIMBRA	3.86	3.33	2.63	2.00	1.37	0.67	0.18
SINES	3.87	3.34	2.64	2.00	1.36	0.66	0.19

Legenda:

- PMmáx - preia-mar máxima (metros)
- PMVA - preia-mar de águas-vivas (metros)
- PMAM - preia-mar de águas-mortas (metros)
- NMA - nível médio adotado (metros)
- BMAM - baixa-mar de águas-mortas (metros)
- BMAV - baixa-mar de águas-vivas (metros)
- BMMin - baixa-mar mínima (metros)

Com o objetivo de caracterizar as diferenças entre as marés de Leixões, Viana do Castelo e Aveiro, apresentam-se as concordâncias de maré, calculadas, entre os dados mareográficos de Leixões e os registos mareográficos dos outros dois portos. Os valores de concordância de maré apresentados na tabela abaixo foram determinados por comparação direta entre os valores observados, nos três portos, durante o mês de janeiro de 2021.

Concordâncias entre o porto de Aveiro e o de Viana do Castelo

		Aveiro		Viana do Castelo	
Águas-vivas	Preia-mar	Tempo (min)	19	-3	
		Altura (cm)	-11	-1	
	Baixa-mar	Tempo (min)	-1	0	
		Altura (cm)	10	1	
Águas-mortas	Preia-mar	Tempo (min)	15	-1	
		Altura (cm)	-7	0	
	Baixa-mar	Tempo (min)	0	2	
		Altura (cm)	5	1	

Parâmetro estatístico	Viana do Castelo	Leixões	Aveiro
Média (m)	2,24	2,24	2,25
Mediana (m)	2,27	2,26	2,26
Desvio-padrão (m)	0,79	0,80	0,74
Mínimo (m)	0,62	0,62	0,71
Máximo (m)	3,90	3,87	3,72

Amostra com alguns dos cálculos estatísticos efetuados

Alguma Bibliografia

- APA (2013). Caracterização do regime de mares. Entregável 1.1.3.a
- Foreman, M. G. G. (1977). Manual for tidal heights analysis and prediction. Patricia Bay, Sidney, B.C. Institute of Ocean Science, (Pacific Marine Science Reports 77-10).
- Marta-Almeida, M., Dubert, J. (2006). The structure of tides in the Western Iberian region. Continental Shelf Research, Volume 26, Issue 3, p. 385-400.
- Pugh, D. T. (1987). Tides, Surges and Mean Sea Level. Wiley.
- Reis, J., Martins, L. (2005). Caracterização da Maré de um Porto, 4 as Jornadas de Engenharia Costeira e Portuária, Angra do Heroísmo, Portugal.
- Simon, B., (1974). Calcul des Constantes Harmoniques de la Marée, EPSHOM
- Schureman, P., (1988). Manual of Harmonic Analysis and Prediction of Tides, U.S. Government Printing Office.
- Doodson, Arthur Thomas e Harold Dreyer Warburg (1941). Admiralty manual of tides. HM Stationery Office.

Trabalho em Progresso

- ✓ Comparação entre todos os portos da estabilidade das constantes harmónicas;
- ✓ Analisar concordâncias em relação a outro porto que não Leixões;
- ✓ Fazer uma análise estatística e crítica mais profunda;
- ✓ Recorrer ao tratamento analítico e estatístico adequado, para obtenção de soluções para o cálculo do período de inspeção que minimiza o número de falhas da estação mareográfica.
- ✓ Verificar qual será o número final de portos necessários para conseguir caracterizar a costa ocidental portuguesa de forma consistente e coesa;

Anexo I

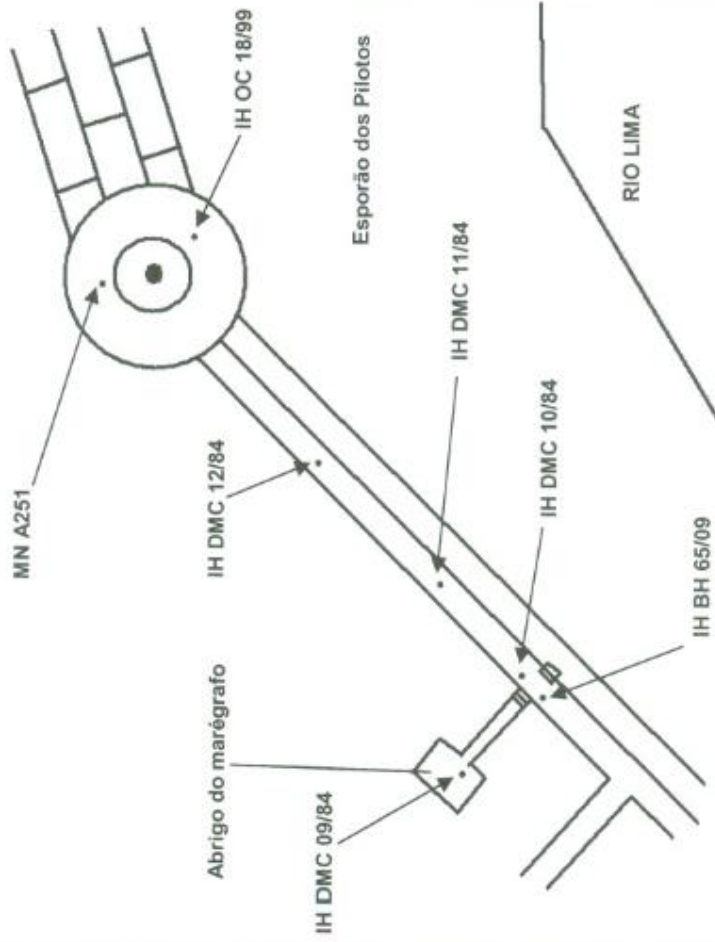
Esquemas de nivelamento de cada estação mare-
gráfica em estudo

Local: Viana do Castelo

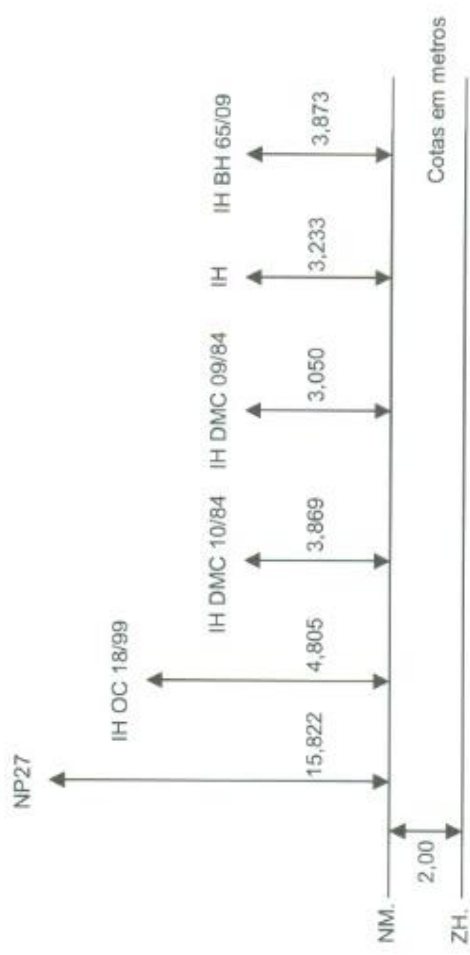
Data: 2010-01-21

LOCALIZAÇÃO PORMENORIZADA DAS MARCAS

LOCALIZAÇÃO GERAL



ESQUEMA VERTICAL



Obs: Nivelamento geométrico realizado em Dezembro de 2009, a partir da MN © NP27.

Esquema de nivelamento Porto - Leixões

Data: 2013-05-24
Relatório:
REL TF BH 01/13
Folha 1 de 2

O responsável pelo trabalho,

Am. João de Pa. Facchini 1:500 e ta

O Hidrógrafo do Levantamento,

[Signature]
15/05/13

Nivelamento anterior:
• Data: Jun 2004
• Relatório:
REL FT HI 13/04

Informação a constar:
1. Esquema geral do percurso de nivelamento
2. Esquema de localização
3. Esquema vertical
4. Imagens identificativas das principais marcas (verso)
5. Controlo de qualidade do nivelamento (verso)

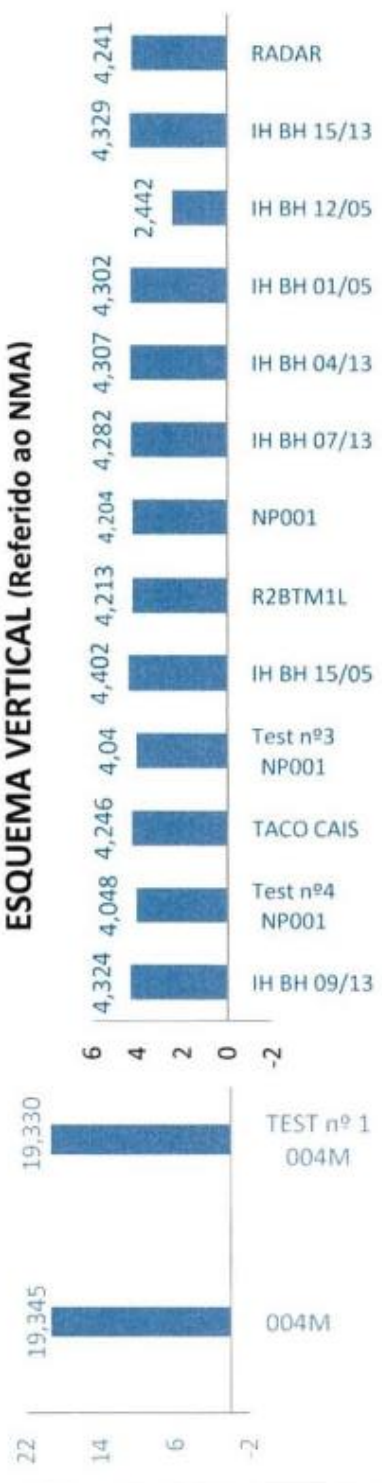
ESQUEMA GERAL DO PERCURSO



ESQUEMA DE LOCALIZAÇÃO



ESQUEMA VERTICAL (Referido ao NMA)



Observações:

(1) Nivelamento Geométrico realizado em Abril de 2013, a partir do taco © 004M.

Esquema de Nivelamento

Data: 17-Mar-21

Área

Local

Relatório:

Barra de Aveiro

Molhe Central

REL TF HI 02/21

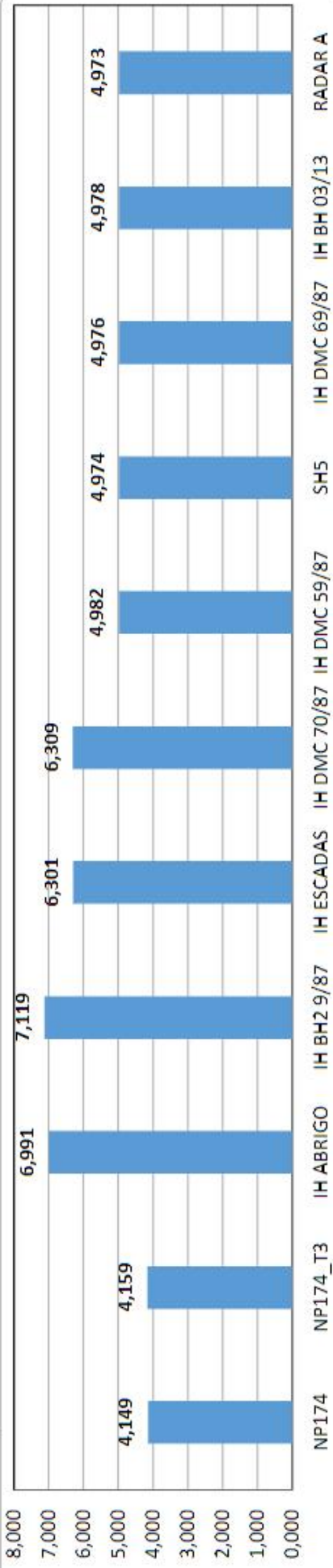
Esquema de Localização



Esquema do Percorso de Nivelamento



Esquema Vertical



Observações:

1. Nivelamento Geométrico realizado em março de 2021, a partir da marca de nivelamento NP174 da RINGAP.
2. Esquema de Nivelamento anterior: REL TF BH 01/13 (2013-05-24).
3. A cota do ponto "RADAR A" refere-se à base da cantoneira que serve como suporte da antena RADAR do marégrafo.

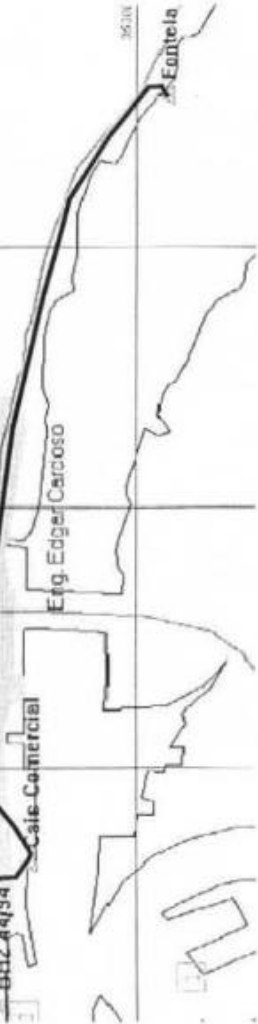
O Hidrógrafo do Levantamento,



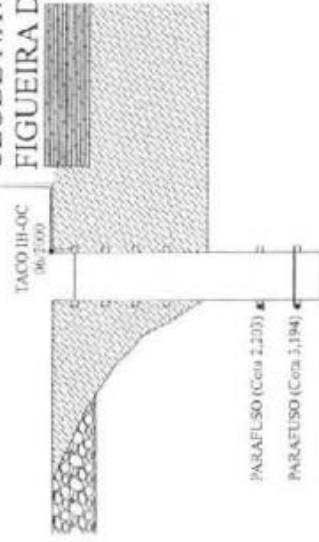
2TEN Murta Cunha
19-Mar-21

FIGUEIRA DA FOZ

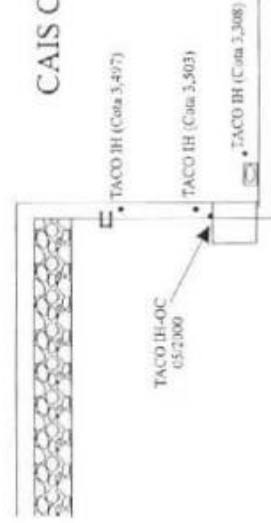
BH2 44/94



CLUBE NAVAL DA
FIGUEIRA DA FOZ



CAIS COMERCIAL

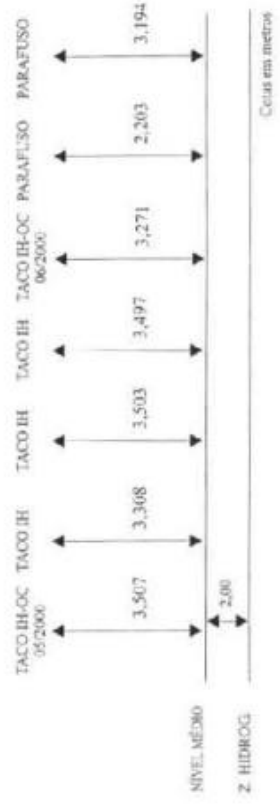


INSTITUTO HIDROGRÁFICO
BRIGADA HIDROGRÁFICA

FIGUEIRA DA FOZ (CAIS COMERCIAL E FONTELA)

MARCAS DE NIVELAMENTO
ESQUEMA VERTICAL E DE LOCALIZAÇÃO

REFERIDO A NOVEMBRO DE 2003

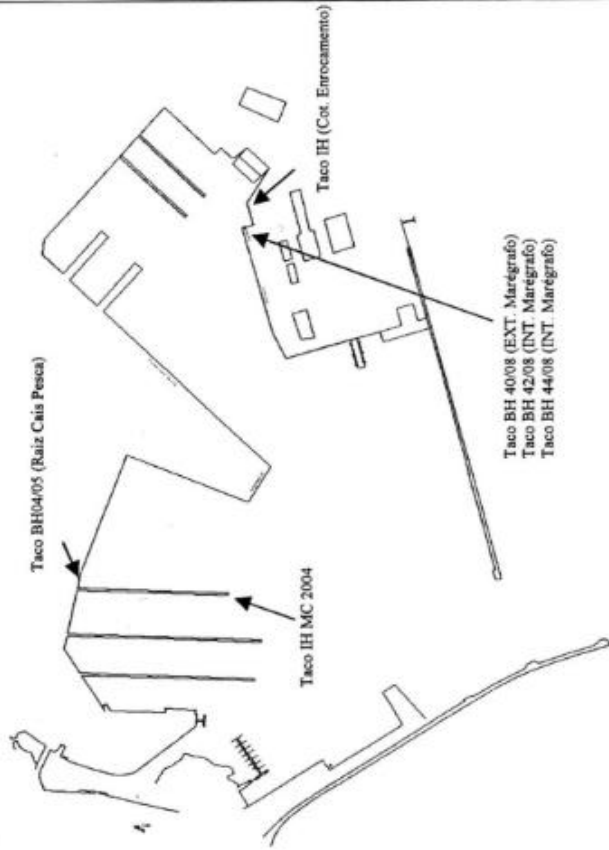


INSTITUTO HIDROGRÁFICO BRIGADA HIDROGRÁFICA

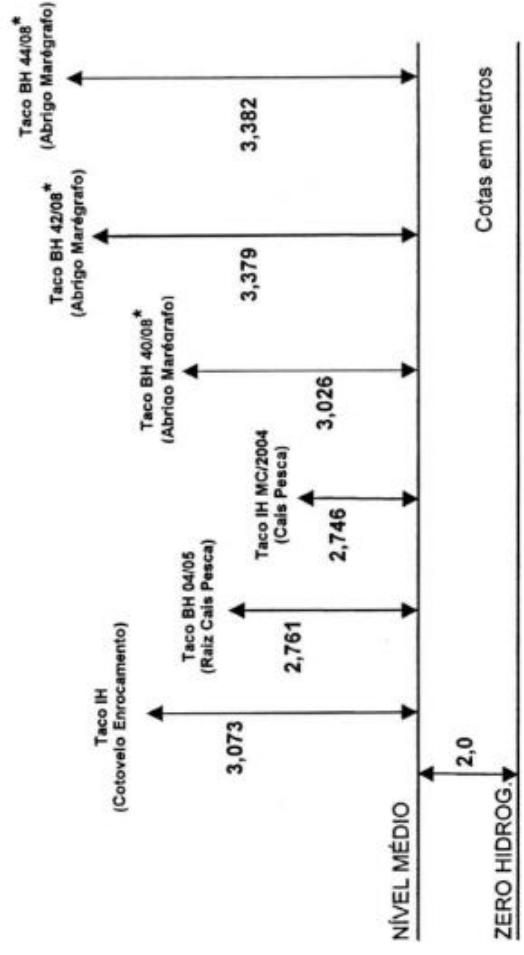
PENICHE

MARCAS DE NIVELAMENTO ESQUEMA VERTICAL E DE LOCALIZAÇÃO

REFERIDO A JANEIRO DE 2009

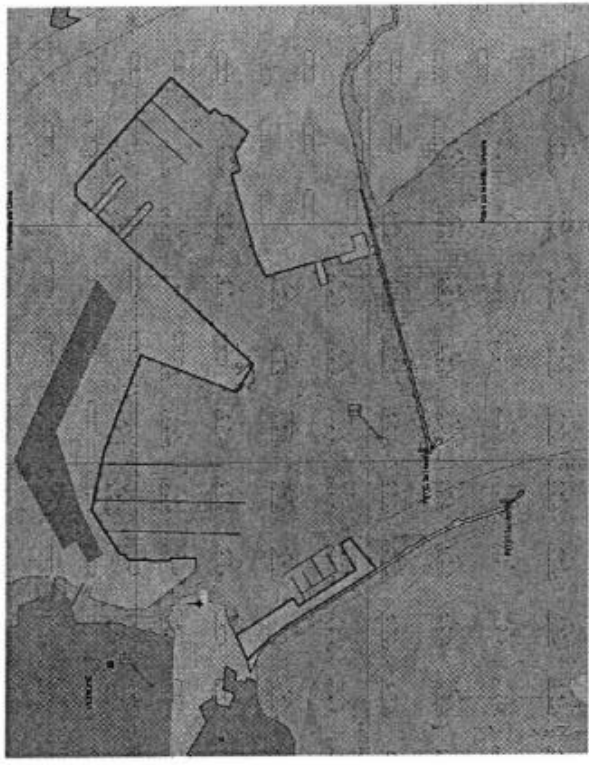


Taco BH 40/08 (EXT. Maregrábo)
Taco BH 42/08 (INT. Maregrábo)
Taco BH 44/08 (INT. Maregrábo)



Cotas em metros

*Nivelamento Geométrico a partir da MN "Taco IH (Cotovelo Enrocamento)" em 13 Janeiro de 2009



Esquema de nivelamento MARÉGRAFO SESIMBRA

Data: 2013-09-24

Relatório:
REL TF BH 01/13

Folha 1 de 1

ESQUEMA DE LOCALIZAÇÃO ESQUEMA GERAL DO PERCURSO



O Hidrógrafo do
Levantamento,

[Signature]
13 de Setembro

O responsável pelo
trabalho,

[Signature]
1.º Sargento

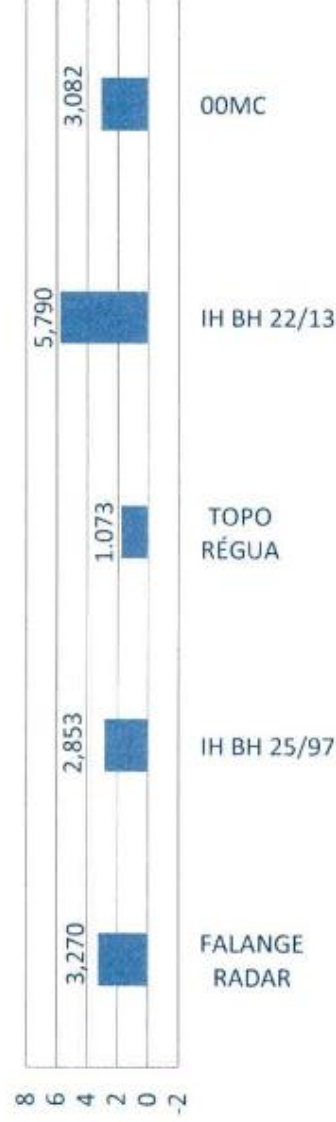
Nivelamento anterior:

- Data:
- Relatório:

Informação a constar:

1. Esquema geral do percurso de nivelamento
2. Esquema de localização
3. Esquema vertical
4. Imagens identificativas das principais marcas (verso)
5. Controlo de qualidade do nivelamento (verso)

ESQUEMA VERTICAL (Referido ao NMA)



Observação:

Nivelamento geométrico realizado em setembro de 2013 a partir do PA3D IH BH 22/13*.

*Cota obtida por GNSS (FPC no presente relatório).

Instituto Hidrográfico

Marcas de Nivelamento

Esquema Vertical e de Localização

IH.HI.26
V.01

Local: Sines / posto 3

Data: 2011-07-08

LOCALIZAÇÃO PORMENORIZADA DAS MARCAS

LOCALIZAÇÃO GERAL



CANTO 2



MC POÇO



FALANGE RADAR



TOPO RÉGUA



ESQUEMA VERTICAL

