



CARACTERIZAÇÃO DA MARÉ DE UM PORTO

Joana Mano Reis, Leonor Martins

Instituto Hidrográfico, Rua das Trinas, 49, 1249-093 Lisboa
joana.reis@hidrografico.pt, leonor.martins@hidrografico.pt

RESUMO

O conhecimento detalhado das características da maré de um dado local, é fundamental para a navegação e para a engenharia costeira e portuária. Neste artigo, ao mesmo tempo que é descrito globalmente o fenómeno da maré, pretende-se dar a conhecer alguns dos parâmetros caracterizadores e representativos da maré de um porto como, por exemplo, as constantes harmónicas e não harmónicas, os elementos de marés e as concordâncias.

De modo a se fornecer uma ideia global das características da maré na costa portuguesa, foram aplicadas constantes não harmónicas a portos principais e secundários na costa portuguesa e, para comparação, a alguns portos de Países Africanos de Língua Oficial Portuguesa e ao porto de Macau.

Por outro lado, reconhecendo-se que esses parâmetros por si só são insuficientes para uma descrição mais pormenorizada da maré de um dado local, são referidos vários aspectos envolvidos numa análise mais detalhada da maré de um porto como, por exemplo, a frequência de ocorrência de determinadas alturas de água e a percentagem de alturas de água acima de um determinado nível. Os procedimentos efectuados pelo Instituto Hidrográfico para a análise dos níveis de água registados foram aplicados, a título de exemplo, ao porto de Leixões.

1. Introdução

A engenharia costeira e portuária tem por base um conhecimento detalhado da dinâmica do litoral e, em especial, das condições físicas às quais está sujeito o local para uma futura construção. O dimensionamento das estruturas costeiras requer o estudo de factores tais como, os extremos de maré, as sobrelevações de tempestade e a agitação marítima, factores estes influenciados pela batimetria, configuração da linha de costa, correntes locais e meteorologia.

Por outro lado, quando se navega em águas costeiras, é necessário ter em conta as previsões de maré no local, as correntes de maré, o estado de agitação marítima e a meteorologia, uma vez que se deve ajustar o tempo estimado de chegada e partida de navios de um porto às condições mais favoráveis. Devem-se, também, considerar os níveis extremos atingidos pela maré de forma a determinar o período ideal para a passagem de navios por baixo de pontes ou viadutos ou a passagem de navios por locais pouco profundos.

Pelas razões descritas acima, torna-se importante prever o nível da água do mar para um período relativamente longo. A altura da água do mar, em qualquer instante, pode ser considerada como o somatório de três componentes principais: o nível médio do mar, a maré e



4^{as} Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária Angra do Heroísmo, 20 e 21 de Outubro de 2005

os efeitos meteorológicos. Cada uma destas componentes é controlada por processos físicos diferentes. A importância relativa dos movimentos do nível da água do mar depende, entre outros factores, da altura do ano, da latitude e da proximidade a zonas de águas pouco profundas.

A maré astronómica é a variação periódica do nível das águas, devida à atracção exercida pelo Sol e pela Lua sobre a Terra, cuja periodicidade é rigorosamente conhecida. Trata-se da única componente da maré que se pode prever com exactidão. As previsões de marés apresentadas na Tabela de Marés do Instituto Hidrográfico (IH) referem-se, pois, exclusivamente à maré astronómica.

O conhecimento do tempo e altura de maré previstos são de relevante importância numa grande variedade de aplicações práticas, tais como: na navegação em portos, baías e estuários; em projectos de engenharia costeira, como por exemplo, construção de pontes, docas e quebra-mares; no estabelecimento do datum das cartas náuticas e na demarcação dos limites legais da linha de costa; no estudo da evolução do nível médio do mar; no fornecimento da informação necessária para actividades de demolições subaquáticas e para outros usos em engenharia militar; no fornecimento de dados indispensáveis para a pesca, navegação, surf e outros desportos aquáticos.

Sendo a circulação da maré um fenómeno complexo, só foi possível estudá-lo com o desenvolvimento das ciências matemáticas e da tecnologia informática. No entanto, ainda hoje, não é possível responder de uma forma global às especificidades de cada local do globo. Porém, o estudo da maré de forma a caracterizar-se o fenómeno e a elaborar a respectiva previsão para um determinado local, está dominado e satisfaz plenamente as necessidades dos navegadores e da engenharia marítima e portuária. Nestes casos, as previsões são efectuadas com base num período relativamente longo de dados mareográficos, geralmente um ano, considerados de boa qualidade e recolhidos no local pretendido. Usando os períodos das principais forças geradoras de maré, denominadas constituintes de maré, é possível por análise harmónica prever a maré para um dado porto.

2. Generalidades sobre Marés

2.1 Circulação da Maré no Globo Terrestre

Só foi possível entender o fenómeno da maré depois de Newton ter formulado a Lei da Gravitação Universal em 1687. A explicação mais simples é obtida quando são desprezados os continentes e se assume que a Terra é uma esfera completamente coberta por água. O modelo de previsão associado a este caso é conhecido como o modelo de equilíbrio das marés, dado que estas resultam do equilíbrio de forças gravíticas. Para simplificação e considerando apenas o sistema Terra-Lua, a força centrífuga total dentro do sistema equilibra exactamente a força gravítica induzida pela atracção mútua entre a Terra e a Lua. O efeito combinado das forças gravítica e centrífuga é conhecido como a Força Geradora de Maré e pode ser representada por fórmulas matemáticas baseadas nas leis da gravitação. É a componente tangencial desta força que provoca o movimento da água na direcção do zénite, ponto da Terra mais perto da Lua, e do nadir, ponto da Terra mais afastado da Lua. Para o caso de uma Terra fictícia completamente coberta por água, o estado de equilíbrio é atingido na forma de um elipsóide com dois bojos: um na direcção da Lua e outro na direcção oposta.

Porém, o modelo de equilíbrio não explica muitos aspectos das marés, nomeadamente as diferenças de amplitude em diferentes locais da Terra. Posteriormente, quando se considerou a maré como uma onda (Laplace, 1799-1825), a previsão de marés tornou-se mais exacta. Este tipo de abordagem é conhecido como a teoria dinâmica das marés que, ao contrário do primeiro modelo considera que, apesar das forças que intervêm no movimento serem bem conhecidas, o movimento da maré resultante é extremamente complexo devido, por exemplo, à distribuição irregular dos continentes e oceanos no planeta Terra, à batimetria e aos efeitos do atrito e inércia.



4^{as} Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária Angra do Heroísmo, 20 e 21 de Outubro de 2005

Hoje em dia, sabe-se que a circulação das marés se efectua em torno de um ponto central, situado aproximadamente no centro de cada bacia e em cada hemisfério, no qual a amplitude de maré é nula – ponto anfidrómico. Esta circulação complexa das marés constitui o chamado sistema anfidrómico. Em cada sistema, as linhas cotidais, linhas de igual fase de maré, saem de forma radial dos pontos anfidrómicos e as linhas de igual amplitude de maré formam trajectórias quase concêntricas em torno destes pontos. Como todas as ondas que se aproximam da costa, a onda de maré sofre um aumento de altura à medida que a profundidade diminui. Pelo contrário, em direcção ao centro da bacia oceânica, a altura da onda de maré diminui até se anular no ponto anfidrómico. Portanto, a amplitude de maré aumenta com a distância ao ponto anfidrómico. Em geral, no Hemisfério Norte, as ondas de maré dentro dos sistemas anfidrómicos circulam no sentido contrário aos ponteiros do relógio e, o inverso, acontece no Hemisfério Sul. Podem-se criar diversos pontos anfidrómicos, sempre que as bacias oceânicas sofram uma certa compartimentação, como no caso do Mar do Norte, que funciona como uma bacia independente do resto do Atlântico Norte.

As correntes de maré seguem este padrão rotativo nas bacias oceânicas e são geralmente muito fracas longe da costa. Junto à costa verificam-se correntes fortes e variáveis, cujo conhecimento se torna importante para o navegador, uma vez que à componente teórica da corrente de maré se sobrepõem frequentemente correntes de origem hidráulica e que correspondem ao enchimento e ao esvaziamento das bacias costeiras ou estuários sob o efeito da maré (Instituto Hidrográfico, 1984). A velocidade máxima destas correntes acontece aquando da enchente e da vazante, quando o nível da água está aproximadamente a meio caminho entre o da preia-mar (PM) e o da baixa-mar (BM).

As amplitudes de maré maiores situam-se principalmente sobre a plataforma continental, junto aos continentes ou nos mares pouco profundos como é o caso do canal da Mancha. As amplitudes são muito fracas em mares semi-fechados de dimensões reduzidas, por exemplo, Mar do Japão, Mar das Antilhas, Mar Báltico e Mar Mediterrâneo. Note-se que, em vocabulário de marés, a amplitude da onda de maré é a altura de água desde o nível médio a uma PM ou BM. As marés observadas nos oceanos principais têm amplitudes de cerca de 0.5 metros havendo, no entanto, diversas variações. Em alguns locais da plataforma continental, as amplitudes podem exceder os 5 m. Um exemplo extremo é o da Bacia de Minas na Baía de Fundy (Canadá) onde por vezes ocorrem amplitudes de cerca de 8 m. A causa principal destas elevadas amplitudes é a ressonância no sistema *Baía de Fundy / Golfo de Maine*. Este sistema tem um período natural de oscilação de aproximadamente 13 horas que é próximo do período de 12 horas e 25 minutos da componente de maré lunar dominante no Oceano Atlântico – a constituinte M_2 (Garrett, 1972, 1974).

As marés na costa portuguesa têm amplitudes médias da ordem do 1,0 m em Portugal Continental, cerca de 0,7 m no arquipélago da Madeira e aproximadamente 0,5 m no Arquipélago dos Açores. A Fig.1 compara as amplitudes registadas em Portugal Continental (1.a) com as dos Arquipélagos da Madeira (1.b) e dos Açores (1.c), em época de marés vivas equinociais. Nesta altura do ano e, por razões que serão explicadas adiante, vários factores astronómicos estão conjugados o que provoca o aumento da amplitude da maré relativamente ao normal. Verifica-se que no Continente a amplitude de maré é superior à das Ilhas, não chegando a atingir os 2 m. Nos arquipélagos constatam-se amplitudes inferiores, dado que se tratam de locais no centro do Oceano Atlântico, ou seja, fora da influência dos continentes onde a profundidade é menor. O arquipélago dos Açores é o local que apresenta a amplitude de maré menor.



4^{as} Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária Angra do Heroísmo, 20 e 21 de Outubro de 2005

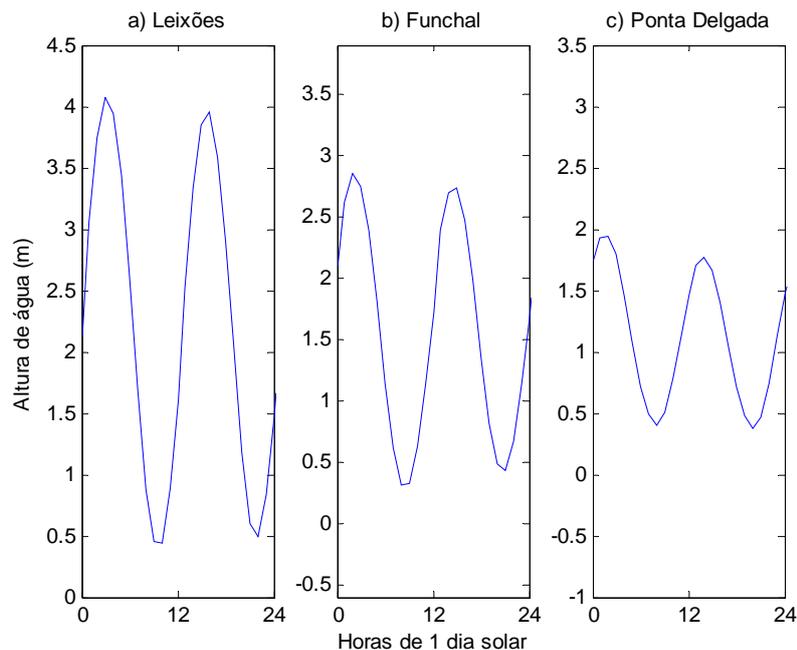


Fig. 1. Observações maregráficas em Leixões (a), Funchal (b) e Ponta Delgada (c), registadas em Março de 2003, em dias de marés vivas equinociais. A figura exemplifica claramente as diferenças de amplitude de maré entre Portugal Continental, Arquipélago da Madeira e Arquipélago dos Açores. Note-se que os valores de altura de água registados estão referidos ao Zero Hidrográfico. Para comparação, as escalas das figuras a), b) e c) foram colocadas de modo a que os níveis médios do mar, em cada local, ficassem no mesmo nível.

Quando num mesmo dia existe diferença de altura entre duas PM ou as duas BM, diz-se que a maré tem desigualdade diurna. Esta desigualdade 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. Na nossa costa esta desigualdade é, regra geral, da ordem de 0,05 a 0,20 m.

2.2 Níveis de referência

Na análise e previsão de marés é necessário considerar alguns níveis de referência vertical. Foi assumida como referência para todas as operações de cotas ou altitudes, em Portugal, a superfície equipotencial coincidente com o nível médio do mar em Cascais, determinado a partir de 50 anos de dados maregráficos centrados em 1910. Existem marcas de nivelamento espalhadas por todo o território Português cuja cota indica o seu afastamento vertical relativamente ao Nível Médio Adoptado (NMA). O transporte desta medida para o resto do País foi efectuado através de nivelamento geométrico levado a cabo pelo Instituto Geográfico Português (IGP), que é a autoridade nacional responsável pela definição do Datum Altimétrico. O IH efectua nivelamentos a partir das marcas do IGP ligando estas marcas à estação maregráfica.

As previsões de alturas horárias de maré, assim como, as de PM e BM publicadas nas Tabelas de Marés do IH, são calculadas para cada porto em relação ao Zero Hidrográfico (ZH). O nível de redução de sondagem ou ZH é a superfície em relação à qual são referidas as sondas e as linhas isobatimétricas das cartas náuticas. É definido com base no conceito de que deve estar colocado abaixo das mais baixas BM exigindo, assim, o cálculo da BM extrema e a



4^as Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária Angra do Heroísmo, 20 e 21 de Outubro de 2005

aplicação de uma margem de segurança, designada por “pé de piloto” que é variável de porto para porto e nunca excedendo o valor de 30 cm (Instituto Hidrográfico, 1984).

O controlo vertical é um dos aspectos mais importantes da qualidade dos dados que o equipamento regista e obtém-se aferindo o registo do marégrafo, aparelho que mede e regista o nível da água do mar, com valores considerados de confiança. Geralmente, a referência utilizada é uma escala de marés que tem de estar obrigatoriamente nivelada a partir de um conjunto de marcas de nivelamento associadas à instalação maregráfica costeira.

O nivelamento geométrico é a medição de diferenças de altitude entre dois locais obtendo-se através da diferença entre as leituras efectuadas com um nível óptico em duas miras colocadas verticalmente. Uma operação de nivelamento geométrico comporta uma série de medições sucessivas, com início num ponto de altitude conhecida, a qual é transportada ao longo de um determinado trajecto.

3. Parâmetros Caracterizadores da Maré de um Porto

3.1 Constantes Harmónicas

As forças geradoras de maré têm em conta as mudanças constantes das declinações do Sol e da Lua, as variações cíclicas da posição destes dois astros relativamente à Terra e o facto de existirem variações de longo período, tais como o período de 18,6 anos correspondente à precessão dos nodos lunares, pontos onde a Lua cruza o plano da eclíptica. Sendo os movimentos do Sol e da Lua conhecidos com precisão, estes factores são considerados ao se expressar as forças geradoras de maré resultantes, através da soma de constituintes harmónicas simples, em que cada uma tem o seu período, fase e amplitude característicos. A Tabela 1 apresenta algumas das principais constituintes da maré astronómica.

TABELA 1. Descrição das principais constituintes da maré astronómica

Nome	Símbolo	Velocidade (°/h)	Descrição
Onda principal lunar semi-diurna	M_2	28,984	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 semi-diurna	S_2	30,000	Representa a maré que seria produzida por um sol fictício percorrendo em movimento uniforme uma órbita circular situada no plano do equador celeste (sol médio).
Onda elíptica lunar maior	N_2	28,440	Resulta da elipticidade da órbita lunar.
Onda semi-diurna declinacional luni-solar	K_2	30,082	Representa as variações em declinação da Lua e do Sol. Também designada por sideral semi-diurna.
Onda diurna declinacional luni-solar	K_1	15,041	Representa as variações em declinação da Lua e do Sol. Também designada por sideral diurna.
Onda diurna declinacional lunar	O_1	13,943	Traduz as variações da declinação da Lua.
Onda diurna declinacional solar	P_1	14,959	Traduz as variações da declinação do Sol.



4^{as} Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária Angra do Heroísmo, 20 e 21 de Outubro de 2005

O período de cada constituinte é determinado a partir de estudos astronómicos. Porém, a amplitude e a fase da resposta da maré a cada constituinte não são possíveis de determinar através das forças geradoras. Este problema é adequado aos métodos de análise harmónica. Aplicado ao estudo da maré, este processo matemático permite que a maré observada num dado local seja separada em constituintes harmónicas simples. A sua finalidade é determinar a amplitude e fase de cada constituinte, às quais se dá o nome de constantes harmónicas (CH).

As CH não dependem do tempo e são típicas de cada porto. Por esta razão, constituem a base fundamental para a caracterização da maré num dado local. Porém, podem sofrer alterações devido a fenómenos, tais como: erosão, assoreamentos e obras costeiras e portuárias. Portanto, devem ser renovadas com a frequência necessária para que as previsões de maré se ajustem o mais possível à maré registada no local.

Admitindo o princípio da sobreposição dos pequenos movimentos, a maré total é a soma de marés parciais que se designam por ondas componentes ou ondas constituintes e pode ser representada por uma expressão com o seguinte formato:

$$h = \sum H \cos(wt - \phi) \quad (1)$$

em que h é a altura do nível da água acima do nível médio, H é a amplitude da onda, w é a velocidade angular da onda e ϕ é a fase da onda no instante $t=0$. Cada onda constituinte é caracterizada pela velocidade angular w ou pelo seu período e é, em geral, designada por uma letra e um índice que indica a espécie a que pertence. Podem-se considerar na prática, em qualquer lugar do mundo, 7 espécies diferentes de ondas: longo período, diurnas, semi-diurnas, terço-diurnas, quarto-diurnas, sexto-diurnas e oitavo-diurnas. Sendo a velocidade angular de cada onda conhecida através de estudos astronómicos, tem-se como únicas incógnitas as constantes harmónicas, amplitude e fase. Segundo o critério de Nyquist, o intervalo de amostragem utilizado e suficiente é de uma hora dado que a frequência máxima registada é a oitavo-diurna. Este intervalo de amostragem dá origem às chamadas alturas horárias (AH).

As AH a utilizar na análise harmónica e em qualquer estudo de marés, devem apenas reflectir a evolução da altura de água provocada por efeitos astronómicos. Assim, é efectuada uma filtragem das observações, de modo a impedir que a energia de outros fenómenos de curto período, como a agitação marítima, contaminem os dados.

O método de análise harmónica utilizado no IH consiste na execução de uma filtragem inicial das AH, transformando-as em alturas reduzidas ao meio-dia de forma a diminuir os resíduos entre o resultado da análise harmónica e a maré real. Este método faz com que se perca um dia no início e outro no fim de cada série a tratar, pelo que não é vantajoso quando aplicado a séries com bastantes interrupções. Obtidas as alturas reduzidas, 24 por dia, são calculados os coeficientes de Fourier para cada dia e correspondentes às principais sete espécies de ondas. Este processo permite isolar melhor as bandas de frequência correspondentes às diferentes espécies de ondas da maré. O ajustamento é efectuado por mínimos quadrados e consiste na determinação do valor das incógnitas que minimizam o somatório do quadrado dos resíduos, isto é, as diferenças entre as alturas de água observadas e produzidas pelo somatório das ondas possíveis (Simon, 1974).

Uma boa análise harmónica produz previsões que se ajustam adequadamente à realidade. O modo de previsão globalmente utilizado envolve a solução obtida a partir da aplicação da fórmula harmónica (2). Esta fórmula é utilizada tanto na previsão como na análise harmónica e é uma expressão mais complexa e detalhada do que a referida em (1).

$$h = A_0 + \sum_i^n f_i H_i \cos[w_i t + (V_0 + u)_i - g_i] \quad (2)$$

Na expressão (2), A_0 representa, para o caso da previsão, o nível médio adoptado e no caso da análise, o nível médio encontrado na série, f é o factor nodal e é função da obliquidade da órbita lunar sobre o Equador, H é a amplitude da onda, w é a velocidade da onda, V_0 é o argumento inicial e representa a situação da onda no início da série temporal e referida ao meridiano de Greenwich, u é uma correcção ao argumento inicial, g é a fase da onda, t é o



4^as Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária Angra do Heroísmo, 20 e 21 de Outubro de 2005

tempo desde t_0 (instante do primeiro valor a prever) e n é o número total de constituintes consideradas. Nesta expressão, a velocidade angular w 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 calculadas a partir de tabelas publicadas em livros da especialidade (Schureman, 1988). Como já foi referido, os valores das CH, amplitude e fase, são determinados por análise harmónica.

A separação das componentes dentro de cada espécie de onda depende do tamanho da série temporal de que se dispõe. Segundo Rayleigh, duas ondas de velocidade w_1 e w_2 são separáveis num período T se cumprirem o seguinte critério:

$$T|w_2 - w_1| \geq 360^\circ \quad (3)$$

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 ser o maior período que se conhece em relação a este fenómeno. 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 factores nodais f e argumentos astronómicos u .

3.2 Constantes Não Harmónicas

Ainda antes de ser utilizada a análise harmónica para a previsão e caracterização da maré de um porto, já os métodos não harmónicos eram vulgarmente usados uma vez que não necessitavam de avanços tecnológicos para o seu cálculo. Estes métodos baseavam-se em relações empíricas deduzidas de observações relacionadas com quantidades astronómicas. Os valores obtidos são denominados por constantes não harmónicas e são caracterizadores da maré para um dado local. Hoje em dia, as constantes não harmónicas são obtidas directamente através de expressões que as relacionam com as constantes harmónicas.

Para determinar as características fundamentais da maré de um porto são apenas necessários poucos termos agrupados nas espécies de ondas diurna e semi-diurna: no grupo diurno a K_1 e O_1 e no grupo semi-diurno a M_2 , S_2 , e K_2 . Na Tabela 1 estão descritas as principais características das ondas referidas.

A primeira constante não harmónica que deve ser considerada é o tipo de maré. Este parâmetro reflecte a importância relativa das influências diurnas e semi-diurnas na maré. A sua determinação faz-se comparando as amplitudes (H) das duas principais constituintes de cada espécie, ou seja, as diurnas K_1 e O_1 com as semi-diurnas M_2 e S_2 :

$$R = \frac{H_{K_1} + H_{O_1}}{H_{M_2} + H_{S_2}} \quad (4)$$

As marés podem ser classificadas em quatro tipos conforme o valor de R obtido. Se $0 < R < 0,25$ a maré é considerada semi-diurna regular, se $0,25 < R < 1,5$ a maré é semi-diurna com forte desigualdade diurna, se $1,5 < R < 3$ a maré é mista e se $R > 3$ a maré é diurna.

A maré semi-diurna tem duas PM e duas BM em cada dia lunar. O dia lunar é o período médio de rotação da Terra em relação à Lua ou o intervalo médio entre duas passagens da Lua pelo meridiano superior do lugar. O seu valor médio é cerca de 24,84 horas solares médias. A maré semi-diurna, com forte desigualdade diurna, é uma maré em que, na grande maioria dos dias, ocorrem duas PM e duas BM por dia lunar mas verificando-se uma acentuada desigualdade diurna. Se a maré é mista, nalguns dias ocorrem duas PM e duas BM por dia lunar e, noutros, uma PM e uma BM por dia lunar. A maré diurna é caracterizada por ter apenas uma PM e uma BM em cada dia lunar.

A Tabela 2 apresenta as constantes não harmónicas que irão ser referidas neste artigo, para diversos portos ao longo da costa portuguesa e, para fins comparativos, para portos de



4^{as} Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária
Angra do Heroísmo, 20 e 21 de Outubro de 2005

alguns Países Africanos de Língua Oficial Portuguesa (PALOP) e para o porto de Macau. Foram determinadas constantes não harmónicas para um número superior de portos do que o apresentado, tendo sido efectuada posteriormente, uma selecção dos resultados mais representativos de cada zona.

TABELA 2. Constantes não harmónicas para alguns portos Portugueses, para portos de Países Africanos de Língua Oficial Portuguesa e para o porto de Macau.

Porto	R	RFA	U	IM		EP		EM		EP-EM
				h	m	h	m	h	m	
Viana do Castelo	0,09	2,87	1,51	27	46	2	1	2	1	15
Leixões	0,09	2,89	1,52	27	51	1	58	1	58	15
Aveiro – Molhe central	0,09	2,90	1,39	27	40	2	7	2	7	15
Ria de Aveiro – São Jacinto	0,09	2,95	1,23	30	13	2	32	2	31	16
Ria de Aveiro – Ovar	0,19	4,69	0,44	36	18	6	7	6	6	13
Ria de Aveiro – Rio Manchão	0,25	5,07	0,28	55	12	6	58	6	58	18
Ria de Aveiro – Lota	0,10	3,46	1,14	30	6	2	59	2	59	14
Ria de Aveiro – Costa Nova	0,10	3,12	1,21	31	30	2	43	2	43	16
Figueira da Foz	0,09	2,85	1,48	27	40	1	59	1	59	15
Peniche	0,10	2,84	1,48	26	52	1	46	1	45	15
Cascais	0,09	2,82	1,48	26	35	1	35	1	34	15
Paço de Arcos	0,09	2,86	1,47	27	28	1	49	1	49	15
Pedrouços	0,09	2,88	1,55	27	51	1	50	1	50	15
Lisboa – Terreiro do Trigo	0,08	2,94	1,66	29	20	2	9	2	9	16
Cabo Ruivo	0,08	2,85	1,78	29	20	2	5	2	5	16
Póvoa de Santa Iria	0,08	2,96	1,80	33	4	2	25	2	24	18
Vila Franca de Xira	0,08	3,22	1,67	35	50	2	57	2	57	18
Carregado	0,09	3,49	1,39	42	20	3	47	3	46	19
Ponta da Erva	0,08	2,90	1,87	31	48	2	22	2	22	17
Alcochete	0,08	2,90	1,82	31	30	2	15	2	15	17
Montijo	0,08	2,84	1,74	29	8	2	4	2	4	16
Seixal	0,08	2,84	1,68	28	56	2	5	2	5	16
Base do Arsenal – Alfeite	0,08	2,93	1,66	30	31	1	58	1	58	16
Cacilhas	0,08	2,88	1,66	29	2	1	57	1	57	16
Trafaria	0,09	2,90	1,52	27	46	1	56	1	56	15
Sesimbra	0,10	2,83	1,42	25	36	1	35	1	35	14
Setúbal – Tróia	0,09	2,92	1,47	29	26	1	58	1	57	16
Sines	0,10	2,84	1,43	25	41	1	34	1	34	14
Lagos	0,10	2,78	1,49	25	59	1	26	1	26	14
Barra de Faro/Olhão	0,09	2,85	1,43	27	34	1	42	1	42	15
Vila Real de Santo António	0,09	2,87	1,41	25	41	1	46	1	45	14
Madeira Funchal	0,11	2,70	1,05	21	33	0	24	0	24	12
Açores Vila do Porto	0,09	2,56	0,72	19	48	0	28	0	28	12
Ponta Delgada	0,10	2,77	0,72	20	18	0	24	0	24	11
Angra do Heroísmo	0,10	2,76	0,65	20	6	0	22	0	22	11
Horta – Faial	0,11	2,70	0,61	18	19	0	4	0	4	10
Santa Cruz – Flores	0,09	2,81	0,57	19	42	0	-2	0	-2	11
Cabo Verde Porto Grande	0,21	2,70	0,47	46	5	7	31	7	30	26
Guiné-Bissau Iheu de Caió	0,10	3,53	1,36	36	31	9	17	9	17	17
S. Tomé e Príncipe B. de Ana Chaves	0,18	2,99	0,74	27	40	3	44	3	44	15



4^{as} Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária
Angra do Heroísmo, 20 e 21 de Outubro de 2005

Angola	Porto de Luanda	0,14	3,03	0,69	27	3	3	37	3	37	14
Moçambique	Maputo	0,04	1,75	1,63	40	8	4	22	4	21	31
	Porto da Beira	0,02	1,70	3,09	43	40	4	43	4	42	34
China	Macau	1,02	—	—	—	—	—	—	—	—	—

Da análise da tabela constata-se que todos os portos na costa portuguesa incluindo os pertencentes aos arquipélagos da Madeira e Açores apresentam maré semi-diurna regular dado que foram obtidos valores de R inferiores a 0,25. Estes resultados confirmam as curvas de maré, para 3 portos na costa portuguesa, apresentadas na Fig. 1, onde se observam duas PM e duas BM por dia e reduzida desigualdade diurna. Também nos portos dos PALOP se verifica este tipo de maré. Apenas o porto de Macau não apresenta maré semi-diurna regular, tendo-se obtido $R = 1,02$, e que se encontra dentro do intervalo correspondente a uma maré semi-diurna com forte desigualdade diurna. A Fig. 2 apresenta 16 dias de observações maregráficas, no porto de Macau, contados a partir da Lua Nova. Constata-se que em mais de metade dos dias a maré é semi-diurna. A desigualdade diurna é tão acentuada que a maré se tornou diurna durante cerca de 3 dias.

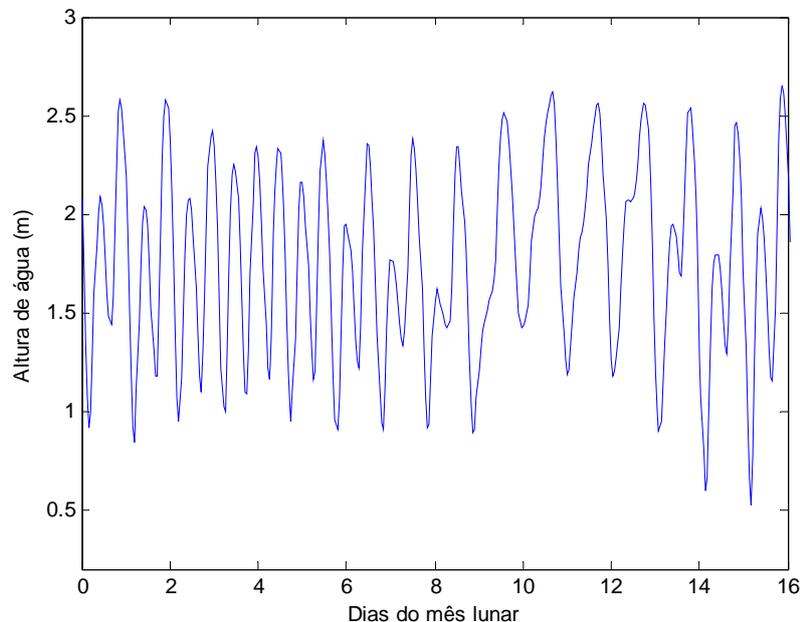


Fig. 2. Observações maregráficas no porto de Macau, em Março de 1985, com uma duração de 16 dias a contar da Lua Nova. Trata-se de uma curva de maré semi-diurna com forte desigualdade diurna mas que apresenta maré diurna em aproximadamente 3 dias.

Para além do tipo de maré consideram-se, habitualmente, as seguintes constantes não harmónicas: relação das forças atractivas, unidade de altura, estabelecimento médio, estabelecimento do porto e idade da maré. O método de cálculo destas constantes e que irá ser apresentado em seguida, apenas é válido para maré semi-diurna regular, ou seja, para marés em que a desigualdade diurna não é preponderante, como é o caso de todo o território português. Por esta razão, não se efectuou o cálculo das constantes não harmónicas para o porto de Macau por se ter registado maré semi-diurna com forte desigualdade diurna. No entanto, relações semelhantes podem ser deduzidas para os outros tipos de maré.

A relação das forças atractivas compara a amplitude da onda lunar média (M_2) com a onda solar média (S_2), através da seguinte expressão:

$$\beta = \frac{H_{M_2}}{H_{S_2}} \quad (5)$$

Quanto maior o valor de β menor é a diferença de 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 atractivas é aproximadamente 3, confirmando a ideia de que a influência da Lua na maré é cerca de 3 vezes superior à do Sol. Em Moçambique obtiveram-se valores de β inferiores a 2, o que se reflecte na elevada diferença de amplitudes entre águas vivas e águas mortas registada neste país (Fig. 3).

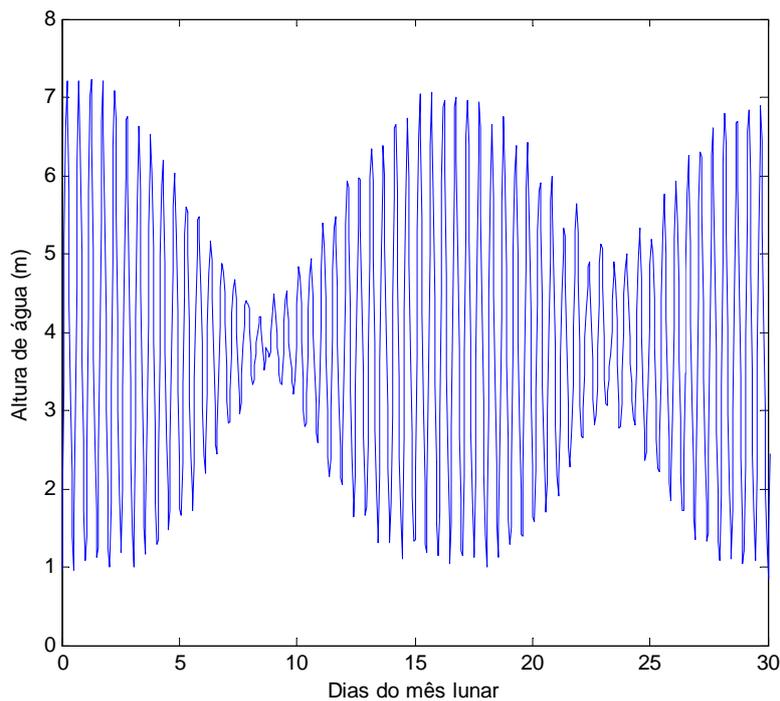


Fig. 3. Observações maregráficas no Porto da Beira em Moçambique. Os dados apresentados totalizam aproximadamente um mês lunar, ou seja, um mês com início e fim em dia de Lua Nova, e são correspondentes ao período de 22 de Março a 21 de Abril de 1996. Note-se, por um lado, a elevada diferença de amplitudes entre a maré viva e a maré morta e, por outro, a amplitude da maré, em geral, muito elevada.

Outros casos excepcionais verificam-se na Guiné-Bissau, em que a relação das forças atractivas ultrapassa os 3,5 e no interior da Ria de Aveiro, no rio Manchão, onde este parâmetro atinge o valor de 5,07. Neste último caso, não se consegue distinguir a diferença de amplitude entre águas vivas e águas mortas, como se pode observar na Fig.4, onde se encontram registadas observações maregráficas para o rio Manchão de um período de cerca de um mês. Este local, a montante da ria, apresenta uma reduzida amplitude de maré e é bastante perceptível a desigualdade diurna, como por exemplo, entre os dias 20 e 25.

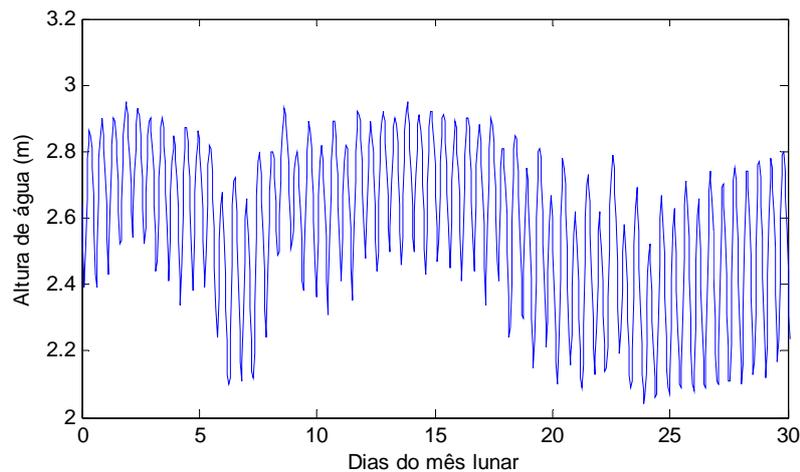


Fig. 4. Observações maregráficas no rio Manchão, na Ria de Aveiro, de 22 de Outubro a 21 de Novembro de 1987. A diferença de amplitudes de maré entre marés vivas e marés mortas é praticamente imperceptível. Este local tem um tipo de maré limite ($R = 0,25$), ou seja, situa-se entre a maré semi-diurna regular e a maré semi-diurna com fortes desigualdades diurnas. Os dados apresentados totalizam aproximadamente um mês lunar.

A unidade de altura, 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 M_2 , S_2 e K_2 e fornece uma ideia geral da ordem de grandeza das amplitudes registadas num dado local. A constituinte K_2 , que representa as variações em declinação da Lua e do Sol, está em fase com a S_2 duas vezes no ano, precisamente nos equinócios. A unidade de altura é determinada através da expressão:

$$U = H_{M_2} + H_{S_2} + H_{K_2} \quad (6)$$

Associado ao conceito de unidade de altura, surge um outro, este de variação temporal, denominado de coeficiente de maré (c). A comparação de qualquer amplitude H (que se obtém, neste caso particular, determinando a semi-diferença entre cada PM e a BM seguinte) 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. O coeficiente de maré obtém-se através da fórmula:

$$c = \frac{H}{U} \times 100 \quad (7)$$

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 (Tabela 3):

TABELA 3. Coeficientes de Maré (c) para situações típicas.

C	Situação Típica
20	Águas mortas mínimas
45	Águas mortas médias ($H_{M_2} - H_{S_2}$)
95	Águas vivas médias ($H_{M_2} + H_{S_2}$)
100	Águas vivas de equinócio ($H_{M_2} + H_{S_2} + H_{K_2}$)
120	Águas vivas máximas

Os valores apresentados na Tabela 3 pressupõem uma relação aproximada da amplitude entre as constituintes, tendo-se considerado para a M_2 70% de U , para a S_2 25% de U e para a K_2 5% de U . Em locais com relações de amplitude muito diferentes da considerada, estes coeficientes deixam de poder ser aplicados. O coeficiente de maré é ainda muito utilizado para o território português e em alguns locais da Europa. Um exemplo de utilização do parâmetro apresentado é o das campanhas de medição de correntes de maré em que normalmente se escolhem dias próximos dos coeficientes de maré de águas mortas (45) e de águas vivas (95).

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. Para o caso dos portos dos PALOP analisados, as unidades de altura estão entre os 0,47 m, em Cabo Verde, e os 3,09 m registados no porto da Beira, em Moçambique (Fig. 3).

Nos estuários, se outros factores não intervierem, a tendência é para a amplitude da onda de maré aumentar à medida que se caminha para montante, devido à diminuição da profundidade. Porém, isto só acontece até dado ponto pois a amplitude da maré começa a diminuir por causa do atrito sobre o fundo e a margem, induzindo a perdas de energia. Veja-se o caso do estuário do Tejo (Fig. 5). Como se pode observar na Tabela 2, a unidade de altura aumenta até à Ponta da Erva ($U = 1,87$), começando a diminuir em Vila Franca de Xira ($U = 1,67$ m) e atingindo, no Carregado, um valor ainda inferior ($U = 1,39$ m).

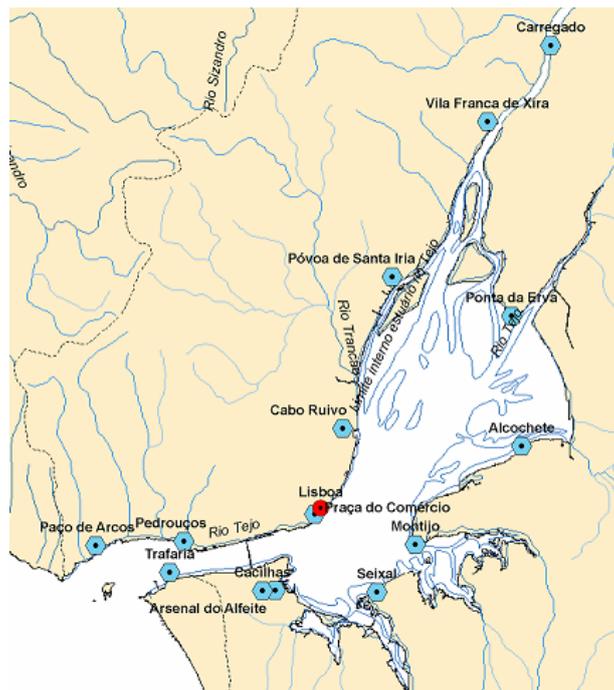


Fig. 5. Estuário do Tejo

Na ria de Aveiro também se verifica esta tendência. O caso extremo é o do rio Manchão onde se obteve uma unidade de altura de 0,28 m (Fig.4).

Referem-se, agora, parâmetros temporais que também, caracterizam a maré de um dado local. O primeiro a considerar é o estabelecimento médio que representa o atraso médio entre a ocorrência de uma PM e a passagem da lua média pelo meridiano do lugar. O estabelecimento médio é dado pela seguinte expressão (note-se que k representa a fase local e w a velocidade em $^{\circ}/h$):



$$EM = \frac{k_{M_2}}{w_{M_2}} \quad (8)$$

O estabelecimento do porto representa o retardo da PM semi-diurna da tarde que se produziria em dia de sizígia (posição da Lua em Lua Nova ou Lua Cheia), com a Lua e o Sol no Equador e à distância média da Terra. O seu valor é calculado em função das diferenças de fase entre as constituintes S_2 e M_2 e através da sua relação de amplitudes. A expressão (9) demonstra como determinar o estabelecimento do porto:

$$EP = \frac{k_{M_2}}{w_{M_2}} + \frac{1}{w_{M_2}} \arctan \left(\frac{\sin(k_{S_2} - k_{M_2})}{H_{M_2} / H_{S_2} + \cos(k_{S_2} - k_{M_2})} \right) \quad (9)$$

Antigamente, antes de se ter descoberto a análise harmónica, era necessário um número exagerado de observações para se obter um valor médio aceitável para o estabelecimento médio. Por isso, era utilizado o conceito alternativo de estabelecimento do porto que necessitava de menos observações. Hoje em dia, em que os conceitos de constantes não harmónicas foram redefinidos a partir das constantes harmónicas, torna-se mais vantajoso por todas as razões excepto a histórica, o uso do estabelecimento médio. Para além da simplificada expressão matemática (8), veja-se, na Tabela 2, as diferenças de poucos segundos entre os dois parâmetros.

Na costa continental portuguesa o estabelecimento médio é de aproximadamente 2 horas e nas ilhas quase não excede os 30 minutos. Nas rias, que se tratam de situações excepcionais, pode haver atrasos superiores a 6 horas como é o caso da Ria de Aveiro. A montante no rio Tejo obteve-se um atraso de quase 4 horas para o Carregado (3 horas e 46 minutos) e próximo das 3 horas em Vila Franca (2 horas e 57 minutos).

Para finalizar, a idade da maré determina 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. A expressão da idade de maré é a seguinte:

$$IM = \frac{k_{S_2} - k_{M_2}}{w_{S_2} - w_{M_2}} \quad (10)$$

A idade da maré é, em geral, pouco superior a 1 dia no Continente mas, nos Açores e na Madeira situa-se entre as 18 e as 22 horas. Como seria de esperar, os valores mais elevados ocorrem em rios e estuários.

Três dos parâmetros apresentados podem ser usados como métodos expeditos de previsão de maré, nomeadamente, o estabelecimento do porto ou o estabelecimento médio para o cálculo da hora da maré, a idade da maré para se saber quando ocorre a maré viva e, ainda, a unidade de altura para o cálculo da altura da maré na PM e na BM.

3.3 Elementos de Marés e Concordâncias

Na Tabela de Marés, o IH publica dois parâmetros de aplicação simples – elementos de marés e concordâncias – que também podem ser considerados caracterizadores da maré de um porto. Apesar de não possuírem o rigor da análise harmónica, são um bom indicador dos níveis médios encontrados para um dado local.

De um modo geral, os elementos de marés são valores médios e extremos de PM e BM e o seu cálculo é efectuado de forma diferente, consoante a função a que se destina: ou para cartas náuticas oficiais ou para tabelas de marés. Os elementos que se calculam para o caso de uma maré semi-diurna regular são os seguintes: PM máxima (PM max), PM média de águas vivas (PM AV), PM média de águas mortas (PM AM), BM média de águas mortas (BM AM), BM média de águas vivas (BM AV) e BM mínima (BM min). É de notar que os elementos de marés contemplam



4^as Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária Angra do Heroísmo, 20 e 21 de Outubro de 2005

apenas as causas astronómicas e são determinados em relação ao NMA em vez do nível médio real.

Os elementos de marés que figuram na Tabela de Marés Anual do IH (Instituto Hidrográfico, 2004) são calculados com base nos valores gerados para previsões desse ano. A título de exemplo descreve-se o modo como é calculada a PM de águas vivas, com base nas previsões desse ano: para cada situação de águas vivas é efectuada a média entre a maior PM e a PM adjacente de modo a anular o efeito da desigualdade diurna, determinando-se a média de todos os valores assim obtidos. Os valores extremos (PM máxima e BM mínima) são os extremos encontrados nas previsões para esse mesmo ano.

Dado que as cartas náuticas não são actualizadas anualmente, pretendem-se valores representativos do 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 de, pelo menos, 18 anos consecutivos. A Tabela 4 demonstra como calcular os diversos elementos de marés para cartas náuticas e apresenta, a título de exemplo, os elementos de marés para o porto de Leixões.

TABELA 4. Elementos de marés do porto de Leixões para as cartas náuticas. A PM máxima e BM mínima foram determinadas a partir de 36 anos de previsões de maré.

Elementos de Marés	Fórmula de Cálculo	Valor obtido
PM max	Valor obtido por previsões	3,96 m
PM AV	$NM + h_{M_2} + h_{S_2}$	3,42 m
PM AM	$NM + h_{M_2} - h_{S_2}$	2,69 m
BM AM	$NM - h_{M_2} + h_{S_2}$	1,31 m
BM AV	$NM - h_{M_2} - h_{S_2}$	0,58 m
BM min	Valor obtido por previsões	0,09 m

Na Tabela de Marés são publicadas, no Volume I, as previsões de PM e BM para 19 portos principais pertencentes ao Continente e Ilhas. No entanto, há locais secundários para onde é também, importante conhecer a maré. Por essa razão, são publicadas na referida Tabela, diferenças em tempo e em altura, entre os portos principais e secundários, denominadas concordâncias de maré.

O método das concordâncias consiste no estabelecimento da relação da maré num porto secundário com outro porto designado de referência. Sendo simples diferenças médias, são valores menos fiáveis do que a análise harmónica efectuada para os portos principais. Porém, para locais bastante a montante dos rios e estuários, onde a profundidade é cada vez menor, a onda de maré sofre uma deformação. Assim, esta informação é mais apropriada dado que a análise harmónica deixa de se ajustar adequadamente à curva de maré. Por exemplo, para o caso particular do Carregado, local a montante do estuário do Tejo, a PM de águas vivas ocorre 1 hora e 18 minutos depois de ter ocorrido no correspondente porto principal e a BM de águas vivas tem um atraso de 2 horas e 5 minutos (Instituto Hidrográfico, 2004).

3.4 Diferenças entre maré observada e prevista

As previsões publicadas na Tabela de Marés apenas consideram as causas astronómicas. No entanto, a subida e descida da água do mar tem também causas meteorológicas associadas, impossíveis de prever a longo prazo. As condições meteorológicas



4^{as} Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária Angra do Heroísmo, 20 e 21 de Outubro de 2005

são a principal causa de diferenças entre alturas de maré previstas e observadas. Regra geral, estas diferenças são originadas por ventos fortes ou de prolongada duração e por variações da pressão atmosférica. Em condições meteorológicas não muito extremas há uma correlação negativa forte entre a pressão atmosférica e o nível médio do mar. A uma baixa de pressão de 10 milibares corresponde uma elevação do nível do mar de aproximadamente 9 cm.

A estes factores pode-se ainda adicionar o efeito das seichas que é uma oscilação de curto período (de 5 a 30 minutos), não relacionada com a maré e que ocorre em portos, baías ou golfos devido a mudanças súbitas das condições meteorológicas. Nos portos interiores, há também que ter em consideração, as variações do nível das águas como consequência, por exemplo, de cheias.

Os desvios entre a altura de maré observada e a altura de maré prevista ultrapassam geralmente os 0,1 m mas, raramente são superiores a 0,4 m. Estes têm um erro sistemático dado que as previsões são efectuadas com referência ao NMA, determinado há cerca de 70 anos, o qual está alguns centímetros abaixo do nível médio real.

As diferenças em tempo entre alturas de maré previstas e observadas são devidas, principalmente, à acção do vento. Os desvios em tempo deveriam apresentar uma média praticamente nula, sendo o desvio padrão maior ou menor consoante a maré é localmente mais ou menos afectada por condições meteorológicas de periodicidade difícil de determinar.

Para além destes factores, diversas causas de erro poderão afectar as previsões, nomeadamente: o mau funcionamento do mareógrafo devido ao entupimento do poço ou a falhas no mecanismo de relojoaria; erros na leitura dos maregramas (folha onde se encontra desenhada a curva de maré); desactualização das constantes harmónicas em virtude de assoreamentos ou obras portuárias; limitações impostas pelos algoritmos de análise, como por exemplo, as correcções nodais e os argumentos astronómicos serem considerados fixos na fase de ajustamento à série temporal já que, na realidade eles variam, ainda que pouco, ao longo de um ano.

De modo a se ter uma ideia da ordem de grandeza dos desvios entre observações e previsões observe-se a Fig. 6 que apresenta um histograma de frequências referente à diferença entre a maré observada e prevista para o porto de Leixões. Um vez subtraída a maré astronómica, este histograma reflecte maioritariamente os efeitos meteorológicos. O histograma apresenta uma assimetria positiva demonstrando que para valores extremos as sobrelevações são, em geral, mais fortes e mais frequentes que as sub-elevações. A diferença máxima registada foi de 1,03 m.

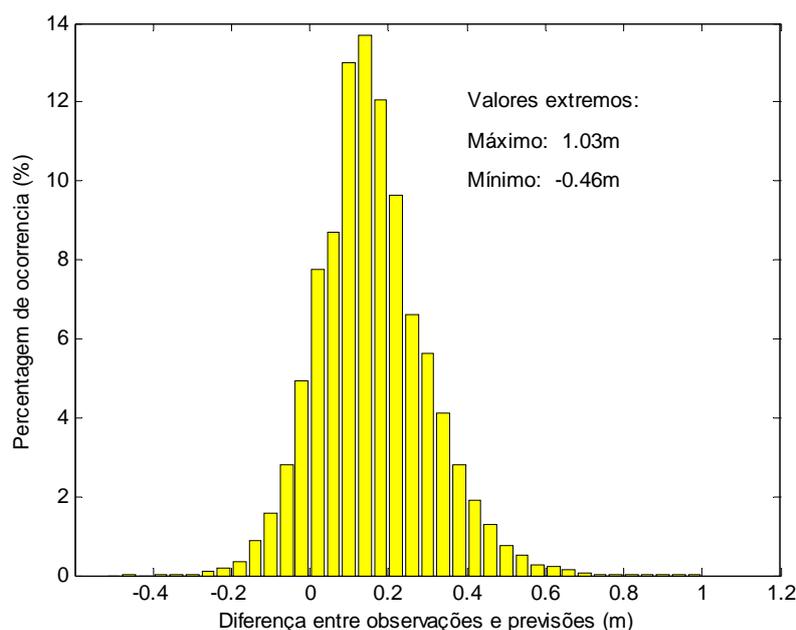


Fig.6. Histograma de frequências da diferença entre as alturas de água observadas e previstas, para o porto de Leixões, no período de 1956 a 2003. A curva apresenta uma distribuição do tipo normal ou gaussiana e assimetria positiva.

4. Análise dos níveis de água registados

Até agora foram referidos aspectos sumários da caracterização da maré de um porto, como sejam as constantes não harmónicas, os elementos de marés e as concordâncias mas que se tornam úteis quando se pretende determinar as características gerais de determinado local. No entanto, o conhecimento mais pormenorizado da maré de um porto, necessita de análises detalhadas das séries de dados disponíveis e a sua comparação com a previsão harmónica. Não pretendendo sair do âmbito deste artigo, serão descritos resumidamente os procedimentos relevantes, efectuados no IH, para o estudo da maré de um porto e, com particular interesse para a navegação e engenharia costeira e portuária. Os exemplos referidos foram aplicados ao caso do porto de Leixões. Nesta análise, usaram-se dados de AH, com algumas lacunas, pertencentes ao período de 1956 a 2003.

A frequência com que ocorrem alturas de água em determinada gama de valores ou a frequência com que ocorrem alturas de água acima de determinado valor é de especial interesse para o desenho de obras marítimas e portuárias, bem como, para determinar a cota de dragagem de determinados canais ou bacias de manobra. O histograma de frequências apresentado na Fig. 7, apresenta uma distribuição aproximadamente bi-modal que reflecte a variação das características aproximadamente sinusoidais da curva de maré. As duas modas representam as alturas de água mais frequentes. Analisando a figura e comparando-a com os elementos de marés de cartas náuticas determinados para Leixões (Tabela 4) verifica-se que as duas modas situam-se relativamente perto dos níveis médios de PM de águas mortas (2,69 m) e BM de águas mortas (1,31 m), sendo estes, portanto, os níveis mais frequentes. A influência da meteorologia espalha a distribuição observada para níveis extremos: a altura de água máxima observada, neste período, foi de 4,67 m e, a mínima, de 0,01 m. De notar que os valores horários encontram-se referidos ao ZH.

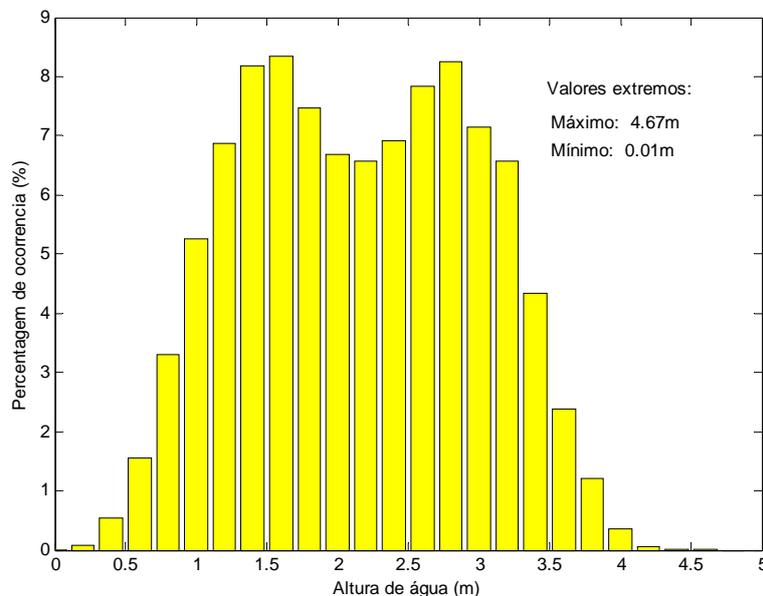


Fig. 7. Histograma de frequências de alturas de água observadas (valores horários) para Leixões. Note-se que as duas modas correspondem aproximadamente à PM e BM de águas mortas.



4^{as} Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária Angra do Heroísmo, 20 e 21 de Outubro de 2005

Este tipo de histogramas complementa a prática tradicional da análise da evolução temporal das séries de dados maregráficos. Para além da detecção de possíveis erros nos registos, a análise em tempo das observações através da comparação com previsões e determinação dos desvios a estas, permite avaliar a qualidade da previsão e, conseqüentemente, a qualidade das CH que lhe deram origem. Para complementar este tipo de análise e de forma a determinar a percentagem de alturas de água que ocorrem acima de um determinado nível, efectua-se gráficos de curvas cumulativas como o apresentado na Fig. 8. Dos resultados obtidos, verifica-se que 5% das AH registadas em Leixões, situam-se abaixo dos 0,88 m, encontrando-se a mediana nos 2,16 m e, apenas 5% das alturas de água se observaram acima dos 3,45 m.

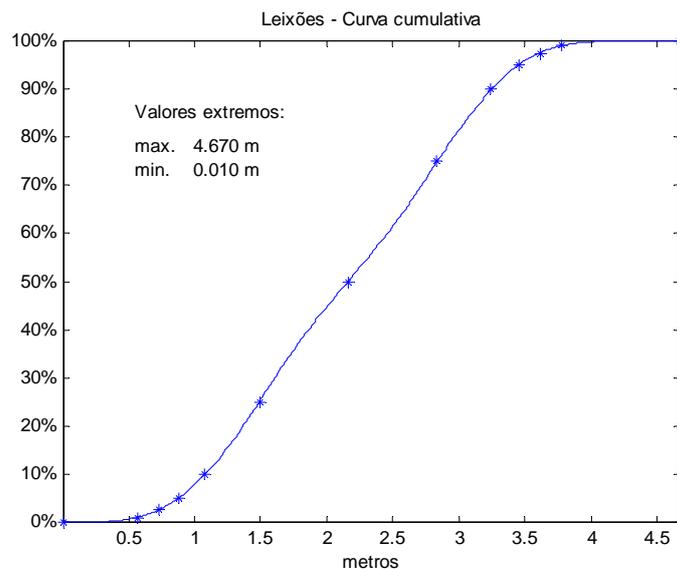


Fig. 8. Curva cumulativa das frequências de altura de água registadas (valores horários) para Leixões, durante o período de 1956 a 2003. Os valores assinalados correspondem às percentagens mais significativas: 0%, 1%, 2,5%, 5%, 10%, 25%, 50%, 75%, 90%, 95%, 97,5%, 99% e 100%

De forma a caracterizar a maré, é também, prática comum no IH, apresentar os níveis médios diários, mensais e anuais, assim como listas de valores extremos para esses níveis médios, por exemplo, o percentil 2,5%. Para o caso particular dos níveis médios diários, efectua-se um histograma de frequências como o apresentado na Fig.9, indicando-se os níveis máximos e mínimos registados. Para o porto de Leixões verifica-se que os níveis médios diários mais prováveis de ocorrerem situam-se entre os 2,1 e os 2,2 m.

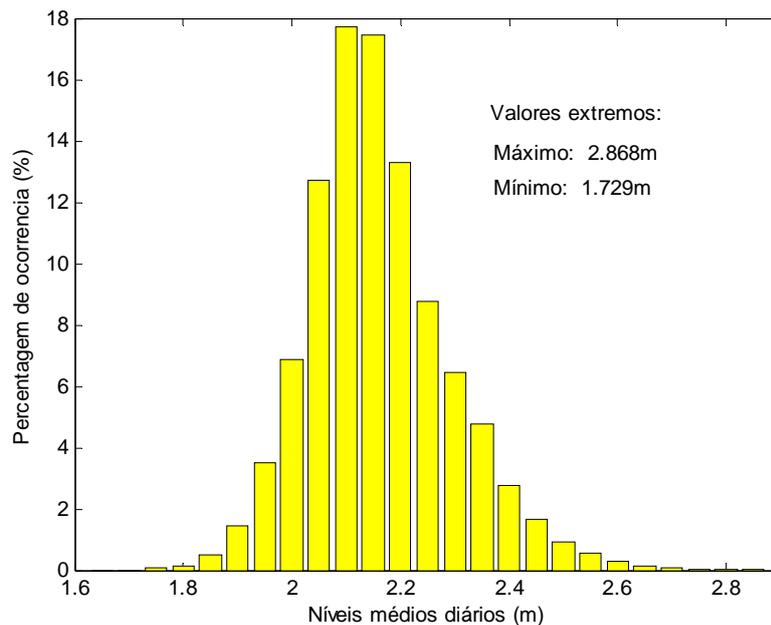


Fig.9. Histograma de frequências dos níveis médios diários de Leixões para o período analisado.

Este tipo de estudos é frequentemente solicitado ao IH pelos Departamentos de Engenharia e Obras Portuárias, como informação imprescindível para o planeamento de obras mais complexas, como a construção de portos e alargamento de aeroportos junto à costa, por exemplo, o caso das obras de alargamento do aeroporto do Funchal.

5. Conclusões

Todos os estudos com o intuito de analisar e prever a maré para um local particular devem ser baseados em medições maregráficas de boa qualidade, durante um longo período de tempo. Apesar de estarem associadas a um estudo analítico mais aprofundado, as constantes harmónicas – amplitude e fase – resultantes da análise harmónica da maré, constituem a base fundamental para a caracterização da maré de um porto. Porém, utilizando apenas as constantes harmónicas das principais constituintes da maré astronómica, é possível através de expressões matemáticas simples, determinar certos parâmetros que caracterizam satisfatoriamente a maré de um determinado local como, por exemplo, as constantes não harmónicas.

As constantes não harmónicas habitualmente utilizadas pelo Instituto Hidrográfico foram descritas e aplicadas a vários portos principais e secundários do território português, a portos pertencentes a Países Africanos de Língua Oficial Portuguesa e ao porto de Macau. Foram evidenciados, não só os aspectos comuns aos vários locais como, também, os casos excepcionais como, por exemplo, os de portos secundários situados em rias e estuários.

Entre outros resultados, verificou-se que todos os portos analisados têm maré semi-diurna regular, à excepção do porto de Macau, onde a maré é semi-diurna com fortes desigualdades diurnas. Através do cálculo da relação das forças atractivas, confirmou-se que no território português a influência da Lua na maré é cerca de 3 vezes superior à do Sol. Quanto à amplitude de maré, esta em geral não excede os 1,5 m no Continente, 1 m na Madeira e 0,7 m nos Açores. Constatou-se também, que a preia-mar em Portugal Continental ocorre aproximadamente 2 horas depois da passagem da Lua pelo meridiano do lugar e, cerca



4^{as} Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária Angra do Heroísmo, 20 e 21 de Outubro de 2005

de meia hora depois, nos arquipélagos da Madeira e dos Açores. Quanto às marés vivas, verificou-se que estas ocorrem, no Continente, cerca de 1 dia depois da Lua Nova e da Lua Cheia e com 18 a 22 horas de atraso, nas Ilhas.

Para um estudo mais aprofundado de modo a responder plenamente às necessidades da navegação e da engenharia costeira e portuária, torna-se necessário efectuar estudos pormenorizados baseados na análise detalhada de séries de dados maregráficos recolhidos no local pretendido. Além do que ficou referido anteriormente, é importante determinar as alturas de água mais frequentes e os níveis extremos registados, assim como, determinar e analisar os níveis médios diários, mensais e anuais de água nesse mesmo local. Convém ainda referir que este estudo só será criterioso se for tido em consideração que, aos efeitos da maré astronómica, são somados os efeitos provocados pela meteorologia: ventos fortes, variações da pressão atmosférica, seichas e variações do nível da água provocadas por cheias.

Referências

- DOODSON, A.T. & WARBURG, H.D., (1973) Admiralty - Manual of Tides, Hydrographic Department, *Admiralty*, London, U.K.
- CUSHMAN-ROISIN, B., (1994), Introduction to Geophysical Fluid Dynamics, *Prentice-Hall*, Upper Saddle River, New Jersey, U.S.A..
- EMERY, W.J. & THOMSON, R.E. (2001) Data Analysis Methods in Physical Oceanography, 2nd Edition, *Elsevier Science B.V.*, Amsterdam, Netherlands
- CARTWRIGHT, D. E., (2001), Tides - A Scientific History, *Cambridge University Press*, Cambridge
- GARRETT, C., (1972), Tidal resonance in the Bay of Fundy and Gulf of Maine, *Nature*, 238, 441 - 443.
- GARRETT, C., (1974), Normal resonance in the Bay of Fundy and Gulf of Maine, *Can. J. Earth Sci.*, 4, 549 - 556.
- INSTITUTO HIDROGRÁFICO, (1984), Apontamentos Sobre Marés e Correntes de Maré, Volumes I, II e III, *Divisão de Marés e Correntes de Maré*, Ministério da Defesa Nacional (Marinha), Lisboa, Portugal
- INSTITUTO HIDROGRÁFICO, (2003), *Símbolos e Abreviaturas das Cartas Náuticas Oficiais Portuguesas – Carta 10Z01 (INT1)*, 2^a Edição, Ministério da Defesa Nacional – Marinha – Lisboa, Portugal
- INSTITUTO HIDROGRÁFICO, (2003), *Relatório Técnico Final: Dados de Marés do Ano de 2002; Sines – Posto 3 (Thales)*, *Divisão de Oceanografia*, Ministério da Defesa Nacional (Marinha), Lisboa, Portugal
- INSTITUTO HIDROGRÁFICO, (2004), *Tabela de Marés 2005*, Volumes I e II, Lisboa, Portugal
- INTERGOVERNMENTAL OCEANOGRAPHIC COMMISSION, (1985), Manual on Sea Level Measurement and Interpretation, Volumes I,II,III, UNESCO
- LE ROY, R., (2002), Mesures Marégraphiques - Guide Technique du SHOM, Section Géodésie-Géophysique, Centre d'Hydrographie, *EPSHOM*, Brest
- NOAA Special Publication NOS CO-OPS 1, (2000), Tidal Datums and Their Applications, *U.S. Department of Commerce*, Maryland, U.S.A.
- NOAA Special Publication NOS CO-OPS 2, (2003), Computational Techniques for Tidal Datum Handbook, *U.S. Department of Commerce*, Maryland, U.S.A.
- NOAA, (2000), Tide and Current Glossary, *U.S. Department of Commerce*, Maryland, U.S.A



4^as Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária
Angra do Heroísmo, 20 e 21 de Outubro de 2005

SCHUREMAN, P., (1988), Manual of Harmonic Analysis and Prediction of Tides, *U.S. Government Printing Office*, U.S. Department of Commerce, Washington

SIMON, B., (1974), Calcul des Constantes Harmoniques de la Marée, *EPSHOM*