

See discussions, stats, and author profiles for this publication at: <http://www.researchgate.net/publication/230737166>

Análise das Marés Meteorológicas em Leixões

CONFERENCE PAPER · OCTOBER 2009

READS

76

4 AUTHORS, INCLUDING:



[Francisco Taveira-Pinto](#)

University of Porto

108 PUBLICATIONS 238 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)



[Fernando Veloso-Gomes](#)

University of Porto

99 PUBLICATIONS 215 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)



[Guilherme Moura Paredes](#)

University of Porto

12 PUBLICATIONS 18 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)



ANÁLISE DAS MARÉS METEOROLÓGICAS EM LEIXÕES

A. Almeida ⁽¹⁾, F. Taveira Pinto ⁽²⁾, F. Veloso Gomes ⁽³⁾, G. Paredes ⁽⁴⁾

⁽¹⁾ Mestre Eng^o Civil; ⁽²⁾ Professor Associado com Agregação, FEUP; ⁽³⁾ Professor Catedrático, FEUP; ⁽⁴⁾ Mestre Eng^o Civil, FEUP.

IHRH-FEUP

RESUMO

O efeito das marés meteorológicas no projecto de obras marítimas é muitas vezes subavaliado. Com este trabalho pretende-se, a partir dos registos do marégrafo do Porto de Leixões, quantificar a sua grandeza, utilizando uma aplicação de previsão de marés, de forma a obter valores dos níveis de água, que foram comparados com os valores reais registados no porto em estudo, para o período compreendido entre 2002 e 2006.

O valor máximo obtido para a uma maré meteorológica positiva foi de 1,103m, no dia 20 de Outubro de 2004 e para uma maré meteorológica negativa foi de -0,654m, no dia 2 de Julho de 2004. Deve ter-se em conta que na previsão das marés, o número de constantes harmónicas introduzidos na aplicação foi inferior ao número de constantes necessárias para modelar o fenómeno de forma precisa, resultando em algumas diferenças sistemáticas nos valores finais.

Os resultados obtidos foram afectados por alguns factores importantes, como, por exemplo, o facto de o marégrafo do Porto de Leixões se localizar no interior da zona portuária, numa massa de água confinada pelos quebramares e pelos cais. Os efeitos da maré meteorológica poderão, portanto, ser influenciados pela própria hidrodinâmica do porto. Como ao longo dos anos a envolvente de infra-estruturas do Porto de Leixões tem vindo a ser significativamente alterada, também os registos das marés meteorológicas locais poderão ter sofrido alterações.

PALAVRAS-CHAVE: Maré Meteorológica, Maré Astronómica, Previsão de Marés, Registo de Marés, Dados Meteorológicos.

1. INTRODUÇÃO

Nas zonas costeiras a acção da agitação marítima aparece sempre associada e em sobreposição aos diferentes níveis de marés. No caso da costa Portuguesa, as marés possuem amplitudes que podem atingir os 4.0 m, sendo a maré do tipo semi-diurna, ou seja, ao longo do dia existem duas baixa-mares e duas preia-mares.

As marés são devidas a várias componentes. A componente principal deve-se à interacção entre a Terra, o Sol e a Lua e é previsível recorrendo-se aos conhecimentos de astronomia. Outra componente importante é a maré meteorológica, fenómeno que ocorre com bastante frequência e é de particular importância, devido à sua influência sobre a navegação e processos de erosão costeira, por exemplo.

A maré meteorológica deve-se principalmente às variações de pressão atmosférica e aos efeitos locais do vento, causando assim níveis mais baixos, ou mais altos, do que os previstos, o que se reflecte nas diferenças entre a maré observada e aquela prevista pelas Tabelas de Marés.



6^{as} Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária Funchal, 8 e 9 de Outubro de 2009

Na elaboração das Tabelas de Marés, devido à dificuldade de previsão antecipada, a meteorologia no local não é tida em conta. As Tabelas de Marés podem indicar condições favoráveis, mas o estado meteorológico pode mudar e alterar significativamente as profundidades da água, inviabilizando trabalhos previstos, colocando em risco a segurança e a estabilidade de estruturas e pessoas, etc.

No caso particular da costa Oeste Portuguesa, em que é importante um correcto dimensionamento de estruturas (portos, quebramares, esporões, etc.) expostas à agitação e um correcto planeamento de zonas costeiras, sujeitas, por exemplo, ao fenómeno da erosão, é fundamental quantificar o valor da maré meteorológica. Esta chega a ser de algumas dezenas de centímetros, tendo-se mesmo registado valores de sobrelevação dos níveis de água do mar superiores a 1m em situações extremas. É o caso do marégrafo de Aveiro, onde, em Dezembro de 1991, foi registado um valor máximo de sobrelevação de 1,17m

2. O FENÓMENO DAS MARÉS

2.1. A IMPORTÂNCIA DAS MARÉS

O fenómeno das marés que pode ser observado pela subida e descida do nível da água do mar junto à costa, é de particular importância quando está em causa a segurança de populações, ou de actividades humanas relacionadas com o mar e a orla costeira.

A maioria das estruturas de defesa costeira é dimensionada de modo a proporcionar algum tipo de protecção às praias, ou às populações e infra-estruturas circundantes, como é o caso de estruturas portuárias. Este nível de protecção é geralmente baseado na selecção de uma tempestade de projecto que ocorre com uma determinada frequência, associada, em geral, a um nível de água máximo.

Esta selecção assume um determinado risco de falha na estrutura, ou consequências da ocorrência de galgamento, e encontra-se associada a um determinado período de retorno e, por vezes, a um dimensionamento optimizado da estrutura, em que intervêm os aspectos económicos relativos ao projecto. Portanto, no caso de portos ou outras estruturas costeiras a definição da tempestade de projecto irá permitir determinar e condicionar as cotas de coroamento, perfis das estruturas, métodos construtivos, entre outros aspectos. A acção da tempestade de projecto é feita com base num nível médio da água do mar de referência (preia-mar ou baixa-mar) que pode ser afectado pelo efeito meteorológico.

Outro exemplo da necessidade de se conhecerem com rigor os níveis de água, reside no facto de actualmente a costa Portuguesa se encontrar em acelerado processo de erosão e pequenas diferenças nesses níveis poderão originar problemas significativos ao longo da orla costeira. Entre esses problemas referem-se os possíveis danos nas estruturas de defesa costeira, devido à alteração da sua zona activa de interacção com a maré, isto é, a zona da estrutura que sofre os efeitos da maré e da agitação. Tal acontece quando uma tempestade na baixa-mar danifica a base da estrutura, provocando uma falha no suporte da sua parte superior, que, quando afectada por uma tempestade na preia-mar, pode conduzir ao colapso da mesma. Um outro problema é o recuo da linha de costa, que pode levar ao galgamento de zonas planas mais próximas do mar.

No caso da navegação há também necessidade de se conhecerem os diferentes níveis de água que podem ocorrer, uma vez que, quando se navega em águas restritas, o calado da embarcação é decisivo para a sua segurança. A definição de uma cota mínima, ou nível mínimo, em cada local (Zero Hidrográfico), cria um plano de referência para a definição das profundidades de água indicadas nas cartas de navegação. Em Portugal este valor encontra-se definido como o nível de água mais baixo associado às baixa-mares de águas-vivas conhecidas, e varia ao longo da costa. Apesar de se considerar, na definição deste valor, uma certa folga, devido ao que foi anteriormente dito, este valor pode também ser influenciado pelas marés meteorológicas.

2.3. MARÉS METEOROLÓGICAS

2.3.1. Introdução

De certa forma, as marés meteorológicas apresentam algumas características semelhantes às marés astronómicas. Apesar das marés meteorológicas não serem periódicas, como no caso das marés astronómicas, apresentam alguma periodicidade e, uma vez que as condições que provocam estas marés são de natureza atmosférica, não é de todo incorrecto designa-las de marés meteorológicas oceânicas.

É hoje reconhecido que as marés meteorológicas resultam da interacção ar-água, isto é, a atmosfera força as massas de água, que respondem gerando oscilações dos níveis de água com várias frequências e amplitudes. As previsões dos níveis de marés presentes nas Tabelas de Marés contemplam apenas as causas astronómicas. As diferenças entre esses valores e o efectivamente registado nos marégrafos são devidas principalmente às variações de pressão atmosférica e à acção do vento, como é o caso de ventos fortes com direcções distintas e de prolongada duração.

O fenómeno da maré meteorológica é observável principalmente em dias de tempestade, onde ocorrem amplitudes de maré meteorológica superiores ao normal. As tempestades são perturbações atmosféricas caracterizadas por baixas pressões e ventos fortes. A variação do nível do mar representa a resposta da água às tensões induzidas pelo vento na sua superfície e à pressão atmosférica. Este fenómeno pode provocar incrementos nos níveis de água a curto prazo e é acentuado quando as frentes de tempestade coincidem com a preia-mar num dado local.

As marés meteorológicas, tal como os maremotos e as marés astronómicas, são ondas longas, mas apresentam duas diferenças fundamentais: as marés astronómicas e os maremotos ocorrem a uma escala oceânica, mas as marés meteorológicas são um fenómeno costeiro; as marés meteorológicas podem ocorrer numa massa de água que ocupa um espaço limitado e fechado, como é o caso de lagos, canais ou rios, ao contrário dos maremotos e marés astronómicas.

As marés meteorológicas têm um período de cerca de três horas ($f=10^{-4}$ Hz), mas este pode variar consideravelmente com factores como topografia da terra que envolve a massa de água, sentido do movimento da tempestade e sua força, a estratificação da massa de água, a presença ou não de uma cobertura de gelo e a natureza do movimento das marés.

Para se compreender o fenómeno das marés meteorológicas é necessário perceber as variações das pressões atmosféricas em conjugação com o funcionamento geral dos ventos.

A condutividade térmica da terra é muito pequena quando comparada com a dos oceanos. Como consequência, a variação anual da temperatura é maior nos continentes do que nos oceanos. O contraste entre a condutividade térmica da terra e do mar cria centros de baixa e de alta pressão. Nas estações mais quentes do ano, a terra é aquecida mais rapidamente do que o mar, mantendo a água dos oceanos uma temperatura mais regular. Assim, desenvolvem-se centros de baixa pressão em terra e centros de alta pressão sobre os oceanos. Nas estações mais frias, os continentes arrefecem mais rapidamente do que os oceanos e os centros de alta pressão desenvolvem-se sobre os continentes, figura 2.1.

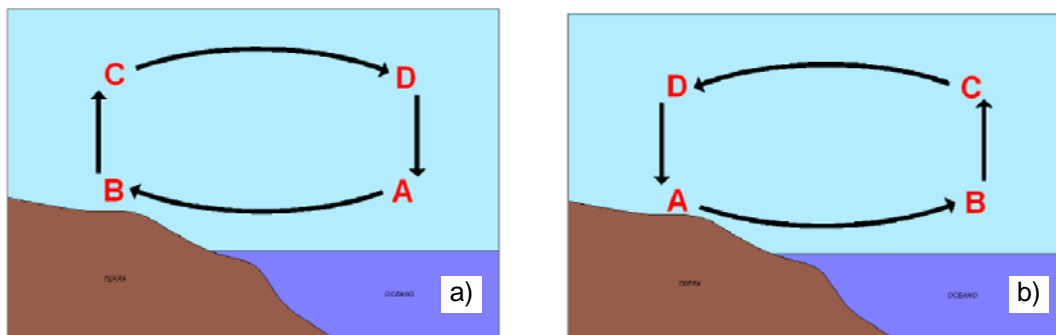


Fig. 2.1 Brisa marítima e terrestre



6^{as} Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária Funchal, 8 e 9 de Outubro de 2009

Durante as primeiras horas da manhã a temperatura sobre a terra é igual à temperatura sobre o mar, logo a pressão atmosférica em A é igual à pressão em B. Com o aumento da temperatura durante o dia, a terra vai ficando mais quente, fazendo com que o ar se dilate e ascenda, diminuindo a pressão em B. À medida que o ar sobe em direcção a C arrefece e contrai-se, o que se traduz num aumento de pressão em C. O ar movimenta-se então na direcção do mar onde a pressão é inferior, ponto D. Neste ponto o ar frio desce, aumentando a pressão no ponto A, criando assim uma alta pressão. À superfície o ar desloca-se de A para B, ou seja, no sentido da menor pressão atmosférica. O ar desloca-se assim do mar para terra, dando origem à brisa marítima, Figura 2.1 a). Durante a noite o fenómeno inverte-se, soprando a brisa de terra para o mar, a brisa terrestre, Figura 2.1 b).

As grandes cadeias montanhosas podem modificar consideravelmente a distribuição destes centros de altas e baixas pressões, pois funcionam como um obstáculo à passagem de calor.

2.3.2. Influência das pressões atmosféricas

A pressão do ar é o factor que mais contribui para o valor da maré meteorológica. Quando a pressão é inferior à atmosférica, o nível do mar aumenta uma vez que existe menos pressão sobre a sua superfície. Quando a pressão ultrapassa esse valor, o nível do mar diminui, atingindo valores mais baixos do que o previsto nas Tabelas.

As altas pressões estão geralmente associadas a tempo limpo e as baixas pressões a tempestades. Estima-se que uma variação de pressão de 10 mbar produza uma variação do nível do mar de cerca de 9 cm (MacCully, J., 2006), ou seja, a taxa de variação do nível do mar é cerca de 1 cm por cada 1 mbar de variação da pressão atmosférica. Tenha-se em atenção, no entanto, que os locais onde são realizadas as medições dos níveis de água do mar (marégrafos) são diferentes daqueles onde são registadas as pressões atmosféricas, pelo que esta relação não é linear.

Para se determinarem os efeitos das marés meteorológicas é necessário conhecer a distribuição temporal e espacial da pressão, utilizando-se, para tal, cartas sinópticas, onde estão representadas linhas isobáricas, linhas que unem pontos de igual pressão atmosférica. Se não existissem mais forças a actuar sobre as massas de ar, a direcção do vento seria perpendicular a estas linhas, mas, na realidade, tal não acontece.

2.3.3. Efeito do vento

O vento também tem influência no nível da água. Tal acontece porque os ventos que vêm do mar empurram a água para terra, resultando numa elevação do nível do mar junto à costa, enquanto que ventos que vêm de terra empurram a água para o mar, gerando o efeito contrário.

Quando a água é empurrada para zonas confinadas e pouco profundas, não pode fugir e voltar para o oceano, elevando-se. O contrário acontece quando a água é expulsa destas zonas, isto é, não pode ser imediatamente substituída e mantém-se baixa. Quanto menos profundo for o local do oceano e quanto mais cercada por terra se encontrar a massa de água, maior será a influência do vento na altura de água.

A amplitude da maré meteorológica depende da direcção do vento. Para que ocorram extremos de maré meteorológica, a sua direcção deve ser paralela à costa, pois só assim o fenómeno terá uma intensidade máxima.

A duração do vento é também decisiva uma vez que as amplitudes da maré meteorológica são proporcionais ao tempo durante o qual o vento actua, tornando-se maior a transferência de momento do ar para a água, para ventos fortes e de longa duração. Mas o mais importante é a quantidade de tempo que o vento esteve a actuar na mesma direcção. Ventos relativamente calmos que actuem durante 24 horas podem ter maiores efeitos na altura de água do que ventos mais fortes que actuem por apenas 6 horas.

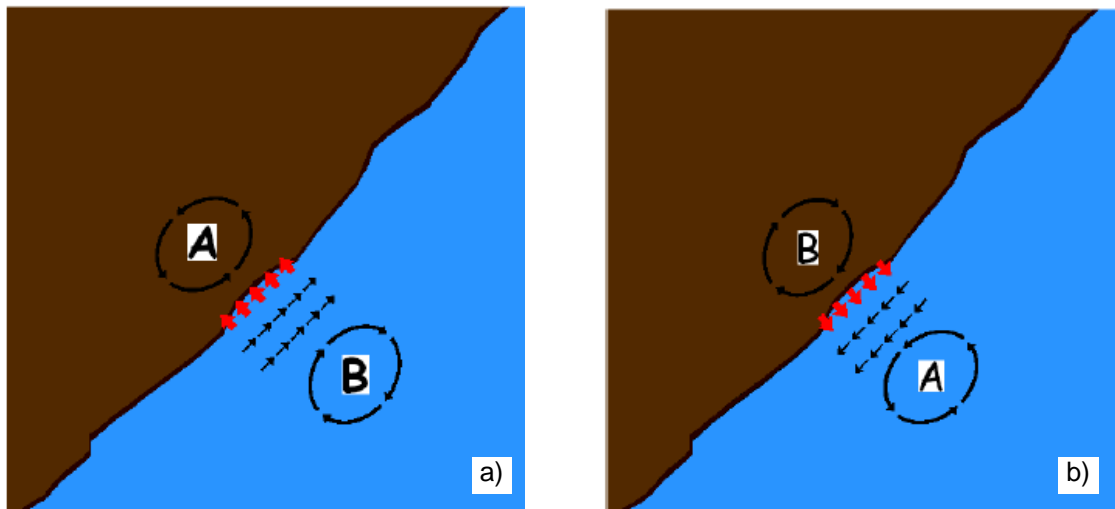


Fig. 2.2 - Formação de vento de superfície paralelo à costa (maré meteorológica positiva e negativa)

A figura 2.2 mostra um caso idealizado para o Hemisfério Sul, no qual os centros de alta e baixa pressão estão dispostos de forma adequada para produzir um vento de superfície paralelo à costa (setas pretas).

Quando o vento actua com intensidade e duração suficientes para criar a acumulação de água junto à costa, devido ao transporte de água à esquerda do vento (setas vermelhas), serão observados valores de maré mais elevados do que os previstos nas Tabelas de Marés. Está-se perante uma maré meteorológica positiva, figura 2.2 a)..

Quando os centros de alta e baixa pressão se invertem em relação ao esquema anterior, ou seja, a baixa pressão sobre o continente e a alta pressão sobre o oceano, figura 2.2 b), o transporte de água será realizado para o mar aberto, provocando níveis de água mais baixos do que os previstos nas Tabelas, maré meteorológica negativa.

Outro factor importante é a força fictícia de Coriolis, que existe devido ao movimento de rotação da Terra. Este efeito faz com que, no Hemisfério Norte, objectos em movimento aparentem deflectir para a direita e no Hemisfério Sul para a esquerda, sendo nulo no Equador e máximo nos Pólos.

A força de Coriolis é responsável pelo movimento circular dos ventos atmosféricos em torno dos centros de alta e baixa pressão barométrica. Quando, num determinado local, a pressão atmosférica aumenta, o ar movimenta-se para uma localização próxima de pressão inferior (o contrário acontece quando a pressão diminui, causando a atracção de massas de ar em seu redor). Se estes ventos continuassem numa linha recta, as diferenças de pressão anular-se-iam rapidamente e os centros de alta e baixa pressão nunca se formariam.

Contudo, quando uma massa de ar começa a mover-se, é afectada pela força de Coriolis, que impede que consiga atingir os destinos de pressões mais baixas gerando padrões circulares temporários à volta de centros de alta e baixa pressão.

Devido à força de Coriolis, no Hemisfério Norte o vento sopra no sentido horário e ligeiramente para fora do centro à volta dos sistemas de alta pressão, e no sentido anti-horário e ligeiramente na direcção do centro, à volta dos centros de baixa pressão.

Assim, um vento a soprar ao longo da costa, causa transporte de água no sentido perpendicular ao vento, Figura 2.2 a) e b). A corrente gerada pelo vento não é colinear com este, mas sim ligeiramente desviada para a direita no Hemisfério Norte e para a esquerda no Hemisfério Sul.

Em Portugal, as diferenças entre os níveis de maré previstos e os níveis de água registados ultrapassam, geralmente, os 10 cm, devido, entre outros factores, à conjugação de efeitos meteorológicos e à diferença entre o nível médio do mar real e o nível médio adoptado na



6^{as} Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária Funchal, 8 e 9 de Outubro de 2009

previsão. Estima-se que o nível médio da água do mar tem subido a uma taxa média de 1 a 2 mm/ano nos últimos cem anos. Este facto justifica parcialmente a diferença entre os níveis obtidos, uma vez que o Zero Hidrográfico foi determinado há várias décadas.

Um exemplo de uma tempestade associada a uma maré meteorológica foi a ocorrida nos dias 16 e 17 de Janeiro de 1973, com um nível de sobrelevação de 53 cm, que causou danos consideráveis no Porto de Leixões. O efeito da maré meteorológica foi intensificado por ocorrer ao mesmo tempo que uma maré viva. O sistema de baixa pressão passou por Leixões e a sua excepcional longa duração (24 horas) gerou níveis de maré também excepcionalmente elevados, associados a alturas de onda bastante grandes.

3. PREVISÃO DE MARÉS

3.1. INTRODUÇÃO

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 actualmente através de expressões que relacionam as constantes harmónicas para o porto em questão.

O Instituto Hidrográfico utiliza habitualmente uma série de constantes não harmónicas para definir a maré para cada porto, nomeadamente o tipo de maré, a relação das forças atractivas, a unidade de altura, o estabelecimento médio e o estabelecimento do porto e também a idade de maré.

Para que tal seja possível, é necessário antes definir as constantes harmónicas que influenciam a maré, isto é, realizar uma análise harmónica. Este método baseia-se na definição, para cada local, da amplitude e da fase de cada constituinte de maré. Os seus valores não são dedutíveis teoricamente, tendo que ser determinados a partir de uma série temporal de observações, com um recurso à análise de Fourier.

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 afectados por fenómenos como a erosão, assoreamentos e obras portuárias, pelo que se aconselha uma renovação periódica, sempre que possível, das constantes harmónicas nos diversos portos.

3.2. CARACTERIZAÇÃO GLOBAL DA MARÉ

Na definição de uma maré astronómica intervêm diversos factores, com importância variável. É importante conhece-los por duas razões: é mais fácil perceber, na execução de uma previsão de maré, quais as constituintes que são mais importantes e, sabendo a importância de cada uma, pode limitar-se o cálculo a apenas algumas delas, reduzindo-se o esforço de cálculo. O quadro 3.1. descreve e quantifica cada um dos diferentes componentes da maré astronómica.

Quadro 3.1. – Principais constituintes da maré astronómica.

Nome	Velocidad e (°/h)	Descrição
Onda principal lunar semidiurna (M2)	28,984	Maré gerada por uma Lua fictícia, com movimento uniforme e orbita circular, situada no plano do Equador (Lua média).
Onda principal solar semidiurna (S2)	30,000	Maré gerada por um Sol fictício com movimento uniforme e órbita circular situada no plano do Equador (Sol médio).
Onda elíptica lunar maior (N2)	28,440	Resulta da elipticidade da órbita lunar.
Onda semi-diurna declinacional luni-solar (K2)	30,082	Representa as variações em declinação da Lua e do Sol.
Onda diurna declinacional luni-solar (K1)	15,041	Representa as variações em declinação da Lua e do Sol. Também designada por sideral diurna.
Onda diurna declinacional lunar (O1)	13,943	Traduz as variações da declinação da Lua.
Onda diurna declinacional solar (P1)	14,959	Traduz as variações da declinação do Sol.



6^{as} Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária Funchal, 8 e 9 de Outubro de 2009

Para o cálculo das constantes não harmónicas é necessário proceder, previamente, ao cálculo das constantes harmónicas, realizando uma análise harmónica.

A análise harmónica permite a determinação das constantes harmónicas das principais componentes da maré astronómica. Estas constantes definem as condições de maré para cada local de observação.

A base da análise harmónica é a consideração de que as variações da maré podem ser representadas por um número finito, N , de componentes harmónicas. De acordo com o critério de *Nyquist* um intervalo de uma hora entre registos de amostragem é suficiente, uma vez que a frequência máxima registada no estudo da maré é a oitavodiurna. Este intervalo de amostragem vai dar origem às chamadas alturas horárias (AH).

As AH que se utilizam na análise harmónica devem apenas prever as alterações nos níveis de água provocados por efeitos astronómicos. Assim sendo, têm que ser filtrados outros efeitos, como, por exemplo, a agitação.

O método de análise harmónica que se utiliza actualmente em Portugal foi desenvolvido no *Service Hydrographique et Océanographique de la Marine*. Primeiro realiza-se uma filtragem inicial das AH, transformando-as em alturas reduzidas ao meio-dia, de forma a serem diminuídos os resíduos entre o resultado da análise harmónica e as alturas da maré real. Seguidamente, para cada conjunto de 24 alturas reduzidas (uma por hora durante 24 horas), são calculados os coeficientes de *Fourier* para cada dia que correspondem às principais sete constituintes da maré.

Este processo permite isolar melhor as bandas de frequência correspondentes às diferentes ondas constituintes da maré. O valor das constantes harmónicas é aquele que minimiza a soma dos quadrados dos resíduos (diferenças entre as alturas de água observadas e previstas pelo somatório das ondas possíveis), isto é, através do método dos mínimos quadrados (Reis, J., 2005).

Para cada constituinte a amplitude e a fase são obtidas por análise harmónica, enquanto que os restantes parâmetros podem ser determinados por consulta de bibliografia adequada. O nível médio adoptado no caso em estudo foi de +2,00m, valor de referência para o porto de Leixões.

O primeiro passo de cálculo é a determinação da amplitude e da fase de onda. No caso do Porto de Leixões estes valores já se encontram definidos para as principais constituintes da maré astronómica, quadro 3.2.

Quadro 3.2. – Constantes harmónicas das principais constituintes da maré astronómica para o porto de Leixões (Publicação “*Caracterização da Maré do Porto de Leixões*”, 2005).

Constituinte da maré astronómica	Amplitude, H (m)	Fase de Onda, ($^{\circ}$)
M2	1,054	74,2
S2	0,365	102,5
K2	0,104	100,3
K1	0,070	59,3
O1	0,060	318,0

Existem diversas componentes harmónicas para marés astronómicas, mas, neste exemplo, para o porto de Leixões, só foram consideradas as cinco mais importantes. Nas previsões efectuadas foi considerado um maior número de constituintes astronómicas, aumentando, assim, a precisão dos resultados. O passo seguinte é o cálculo da velocidade angular, argumento inicial, argumento de correcção e factor nodal, cujo cálculo não é aqui detalhado.



6^{as} Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária Funchal, 8 e 9 de Outubro de 2009

3.3. APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS DAS PREVISÕES

3.3.1. Modelo de Previsão

Para a previsão das marés astronómicas foi utilizada a aplicação TTIde, de livre utilização, com resultados bastante fiáveis, elaborado pelo Professor *M.G.G. Foreman* do Instituto de Ciências Oceânicas na Austrália.

Esta aplicação gera previsões dos níveis de maré num dado local para um período de tempo específico. As amplitudes e as fases relativas ao Tempo Médio de *Greenwich* dos constituintes astronómicos de maré que são usados na previsão têm que ser introduzidos no cálculo.

Antes de ser efectuada qualquer previsão dos níveis de água, foram feitos alguns testes de forma a verificar a qualidade dos resultados.

O primeiro teste consistiu na realização de previsões com a aplicação e posterior comparação com os valores previstos pelo Instituto Hidrográfico nas Tabelas de Marés.

O segundo teste consistiu na previsão dos níveis de água para a costa galega, em que foram utilizadas as constantes harmónicas das principais constituintes da maré astronómica para esse local, sendo os resultados comparados com o caso do Porto de Leixões.

O terceiro teste foi realizado com um exemplo da própria aplicação para o Porto de Victoria (Canadá). Este teste tinha como objectivo perceber a importância das diferentes constantes harmónicas e as diferenças que existem nos resultados quando se omitem algumas variáveis dos cálculos.

3.3.2. Verificação da qualidade dos resultados - Comparação dos Valores Previstos com os Valores da Tabela de Marés

Os valores inicialmente previstos com a aplicação, foram obtidos considerando apenas cinco constantes harmónicas, nomeadamente, M2, S2, K2, K1 e O1, quadro 3.1. A figura 3.1. mostra a comparação entre os resultados obtidos e os valores presentes na Tabela de Marés, para o porto de Leixões, para o mês de Janeiro do ano de 2007.

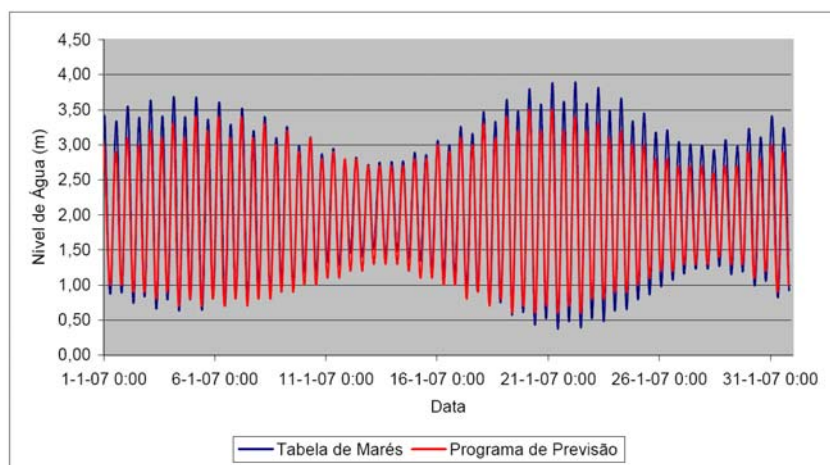


Fig. 3.1 - Comparação dos valores previstos na aplicação para o porto de Leixões com os da Tabela de Marés (cinco constantes).

Como se pode verificar existem algumas diferenças tanto nos níveis de água, como nos instantes a que ocorrem as marés extremas. A maior diferença registada foi de cerca de 50 cm. Este deve-se à utilização de apenas cinco constantes harmónicas. Utilizando um maior número de constantes harmónicas, verifica-se que as diferenças observadas na figura 04 diminuem significativamente, ou mesmo se anulam, como se mostra na figura 05.

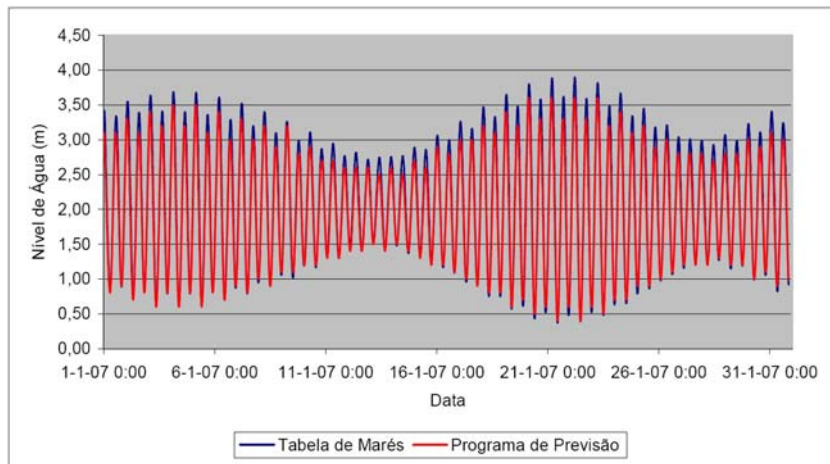


Fig. 3.2 - Comparação dos valores previstos na aplicação para o porto de Leixões com os da Tabela de Marés (treze constantes).

4. REGISTO DE MARÉS

A previsão de marés realizada no ponto anterior apenas contempla os fenómenos astronómicos. O registo de dados num determinado mareógrafo engloba todos os fenómenos que podem provocar alterações no nível de água do mar. São estes valores que vão ser comparados com os valores obtidos nas previsões, de forma a determinar a grandeza das marés meteorológicas para o porto em estudo.

No presente trabalho foram utilizados os registos obtidos no porto de Leixões. A Estação Maregráfica do porto de Leixões situa-se no cais junto ao Terminal de Contentores Norte e está equipada com um mareógrafo de flutuador e contra-peso com registo analógico (maregramas) e um mareógrafo de registo digital do sistema *Thales*, que se encontra em funcionamento desde Julho de 2004, ambos da marca A. OTT.

Foram utilizados os dados de maré cedidos pelo Instituto Hidrográfico, obtidos a partir dos registos realizados na estação maregráfica de Leixões para os anos de 2002 a 2006. Os dados encontram-se no fuso horário 0 (TU).

5. QUANTIFICAÇÃO DAS MARÉS METEOROLÓGICAS

5.1. INTRODUÇÃO

A diferença entre os dados obtidos e calculados permitiu quantificar as marés meteorológicas para o porto de Leixões.

Serão também apresentadas cartas sinópticas com as quais se pretende perceber as movimentações dos centros de alta e baixa pressão e o efeito que isso provoca nos níveis de água junto à costa.

Os dados meteorológicos recebidos do Instituto de Meteorologia para o Porto (Pedras Rubras) são valores horários de vento e pressão atmosférica de Janeiro de 2002 a Dezembro de 2006. A pressão atmosférica é a média ao nível da estação na hora (mbar) e a intensidade instantânea do vento (m/s) é máxima horária. Os valores de pressão atmosférica encontram-se representados em cartas sinópticas.

5.2. APRESENTAÇÃO E INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS

Apesar de não ser possível realizar a comparação dos valores para todos os anos, foi feita uma apresentação de resultados recorrendo a gráficos e, nos casos em que foi detectada uma grande diferença entre o previsto e o registado, tentou justificar-se recorrendo-se a dados meteorológicos e a utilização cartas sinópticas no período em estudo.

Devido à elevada quantidade de dados existentes, só serão apresentados alguns exemplos, figuras 06 a 10

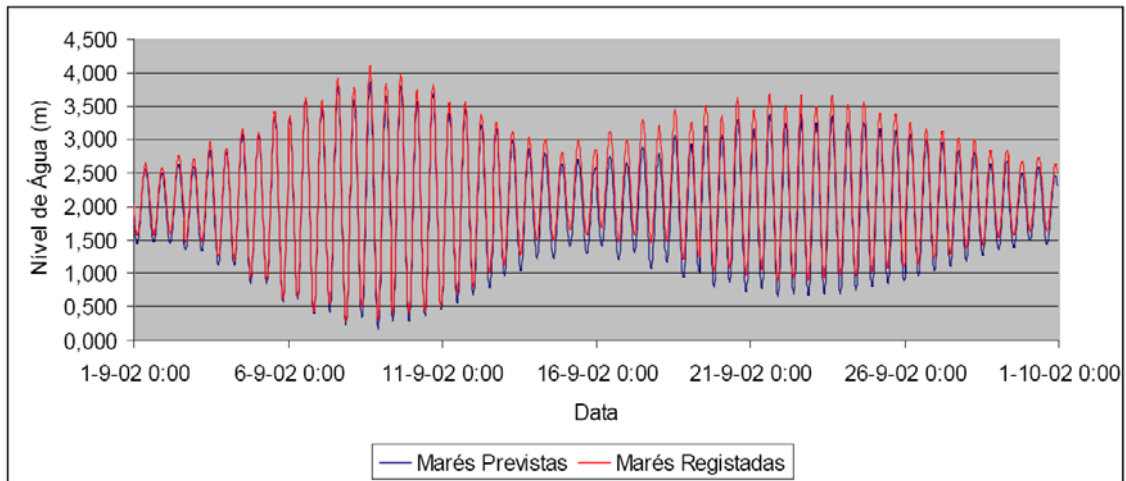


Fig. 5.1. – Comparação entre os níveis de água previstos pela aplicação de previsão e os registados no Marégrafo de Leixões para o mês de Setembro de 2002.

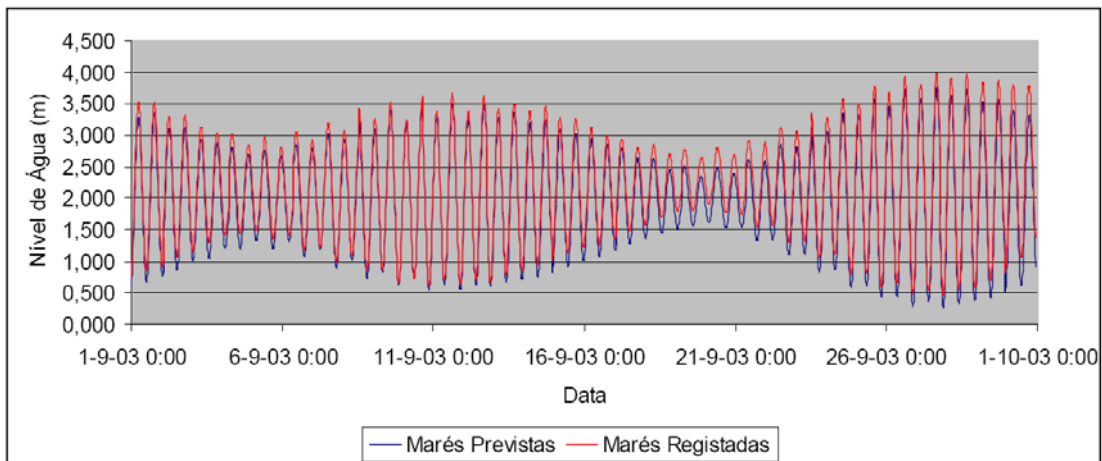


Fig. 5.2 – Comparação entre os níveis de água previstos pela aplicação de previsão e os registados no Marégrafo de Leixões para o mês de Setembro de 2003.



6^{as} Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária
Funchal, 8 e 9 de Outubro de 2009

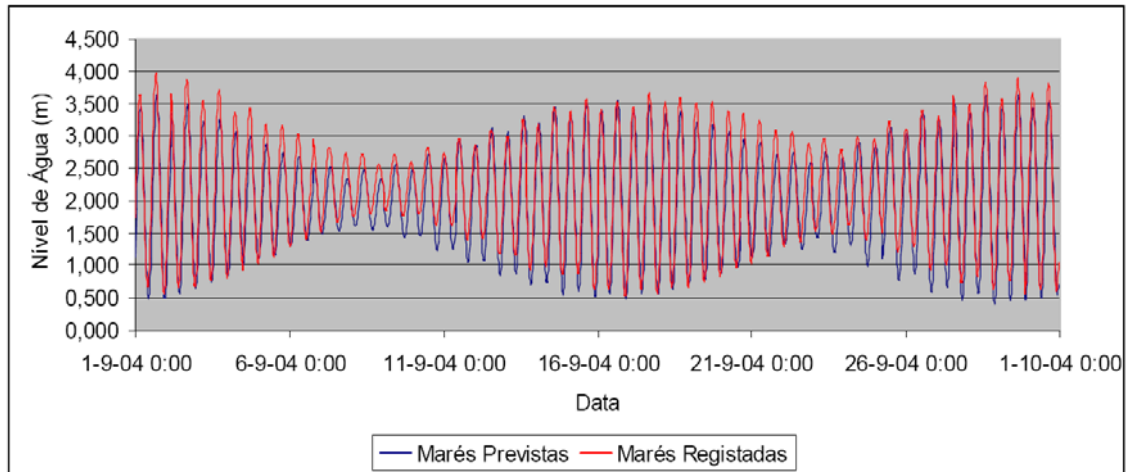


Fig. 5.3 – Comparação entre os níveis de água previstos pela aplicação de previsão e os registados no Marégrafo de Leixões para o mês de Setembro de 2004.

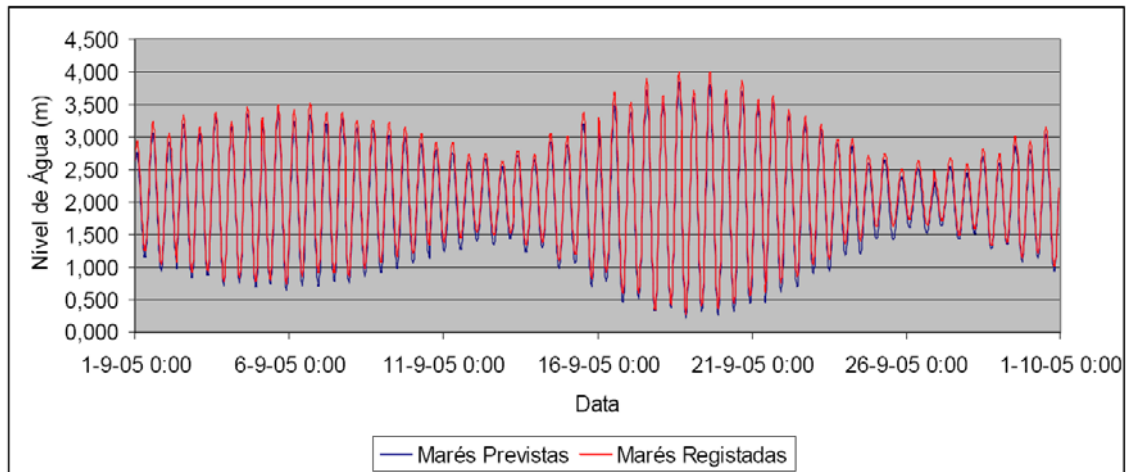


Fig. 5.4 – Comparação entre os níveis de água previstos pela aplicação de previsão e os registados no Marégrafo de Leixões para o mês de Setembro de 2005.

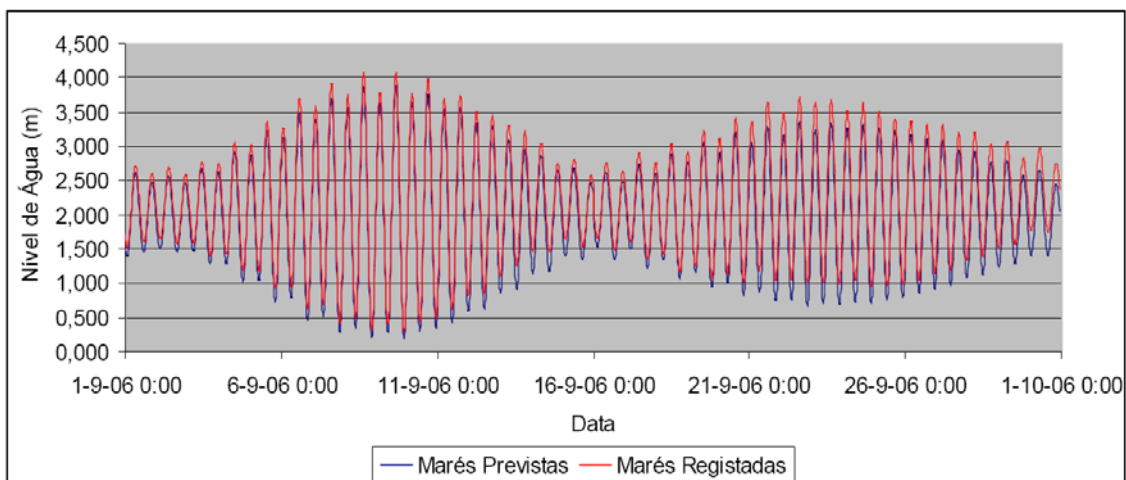


Fig. 5.5 – Comparação entre os níveis de água previstos pela aplicação de previsão e os registados no Marégrafo de Leixões para o mês de Setembro de 2006.

5.3. ANÁLISE DE RESULTADOS

A comparação das previsões de marés com o registo dos níveis de água, para certos meses do ano, foi realizada quantitativamente. Devido à elevada quantidade de dados, os resultados apenas serão apresentados para alguns casos mais significativos.

Existe quase sempre uma discrepância entre os valores de maré meteorológica negativa e positiva. As marés meteorológicas positivas são mais acentuadas e frequentes do que as marés meteorológicas negativas. São, além disso, sazonais: marés meteorológicas positivas nos meses mais frios (Outono e Inverno) e marés meteorológicas negativas nos meses mais quentes (Primavera e Verão).

No dia 19 de Outubro de 2004 verificou-se uma maré meteorológica positiva, quadro 06.

Quadro 5.1 – Dados meteorológicos para o dia 19 de Outubro de 2004.

Data	Diferença entre valores registados e previstos	Pressão Atmosférica Média	Rumo do vento máximo	Intensidade instantânea máxima do vento	Rumo do vento nos últimos dez minutos	Intensidade do vento nos últimos dez minutos
	(m)	(mbar)	(°)	(m/s)	(°)	(km/h)
19-10-2004 0:00	0,240	992,3	191	15,6	180	36
19-10-2004 3:00	0,756	993,6	186	16,2	190	28
19-10-2004 6:00	0,373	997,3	208	4,7	190	10
19-10-2004 9:00	-0,209	997,2	158	6,9	150	14
19-10-2004 12:00	0,192	994,5	141	9,3	150	18
19-10-2004 15:00	0,882	990,9	197	19,5	190	43
19-10-2004 18:00	0,726	991,8	180	16,1	190	28
19-10-2004 21:00	0,109	993,4	191	14,5	190	25

Os valores das pressões atmosféricas indicados no quadro 06, indicam a passagem de baixas pressões pelo local, figuras 011 e 12.

O vento é proveniente de Nordeste-Sudeste (entre os 135° e os 225°) e a sua velocidade aumenta de manhã para a tarde, diminuindo depois até ao fim da tarde. Sendo assim, uma das razões para esta maré meteorológica positiva tão elevada, está no sentido do vento, que empurra a água em direcção à linha de costa, produzindo uma elevação da sua superfície. Adicionando ao efeito do vento o efeito da pressão atmosférica, obtém-se este valor extremo de maré meteorológica, cerca das 16:00 horas.

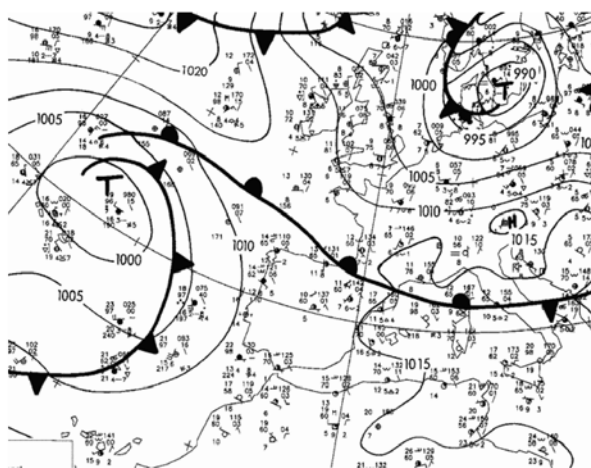


Fig. 5.6 - Mapa meteorológico para o dia 18 de Outubro de 2004 às 0:00 horas (www.wetter.de).

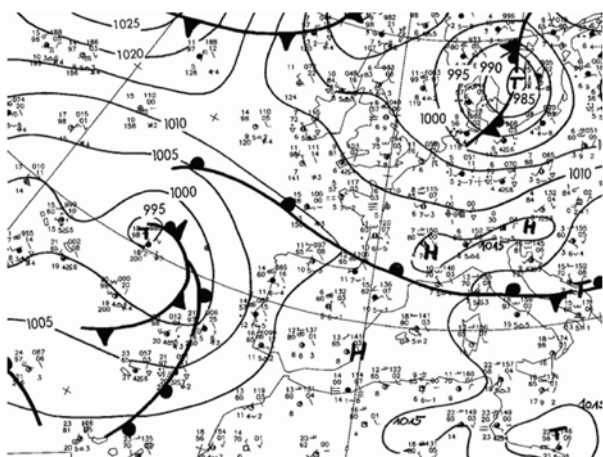


Fig. 5.7 - Mapa meteorológico para o dia 18 de Outubro de 2004 às 6:00 horas (www.wetter.de).

Através da análise das figuras 011 e 12 é possível observar que o centro de baixas pressões (T) se movimenta no sentido da Costa Portuguesa.

Forma-se próximo dos Açores, em que é delimitado pela isobárica dos 1000 mbar, figura 011, desenvolvendo-se nas horas seguintes no mesmo local, com pressões sucessivamente menores. Por volta das 6:00 horas do dia 18, encontra-se com pressões inferiores a 995 mbar, figura 12.

À medida que o centro de baixas pressões se aproxima da Costa Portuguesa, a pressão continua a diminuir, sendo inferior a 990 mbar cerca das 12:00 horas do dia 19. O valor de pressão atmosférica mais baixo registado em terra (Estação Meteorológica de Pedras Rubras) é de 990,9 mbar, quadro 06., ocorre cerca das 15:00 horas do dia 19, uma hora antes do maior valor de maré meteorológica positiva. A razão da pressão atmosférica ser diferente no centro de pressões e na costa, tem a ver com o facto do centro de baixas pressões não atingir directamente a Costa Portuguesa. Passando ao largo em direcção à Grã-Brethena.

À medida que o centro de baixas pressões se afasta da Costa Portuguesa, aumentando, desta forma, a pressão atmosférica, os valores da maré meteorológica voltam a diminuir, quadro 06.

Um segundo caso extremo apresentado mostra a passagem de um centro de altas pressões, responsável por uma maré meteorológica negativa, por Portugal, no dia 22 de Março de 2004. O quadro 07 apresenta os dados meteorológicos para este dia.

Quadro 5.2 – Dados meteorológicos para o dia 22 de Março de 2004.

Data	Diferença entre valores registados e previstos	Pressão Atmosférica Média	Rumo do vento máximo	Intensidade instantânea máxima do vento	Rumo do vento nos últimos dez minutos	Intensidade do vento nos últimos dez minutos
	(m)	(mbar)	(°)	(m/s)	(°)	(km/h)
22-03-2004 0:00	-0,084	1023	354	6,2	10	14
22-03-2004 3:00	-0,076	1022,2	11	4,4	20	10
22-03-2004 6:00	-0,163	1022,8	11	6,8	10	14
22-03-2004 9:00	-0,163	1023,5	11	7,4	10	18
22-03-2004 12:00	-0,072	1024,2	326	12,3	350	28
22-03-2004 15:00	-0,108	1022,3	321	15,8	320	36
22-03-2004 18:00	-0,167	1022,4	321	15,6	330	32
22-03-2004 21:00	-0,190	1023	338	6,3	10	10

O vento é proveniente de Sudoeste-Noroeste, com velocidades que atingem os 36 km/h, favorecendo a acumulação de água junto à costa, reduzindo, desta forma, o efeito da maré meteorológica negativa associada à pressão.

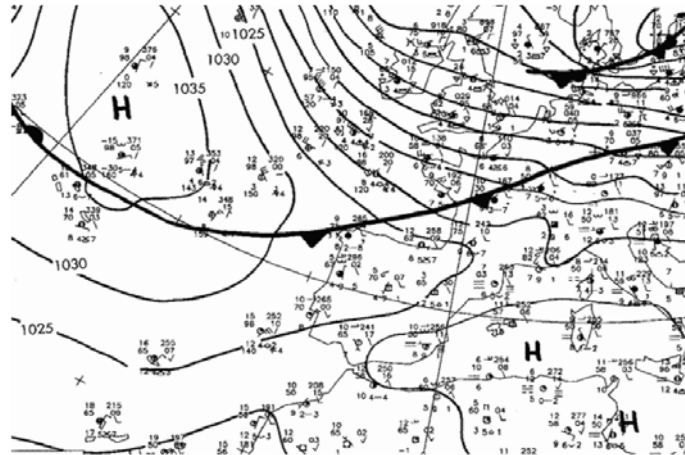


Fig. 5.8 – Mapa meteorológico para o dia 21 de Março de 2004 às 0:00 horas (www.wetter.de).

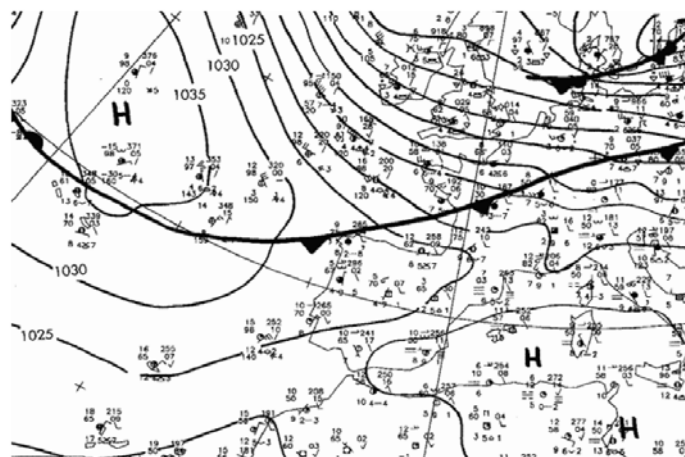


Fig. 5.9 – Mapa meteorológico para o dia 21 de Março de 2004 às 6:00 horas (www.wetter.de).

Neste período do ano, nos Açores, por acção do anticiclone do mesmo nome, desenvolve-se um centro de altas pressões (H), com uma pressão atmosférica superior a 1035 mbar. Ao mesmo tempo que isto acontece, alguns pontos da Costa Portuguesa são atingidos pela isobárica dos 1030 mbar, figura 13.

Com o passar das horas, o centro de altas pressões aumenta a sua área de influência. O valor da pressão atmosférica aumenta também, para um valor superior a 1040 mbar, figura 14.

O centro de pressão nunca chega a atingir a Costa Portuguesa, o que pode, de certo modo, explicar os valores poucos elevados referentes à maré meteorológica negativa. A costa é apenas afectada por pressões superiores ao valor médio e que variam entre os 1025 mbar e os 1035 mbar.

Do registo dos dados meteorológicos, quadro 07 verifica-se que a maior pressão atmosférica média registada, ocorre no dia 22 de Março cerca das 8:00 e é de 1024,7 mbar, correspondendo, assim, a um valor de maré meteorológica negativa de 0,247 m (máximo para este dia).



6^{as} Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária Funchal, 8 e 9 de Outubro de 2009

Posteriormente, o centro de altas pressões movimentou-se para Norte, alterando as pressões atmosféricas médias, ou seja, reduzindo-as. Desta forma, o valor absoluto da maré meteorológica diminuiu também.

5.4. VALORES EXTREMOS

Os valores extremos de maré meteorológica positiva e negativa foram ambos registados no ano de 2004.

A maré meteorológica positiva extrema foi registada no dia 19 de Outubro de 2004, com uma amplitude de 1,103 m (um dos exemplos estudados). A maré meteorológica negativa extrema foi registada no dia 2 de Julho de 2004, com uma amplitude de 0,654 m. O quadro 08 apresenta as datas e os valores de maré meteorológica mais relevantes ao longo dos anos em estudo, superiores a 0,8 m.

Quadro 5.3 – Marés meteorológicas mais relevantes.

Data	Valor Absoluto da Maré Meteorológica Durante o Dia (m)
27-12-2002	0,886
31-10-2003	0,828
31-10-2003	0,828
03-05-2004	0,863
05-05-2004	0,816
06-05-2004	0,894
07-05-2004	0,907
08-05-2004	0,863
10-05-2004	0,829
18-10-2004	0,812
19-10-2004	0,967
20-10-2004	1,103
21-10-2004	0,988
25-10-2004	0,919
28-10-2004	1,075
29-10-2004	0,942
30-10-2004	0,803
24-11-2006	0,824

6. CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho teve por objectivo quantificar de forma geral a componente de maré associada a efeitos meteorológicos e desenvolveu-se em duas fases distintas.

Na primeira fase foram realizadas previsões de maré para o porto de Leixões. Para o efeito, foi apresentada uma explicação da forma como são obtidos os valores dos níveis da água do mar, a forma de funcionamento da aplicação adoptada e, por fim, as previsões de marés propriamente ditas para o período compreendido entre 2002 e 2006.

Na segunda fase foram analisados diversos dados relativos aos níveis da maré e condições meteorológicas.

O valor máximo obtido para a uma maré meteorológica positiva foi de 1,103 m no dia 20 de Outubro de 2004 e o valor máximo obtido para a uma maré meteorológica negativa foi de -0,654m no dia 2 de Julho de 2004.

Contudo, deve ter-se em conta o facto de que no cálculo da previsão das marés, o número de constantes harmónicas introduzidas na aplicação (treze) ser inferior ao número de constantes necessárias para modelar o de forma exacta e inferior ao utilizado pelo Instituto Hidrográfico (da ordem das dezenas), resultando em algumas diferenças sistemáticas nos valores finais (valor máximo de cerca de 30 cm).



6^{as} Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária Funchal, 8 e 9 de Outubro de 2009

7. REFERÊNCIAS

MacCully, J. *Beyond the Moon – A Conversational Common Sense Guide to Understanding the Tides*. World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., 2006.

Reis, J. *Caracterização da Maré do Porto de Leixões*. Instituto Hidrográfico, Lisboa, 2005.