

## A subida do NMM e a necessidade de revisão dos referenciais verticais

C. Antunes (1)

(1) IDL – Instituto Dom Luiz, FCUL – Universidade de Lisboa. cmantunes@fc.ul.pt.

**Resumo:** O NMM é um referencial geodésico usado como *datum* vertical, determinado a partir de uma superfície média do oceano. Na Geodesia, o *datum* vertical é rigorosamente definido por uma superfície equipotencial de referência – geóide, ajustada a uma dada superfície média do mar e fixada numa dada época; ao passo que na Hidrografia o *datum* vertical é definido localmente através de um plano de referência – o Zero Hidrográfico (ZH), localizado a uma dada profundidade abaixo do NMM convencionado. A variação do NMM implica uma alteração directa dos sistemas geodésicos de referência associados e uma redefinição dos *data* verticais. Nesta comunicação discute-se as implicações da subida do NMM na revisão dos *data* verticais usados em Portugal, e a conseqüente revisão dos valores das atitudes ortométricas de toda a cartografia nacional, a revisão da linha de costa, dos limites do domínio público hídrico, da batimetria e conseqüente navegabilidade das zonas portuárias e estuarinas.

**Palavras-chave:** subida do NMM, *datum* vertical, zero hidrográfico, EVRS2007, geóide.

### 1. INTRODUÇÃO

O nível da superfície média dos oceanos, designado habitualmente por Nível Médio do Mar (NMM) sofre variações periódicas significativas ao longo dos tempos. É uma oscilação regida pelas variações de longo período (ordem dos milhares de anos), correspondentes aos ciclos glaciares que alteram o volume de massa oceânica, com amplitudes na ordem dos 120 a 140 metros e períodos de 120 a 200 mil anos.

Estes ciclos não são regulares nem simétricos, eles têm uma duração mais prolongada no período glacial, correspondente ao arrefecimento da Terra e conseqüente descida do nível do mar devido à acumulação de massa de gelo nas zonas polares, e uma duração mais curta nos períodos inter-glaciares, correspondente ao aquecimento da Terra e conseqüente subida do nível do mar devido ao degelo das massas polares e conseqüente redistribuição na massa oceânica.

O último ciclo glacial iniciou-se há cerca de 120 mil anos, com o nível do mar ligeiramente acima do nível actual, e terminou há cerca de 20 mil anos, com o nível do mar a 130 metros abaixo do NMM actual. Há 20 mil anos iniciou-se o actual período inter-glacial com uma conseqüente subida abrupta do nível do mar que terminou há 6-8 mil anos, estabilizando o NMM a 2-3 metros abaixo do nível actual. Desde então, o NMM tem vindo lentamente a subir a uma taxa média de 3-4 cm/século.

A superfície média dos oceanos em geral, e o NMM em particular, é naturalmente uma referência que desde as origens da Geodesia tem vindo a ser utilizado como referencial altimétrico. Qualquer variação significativa nesta superfície de referência implica uma actualização ou revisão dos referenciais verticais adoptados. Por outro lado, e embora de forma mais conceptual e teórica mas com implicações práticas, a dinâmica do campo gravítico da Terra causada pelos efeitos temporais (lineares e

periódicos) do fenómeno de maré terrestre implica a adopção de convenções específicas nos sistemas de referência vertical globais e regionais baseados em modelos geopotenciais globais (geóide) e em redes de nivelamento geodésico.

Nesta comunicação apresenta-se e discute-se o problema do território continental português, fazendo referência à provável adopção futura do sistema de referência vertical europeu EVRS2007 - *European Vertical Reference System 2007* (Ihde et al., 2008), por imposição da directiva INSPIRE.

### 2. SISTEMAS DE REFERÊNCIA E REFERENCIAIS VERTICAIS

Interessa considerar, neste contexto, o Datum Altimétrico de Cascais 1938, os Zeros Hidrográficos (ZH) nacionais, o modelo de geóide adoptado no território continental (GEODPT08) e o sistema de referência europeu EVRS.

#### 2.1. Datum Altimétrico de Cascais 1938

O sistema de altitudes ortométricas em Portugal continental (designadas de Helmert 1938) é realizado por nivelamento geodésico a partir de um referencial pontual materializado por uma marca de nivelamento rigorosamente cotada em relação ao NMM adoptado. Este referencial foi definido a partir da média das observações do nível do mar registadas no antigo marégrafo de Cascais, entre 1882 a 1938, originando assim o NMM de Cascais de 1938, zero altimétrico de Portugal continental (NMM1938). Esta marca de referência, que materializa o *datum* altimétrico nacional, está posicionada à altitude exacta de 4.308 m em relação ao NMM1938.

O sistema nacional de referência vertical é então definido por um conjunto de altitudes ortométricas estendido a todo território nacional continental através da rede de linhas de nivelamento geométrico de alta precisão e da rede geodésica nacional. Outros

sistemas verticais na Europa usam sistemas de altitude normais (definido através do valor da gravidade normal -  $\gamma$ , em vez da gravidade terrestre -  $g$ ), ao contrário do sistema nacional, cuja altitude corresponde à distância vertical medida ao longo da vertical de lugar do ponto, entre a superfície do geóide e a superfície topográfica, e que resulta da seguinte definição

$$H = \frac{C}{\bar{g}} \cong \frac{C}{g + 0.0424H} \quad (1)$$

onde  $C$  é o numero geopotencial e  $\bar{g}$  é o valor médio da aceleração da gravidade entre o ponto do terreno e a superfície do geóide, ao longo da vertical do lugar (Heiskanen e Moritz, 1967).

A diferença entre estes dois sistemas usados na Europa, de altitudes ortométricas e altitudes normais, é pouco significativa nas zonas de baixa altitude (sub-decimétrica), apresentando apenas diferenças significativas nas zonas montanhosas elevadas.

## 2.2. Zero Hidrográfico

Em 2008, a Organização Hidrográfica Internacional (IHO) estabeleceu uma resolução, com recomendação a todos os seus membros, com vista à unificação das definições de Zero Hidrográfico (ZH). Contudo continua a existir uma diversidade de definições pelo mundo inteiro. Em Portugal continua a vigorar, não só a definição que deu origem a todos os ZH usados no território nacional, como também os próprios valores de ZH originalmente estabelecidos no território nacional. Assim, é ainda válida a definição de ZH dado pela mais baixa das Baixa-Mar (BM) registadas num período nodal (18.6 anos), acrescida do chamado “pé de piloto”. No território continental temos o valor do ZH de 2.00 m abaixo do NMM1938 para toda a costa portuguesa,

sempre em função da amplitude máxima em águas-vivas (AV) equinociais.

O ZH é então o referencial vertical local usado em Hidrografia, quer para a definição da altura de maré, quer como referência das sondas e profundidades usadas na cartografia náutica.

Ao longo da costa portuguesa o regime de maré é do tipo semi-diurno com uma amplitude máxima na ordem de 1.70 m, podendo atingir 1.80 m no caso de Viana do Castelo, de 1.85 em Cascais, e excepcionalmente, 2.10 m em Lisboa devido ao regime de maré estuarina (Antunes, 2007). Por aqui se pode compreender que para toda a zona costeira portuguesa o ZH de 2.00 m é, de acordo com a definição usada em Portugal pelo Instituto Hidrográfico (IH), e compatível com a resolução do IHO, uma referência adequada e justificada.

Já para o caso particular do estuário do Tejo, nomeadamente para Lisboa, há a considerar o efeito de propagação da onda de maré ao longo do estuário. A onda de maré que transporta uma dada quantidade de massa a uma determinada velocidade, ao entrar num estuário confinado por um determinado prisma de maré, perde velocidade e aumenta a sua amplitude devido à conservação de energia da onda (Fig.1). Além disso, verifica-se também uma ligeira elevação do seu nível médio (NMMaré), sobre-elevando a onda de maré em relação ao NMM e ao ZH. Localmente, a altura de maré do NMMaré de um dado porto define a profundidade local do ZH, e este é por vezes definido como o ZH local, correspondendo à constante  $Z_0$ , ou harmónica de ordem zero, do modelo de harmónicas simples que define matematicamente a maré astronómica. No caso de Lisboa, este valor era originalmente 2.20 m, situando-se actualmente no valor de 2.34 m devido subida do NMM; ao passo que, em Cascais era originalmente de 2.08 m (o ZH oficial), e actualmente é de 2.25 m.

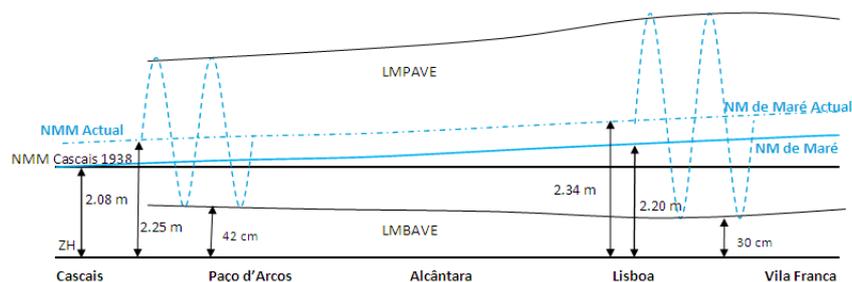


Fig. 1 - Geometria da maré no estuário do Tejo. Relação entre o NMM1938 e o ZH de Cascais-Lisboa. Diferença entre o NMM1938 e o NMM actual. Limite máximo de PM de AV equinociais – LMPAVE.

com a excepção da zona do estuário do Tejo, de 2.08 m abaixo do NMM1938. Nas regiões autónomas, porque a maré nos oceanos é de amplitude inferior à das zonas costeiras continentais, tem-se o ZH de 1.40 m na Madeira e de 1.00 m nos Açores. Estes valores diferem de região para região, porque dependem do regime de maré. O ZH é definido

A Figura 1 mostra a sobre-elevação da maré actual devido à subida do NMM de 17 cm em relação à referência do NMM1938 (Antunes, 2007), posicionando os valores de altura de maré (BM, NMMaré e PM) acima dos valores convencionais definidos pelos antigos modelos de maré. Nomeadamente, os valores de resguardo de segurança de navegação, dado pelo mínimo de

baixa-mar (BM) de AV, situam-se actualmente nos 42 cm em Cascais e 30 cm em Lisboa (baseado em Antunes, 2007, para o período de 2010-14).

### 2.3. Geóide

A definição rigorosa de um *datum* altimétrico global é dada pela superfície que define matematicamente a figura física da Terra, através do problema de fronteira da Geodesia Física, ou seja, pela superfície equipotencial de referência designado de “geóide”.

A superfície do geóide é uma superfície analítica que define a geometria do campo gravítico da Terra, ao nível do mar. Para ser estabelecida, fixada e usada como referência altimétrica, esta superfície é obtida, por convenção, pela fixação dos seguintes parâmetros: dimensão e forma do elipsóide de referência ( $a$ ,  $e^2$ ); velocidade angular da Terra ( $\omega$ );  $e$ , constante gravitacional da Terra ( $GM$ ). Depois de se determinarem e fixarem estes parâmetros, determina-se o valor constante do potencial gravítico  $W_0$  que define a superfície equipotencial de referência, o geóide.

O valor desta constante  $W_0$  está actualmente definida e é, por convenção, igual ao valor do potencial normal do elipsóide de referência,  $U_0$ , dado por  $W_0=U_0= 62636860.85 \text{ m}^2\text{s}^{-2}$  (Moritz,

ajustado ao sistema de altitudes da rede de nivelamento de alta precisão e da rede geodésica de primeira ordem. Este modelo, facultado publicamente pela DGT, é hoje comumente usado nas aplicações de GNSS diferencial em Topografia, Cartografia e Hidrografia, e como técnica de nivelamento geodésico proporciona uma exactidão superior a 4 cm (Catalão e Sevilla, 2009).

A Figura 2 mostra a relação altimétrica entre diferentes referenciais usados na Europa e a sua relação com o sistema EVRS.

### 2.4. European Vertical Reference System

O referencial *European Vertical Reference Frame* 2007 é a mais recente realização do sistema de referência vertical europeu (EVRS) e a continuação da solução da rede de nivelamento europeia, UELN95/98.

Os objectivos do EVRS são: a) definir um sistema de referência vertical europeu harmonizado e sem hiatos; b) elaborar recomendações à Comissão Europeia para uma futura adopção de um EVRS a ser proposto na directiva INSPIRE; c) providenciar um sistema de altitudes actualizado e compatível com as convenções do EVRS.

As diferenças significativas entre a realização

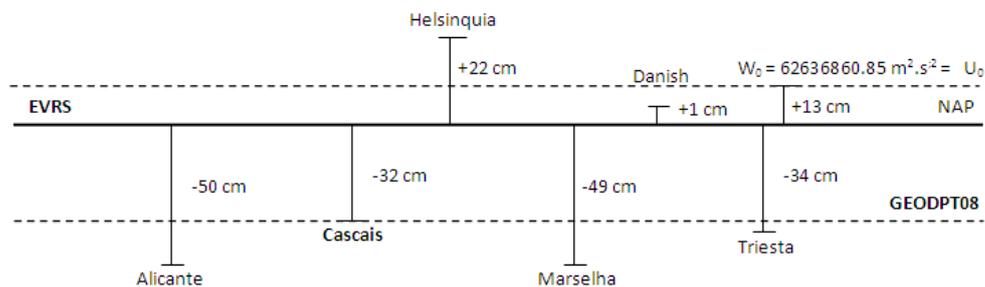


Fig. 2 - Relação entre o NMM1938 (GEODPT08), diferentes *data* altimétricos na Europa e o EVRS2007 (adaptado de Idhe e Sánchez, 2005).

1979), definido matematicamente pela seguinte expressão analítica:

$$U_0 = \frac{GM}{\sqrt{a^2 - b^2}} \arctg\left(\frac{e}{\sqrt{1 - e^2}}\right) + \frac{1}{2}\omega^2 a^2 \quad (2)$$

onde ( $GM$ ,  $a$ ,  $e^2$ ,  $\omega$ ) são os parâmetros definidos numericamente pelo GRS80 (*Geodetic Reference System* 1980), definido em Moritz (1979).

Existem modelos globais de geóide, resultantes de modelos geopotenciais globais, como o EGM2008, que apresentam globalmente precisões até 10 cm. Para os países que têm o sistema de altitudes normais são usados modelos de quasi-geóide, correspondentes a superfícies não-equipotenciais, mas que satisfazem os requisitos de um sistema de referência vertical.

Em Portugal, existe o modelo gravimétrico de geóide, o GEODPT08 (Catalão e Sevilla, 2009). É um modelo numérico dado no formato de grelha e corresponde a uma solução de geóide fixada ao Datum Altimétrico de Cascais (NMM1938) e

EVRF2007 e a realização anterior EVRF2000 são: o ponto origem, em vez de fixado na marca NAP em Amsterdão, o EVRS2007 foi ajustado a 13 marcas de nivelamento distribuídas pelo continente europeu e, em vez de ser um sistema de maré terrestre média (*mean-tide*) é um sistema de maré nula (*zero-tide*). Devido à diferença de fixação de origem, o EVRS2007 apresenta ligeiras diferenças em relação ao EVRS2000 nas altitudes dos *data* verticais dos países europeus. A Figura 2 apresenta as diferenças do EVRS em relação a alguns *data* nacionais que integram a UELN.

O EVRS é um sistema de altitudes normais, associado ao modelo de quasi-geóide, o que pode implicar, caso venha ser adoptado, a uma conversão dos sistemas de altitudes ortométricas usado por alguns países europeus para o sistema de altitudes normais, como é o caso de Portugal.

### 3. SUBIDA DO NMM E A REVISÃO DO DATUM ALTIMÉTRICO

A série temporal de médias mensais do marégrafo de Cascais indica uma subida do NMM de 12 cm até 2000 (Antunes e Taborda, 2009). Considerando a média dos últimos 10 anos, o NMM terá já atingido os 17 cm em 2013 acima do NMM1938.

De acordo com trabalhos anteriores (Antunes e Taborda, 2009) a taxa de subida do NMM nas últimas décadas do século passado foi de 2.1 mm/ano, sendo o valor actual de 4.1 mm/ano é estimada uma aceleração da subida do NMM de 0.073 m/ano<sup>2</sup>.

Admitindo valores de subida do NMM e respectiva aceleração desta ordem de grandeza, obtém-se uma projecção do NMM para o final do século de cerca de 1.07 m acima do NMM1938, ou seja, 0.90 m acima do NMM actual. Admitindo o movimento vertical de sítio, dado por GPS (Antunes *et al.*, 2010), caracterizado por um movimento de soerguimento da ordem de 0.3 mm/ano, estes valores são compatíveis com as projecções mais recentes de publicações científicas e relatórios internacionais que apontam para uma subida do NMM de 1 m para o Séc. XXI (Rahmstorf, 2007).

#### 3.1. Datum altimétrico e altitudes ortométricas

Admitindo que o NMM tenha já subido 17 cm em relação ao NMM1938 e que subirá ainda cerca de 0.9 a 1.0 m até 2100, o datum altimétrico deverá ser revisto e ajustado a um NMM mais actual. Tal implicará que todas as altitudes ortométricas do território nacional e informação geográfica associada terão de ser alteradas em função do novo datum altimétrico. Nesta situação é evidente a actualização da informação cartográfica, nomeadamente, os limites administrativos de domínio hídrico, quer na costa marítima, através da linha máxima de PM em AV equinociais – LMPAVE, quer nas zonas estuarinas de forte influência da maré oceânica.

A possível imposição de adopção do EVRS através da directiva INSPIRE irá também obrigar à adaptação e revisão do datum altimétrico e respectivas altitudes ortométricas usadas em Portugal continental.

Por um lado, a adopção do EVRS para Portugal continental implicará subir o datum vertical Cascais 1938 em 32 cm, por outro, a contínua subida do NMM obriga à revisão do datum vertical. Duas razões que se tornam cada vez mais pertinentes.

#### 3.2. Zero Hidrográfico, sondas e profundidades

Na Hidrografia e Cartografia Náutica são evidentes as necessidades de revisão do ZH, devido à contínua subida do NMM que tem implicações directas na navegabilidade e repercussões económicas nas administrações dos portos com forte actividade

marítima, por via dos custos de dragagem de manutenção.

O aumento de coluna de água devido ao efeito da subida do NMM, colocando o ZH a 3.20 m abaixo do NMM em 2100, e a não actualização da cartografia, nomeadamente, na zona do estuário do Tejo, irá restringir a zona de navegabilidade em benefício de uma maior e exagerada segurança de navegação, bem como, exigir dragagens muito abaixo da cota necessária.

A revisão do datum altimétrico de Cascais1938 torna-se assim uma oportunidade de revisão e actualização do ZH dos portos portugueses, tendo em consideração a subida do NMM e o consequente aumento da coluna de água. Esta oportunidade permitirá também a adopção da recomendação da OIH e a uniformização dos valores de ZH.

### REFERÊNCIAS

- Antunes, C. (2007). Previsão de Marés dos Portos Principais de Portugal URL: [http://webpages.fc.ul.pt/~cmantunes/hidrografia/hidro\\_mares.html](http://webpages.fc.ul.pt/~cmantunes/hidrografia/hidro_mares.html) (consultado em 2014.04.30).
- Antunes, C. and Taborda, R. (2009). Sea level at Cascais tide gauge: data, analysis and results. *Journal of Coastal Research, SI 56: Proceedings of the 10th International Coastal Symposium*, p. 218-222, Lisbon, Portugal, ISSN 0749-0258.
- Antunes, C., Taborda, R. and Mendes, V. (2010). Analysis of the most recent data of Cascais Tide gauge. *EGU General Assembly 2010, held 2-7 May, 2010 in Vienna, Austria*, p.1253.
- Catalão, J. and Sevilla, M.J. (2009). Vertical datum unification on Iberia and Macaronesian islands using multi-sensor gravity data and GRACE geopotential model. *Journal of Geodynamics*, doi:10.1016/j.jog.2009.03.001.
- Heiskanen W.A. and Moritz, H. (1967). *Physical Geodesy*. W.H. Freeman and Company, San Francisco.
- Ihde, J. and Sánchez, L. (2005). A unified global height reference system as a basis for IGGOS. *Journal of Geodynamics*, 40, p. 400-413.
- Ihde, J., M. Sacher, J. Mäkinen (2008). Conventions for the definition and realization of a European Vertical Reference System (EVRS) – EVRS Conventions 2007. IAG Sub-commission 1.3a EUREF.
- Moritz, H. (1979). Report of Special Study Group N° 539 of I.A.G., Fundamental Geodetic Constants, presented at XVII General Assembly of I.U.G.G., Canberra.
- Rahmstorf, S. (2007). A semi-empirical approach to projecting future sea level rise. *Science*, p. 315-368.

### Agradecimentos

Fundação para a Ciência e Tecnologia, Financed by Project FCT: “Pest-Oe/CTE/LA0019/2013-2014”.