

Estudo das correntes oceânicas na região envolvente da Ilha Terceira no Arquipélago dos Açores

J.P.M.J. Santos¹, J.L.S. Pinho²

*Universidade do Minho, Departamento de Engenharia Civil
Azurém, P – 4800-058 Guimarães, Portugal*

RESUMO

Este trabalho tem como principal objectivo o estudo das correntes oceânicas na região envolvente da Ilha Terceira no Arquipélago dos Açores.

Pretende-se identificar os factores que mais influenciam as correntes na sua magnitude e direcção na região envolvente da ilha. Para tal, foram analisados trabalhos realizados anteriormente e foi desenvolvido um modelo hidrodinâmico para modelação das correntes. Os cenários simulados foram definidos, de forma a reproduzir situações próximas da realidade para a zona em estudo, fazendo variar nas fronteiras, a altura de maré, a velocidade da corrente e os ventos actuantes no domínio, considerando-se cenários quer em regime permanente, quer em regime variado.

1. INTRODUÇÃO

As correntes oceânicas podem agrupar-se, de acordo com a fonte de energia que está na sua origem, em correntes induzidas pelo vento, correntes termohalinas e correntes de maré. As primeiras, tal como a sua designação indica têm origem na acção do vento, enquanto que as segundas têm como principal fonte de energia o Sol. Todavia, sendo o Sol a principal fonte de energia no processo de formação dos ventos atmosféricos, pode afirmar-se que o Sol é a principal fonte de energia na formação das correntes oceânicas induzidas pelo vento e nas correntes termohalinas. As correntes de maré são induzidas pelas forças gravíticas astronómicas (incluindo o Sol), desempenhando a Lua uma acção preponderante.

Neste trabalho, pretende-se conhecer os factores que influenciam as correntes na região envolvente da Ilha Terceira. Foi utilizado o programa RMA2 (WES-HL, 1996 que permite a criação de modelos bidimensionais no plano horizontal. Este programa é válido para situações em que as correntes segundo a direcção vertical possam ser desprezadas. Por outro lado, a massa volúmica é considerada constante, pelo que não é possível simular correntes resultantes de gradientes de densidade. A velocidade em cada ponto do domínio representa a média da velocidade segundo a direcção vertical.

O Arquipélago dos Açores localiza-se em pleno Oceano Atlântico, na região biogeográfica da Macaronésia (que inclui também os arquipélagos da Madeira, Canárias e

¹ Aluno finalista, Licenciatura em Engenharia Civil, Universidade do Minho

² Professor Auxiliar, Departamento de Engenharia Civil, Universidade do Minho (jpinho@civil.uminho.pt)

Cabo Verde) entre os paralelos 36°35' e 39°43' de latitude Norte e os meridianos 24°45' e 31°17' de longitude Oeste. As ilhas dos Açores, que no seu conjunto perfazem uma área de 2352 km², distribuem-se diagonalmente por aproximadamente 66000 km², com uma orientação marcadamente Noroeste – Sudoeste, ao longo de cerca de 600 km de comprimento.

As ilhas são agrupadas em três grupos: o Oriental (constituído pelas ilhas de Santa Maria e São Miguel), o Central (composto pelas ilhas Terceira, Graciosa, São Jorge, Pico e Faial) e o Ocidental (do qual fazem parte as ilhas das Flores e do Corvo), como se pode ver na Figura 1.

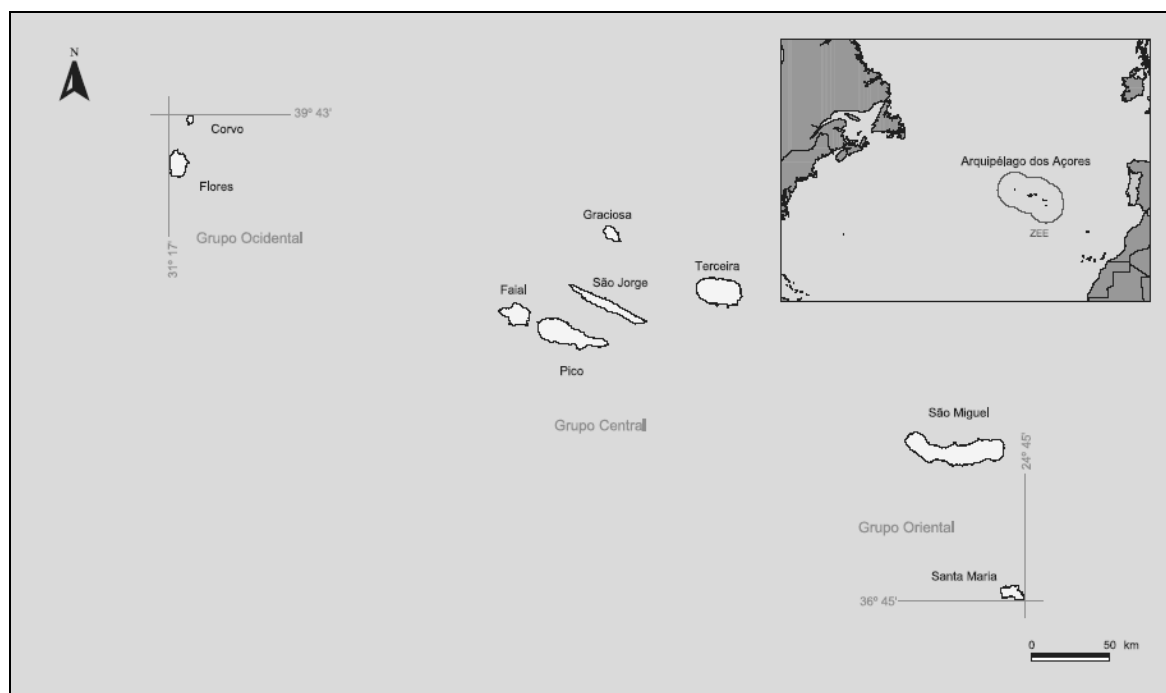


Figura 1 – Enquadramento geográfico do Arquipélago dos Açores

O comprimento total das linhas de costa das nove ilhas é cerca de 850 km, aproximadamente o comprimento da linha de Costa de Portugal Continental. À Região Autónoma dos Açores corresponde uma Zona Económica Exclusiva (ZEE) de 938 000 km², que contém a área compreendida entre a linha de costa de cada uma das ilhas e a distância de 200 milhas náuticas (aproximadamente 370 km). Estas águas representam cerca de 30 % da ZEE europeia.

A Ilha Terceira, com cerca de 56500 habitantes, é a mais oriental das ilhas do grupo Central do arquipélago dos Açores e fica situada a aproximadamente 21 milhas náuticas a Noroeste da ilha de São Jorge e a 75 milhas da ilha de São Miguel.

Tem uma área aproximada de 397 km² e fica compreendida entre os paralelos 38° 38' N e 38° 48' N e os meridianos 27° 02' W e 27° 23' W. O seu formato é sensivelmente oval, com o eixo principal orientado no sentido Este-Oeste e com o comprimento máximo de 29 km entre a ponta da Má Merenda a Este e a ponta da Serreta a Oeste e a largura máxima de cerca de 18 km entre a Ponta dos Biscoitos a Norte e a península do Monte Brasil a Sul.

O comprimento total da linha de costa da ilha Terceira é de cerca de 85 km.

2. PROGRAMA RMA2

O programa RMA2 permite a implementação de modelos hidrodinâmicos bidimensionais no plano horizontal. Este programa é baseado no Método dos Elementos Finitos (WES-HL, 1996). Calcula a altura da água e as componentes horizontais da velocidade média segundo a direcção vertical nos pontos nodais da malha em que é discretizado o domínio.

O programa é baseado nas equações de conservação de massa e quantidade de movimento integradas segundo a direcção vertical:

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial [HU]}{\partial x} + \frac{\partial [HV]}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} = fV - g \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{g}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial x} \frac{h + \eta}{2} + \frac{\rho_a k W_v^2 \cos \varphi}{h + \eta} - \frac{gU \sqrt{U^2 + V^2}}{(h + \eta) C^2} + \frac{\varepsilon}{\rho} \left(\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} \right) \quad (2)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} = -fU - g \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{g}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial y} \frac{h + \eta}{2} + \frac{\rho_a k W_v^2 \sin \varphi}{h + \eta} - \frac{gV \sqrt{U^2 + V^2}}{(h + \eta) C^2} + \frac{\varepsilon}{\rho} \left(\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} \right) \quad (3)$$

onde, x e y são as coordenadas horizontais cartesianas, t é o tempo, U e V são a média vertical das componentes horizontais de velocidade, $H \equiv h + \eta$ é a profundidade total ($h(x,y)$ representa a elevação do fundo e $\eta(x,y,t)$ é a elevação da superfície livre), ρ_a é a massa volúmica do ar, W_v é a velocidade do vento, φ é a direcção do vento, C é o coeficiente de Chezy e ε é o coeficiente de viscosidade turbulenta. O efeito do atrito no fundo é calculado usando as formulações de Manning ou Chezy e as características turbulentas dos escoamentos são consideradas através da consideração das tensões de Reynolds quantificadas a partir de coeficientes de viscosidade dinâmica. Podem ser analisados problemas em regime permanente ou em regime variado.

O programa tem sido aplicado para estudar a hidrodinâmica na região envolvente de ilhas, correntes junto de pilares e encontros de pontes, canais de centrais hidroeléctricas, confluências de rios, albufeiras e estuários.

O programa RMA2 foi desenvolvido para modelar problemas de grandes dimensões (no plano horizontal), onde as acelerações verticais são desprezáveis e os vectores velocidade geralmente apontam na mesma direcção em toda profundidade da coluna de água e para qualquer instante.

Um dos parâmetros de calibração dos modelos criados com o programa RMA2 é o coeficiente de viscosidade turbulenta. Enquanto que a viscosidade molecular está associada às propriedades de um fluido, a viscosidade turbulenta está relacionada com as propriedades da corrente. Esta grandeza não apresenta um valor específico para cada tipo de corrente, e para se conhecer o seu valor é necessário recorrer a um processo de calibração do modelo. Os valores encontrados podem ser então usados para outras simulações que apresentem condições de correntes semelhantes. No oceano os valores deste coeficiente nas direcções horizontais variam entre 10 e 10^5 N.s/m² e 10^{-5} e 10^{-1} N.s/m² segundo a direcção vertical.

O outro coeficiente de calibração é o coeficiente de Manning-Strickler. Para profundidades elevadas, a rugosidade não terá grande influência na velocidade média segundo a direcção vertical.

O programa permite ainda considerar o efeito da força de Coriolis. A actuação desta força faz com que um corpo à superfície da Terra, se desvie do seu percurso, devido à rotação

da Terra de Oeste para Este. Esta força é tanto mais intensa quanto mais próxima do equador está a região em estudo. No hemisfério Norte, a força de Coriolis desvia a trajetória para a direita e no hemisfério Sul, para a esquerda.

3. MODELO HIDRODINÂMICO DA REGIÃO ENVOLVENTE DA ILHA TERCEIRA

3.1 Batimetria

A definição da batimetria é uma das tarefas fundamentais na concepção de um modelo hidrodinâmico pois influencia de forma marcante a propagação das correntes oceânicas. Para a caracterização do fundo oceânico, recorreu-se a cartas náuticas do instituto hidrográfico de Portugal, referentes à ilha terceira à escala de 1/75000 (Figura 2).

A digitalização das cartas foi realizada em *Autocad*, com uma resolução análoga à das cartas náuticas utilizadas.

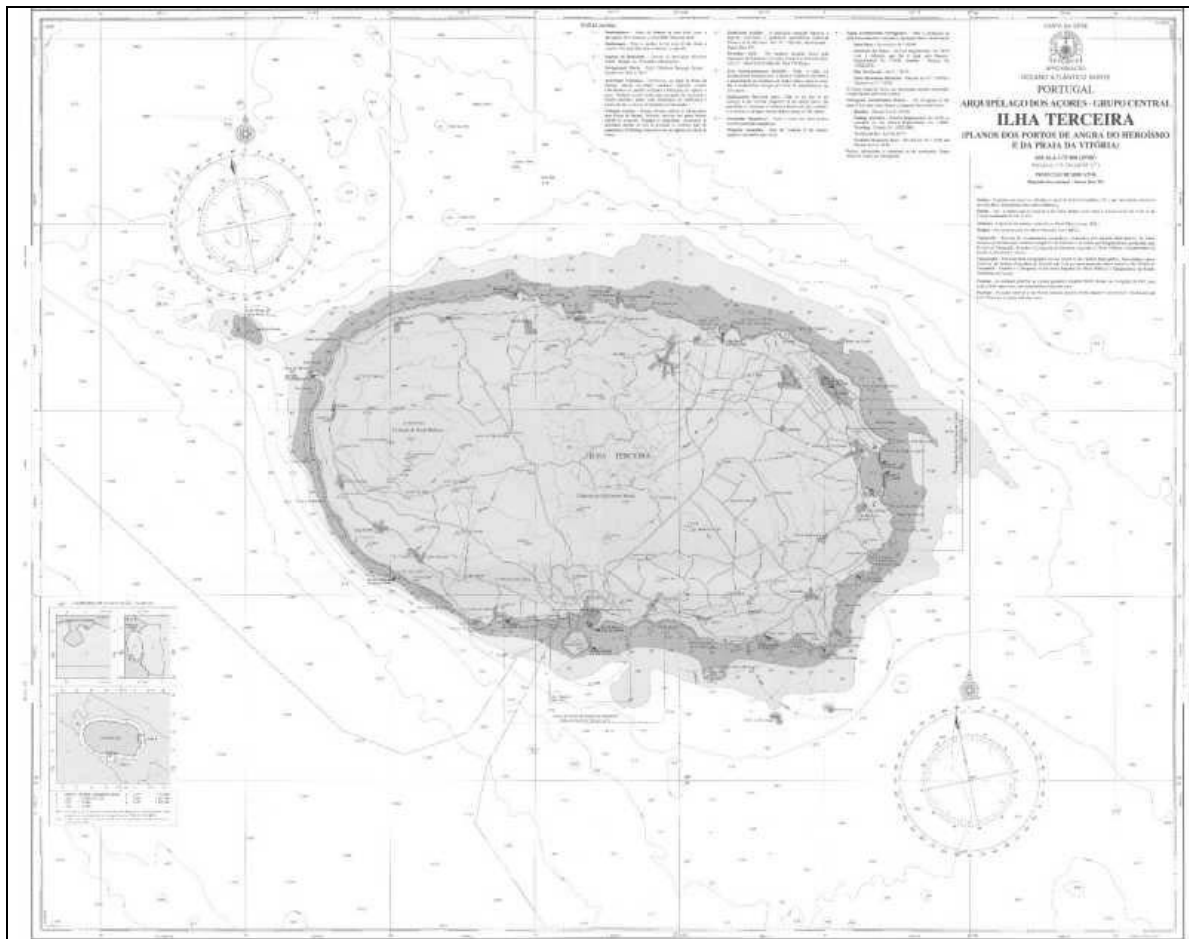


Figura 2 – Carta náutica da Ilha Terceira à escala 1/75000 (Instituto Hidrográfico, 2001)

A batimetria do domínio foi definida por interpolação do fundo digitalizado a partir da carta náutica para os pontos nodais da malha de elementos finitos do modelo, utilizando-se na interpolação a cotas dos 20 pontos vizinhos de cada ponto nodal.

Na linha de costa foi considerada uma profundidade mínima de três metros. Assim, não ocorrerão situações de zonas de cobre-descobre, nas simulações que envolvam regimes variáveis, evitando-se desta forma problemas de convergência do programa.

3.2 Discretização espacial

A região envolvente definida para a criação do modelo é coincidente com a área coberta pela carta náutica da Ilha Terceira do Instituto Hidrográfico. Este domínio foi discretizado por uma malha com 17064 elementos triangulares e 7076 nós.

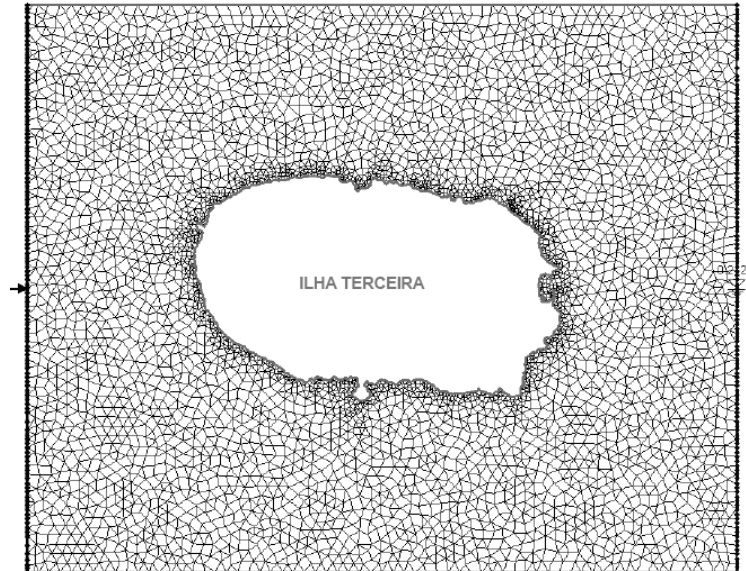


Figura 3 – Modelo hidrodinâmico da envolvente da ilha Terceira: malha de elementos finitos

3.3 Condições de fronteira

O modelo criado apresenta quatro fronteiras laterais abertas e a superfície livre onde actua a tensão superficial de atrito entre o ar e a água. Nestas fronteiras são estabelecidas os valores das elevações da superfície livre e/ou de caudais e tensões na superfície livre, cujos valores foram determinados a partir das características de actuação do vento, da maré e de valores registados para as correntes na região.

O efeito de ondas, com a excepção de ondas de maré, não foi considerado para este trabalho. No entanto o valor da altura de onda significativa registada é de 2 metros, do quadrante de S, de SE a SSW, registada durante o Inverno junto ao Porto de Angra do Heroísmo (Instituto Hidrográfico, 2001).

Os ventos são a principal causa da existência de correntes superficiais nos oceanos. A região dos Açores é fortemente influenciada por efeitos meteorológicos de diferentes proporções e com extremas variações ao longo do ano. O arquipélago está situado na zona subtropical de anticlones do Hemisfério Norte, pelo que as condições meteorológicas predominantes são determinadas pelo anticiclone subtropical dos açores (Instituto Hidrográfico, 2001). No grupo central, onde se situa a zona em estudo, as velocidades mais elevadas ocorrem com ventos de Sul. Os dados referentes aos ventos foram retirados da base de dados “IRI/LDEO Climate Data Library” do “International Research Institute for Climate Prediction”, que contém uma extensa variedade de dados referentes à oceanografia e meteorologia da região. O ponto escolhido foi o mais próximo do local, com as coordenadas: 37° N 27° W, num período de tempo de 10 anos (entre 1982 e 1992).

Segundo Instituto Hidrográfico, no grupo Central, o comportamento difere conforme a exposição é a Norte ou a Sul. Assim, nas Lajes a frequência e velocidade mais elevadas vão

de NW a N, ao passo que em Angra do Heroísmo a maior frequência é de W, mas as velocidades mais elevadas ocorrem com ventos de S.

A tensão devida ao vento é considerada tangencial à superfície oceânica. A formulação utilizada no modelo (existem diferentes formulações disponíveis no programa) foi a seguinte:

$$TS = \rho \times C \times W^2 \quad (4)$$

onde,

TS – Tensão aplicada na superfície livre devida à acção do vento ($\text{g}/(\text{cm} \cdot \text{s}^2)$)

ρ – Massa volúmica do ar (g/cm^3)

C – coeficiente de pressão do vento (-)

W – Velocidade do vento a 10 metros de altitude (cm/s)

- Para $W > 15 \text{ m/s}$ - $C = 0.0026$

- Para $1 < W < 15$ - $C = (W/100) \times 0,5 \times 0,001/2$

A elevação da maré nas fronteiras laterais abertas foi estabelecida, de forma simplificada, a partir de um modelo de previsão das elevações à escala global e desenvolvido a partir de observações realizadas através de instrumentos colocados a bordo de satélites

A corrente dos Açores tem origem na ramificação da corrente do golfo que ocorre perto das coordenadas $40^\circ\text{N} - 45^\circ\text{W}$. No Inverno a corrente consiste num único fluxo, enquanto que no Verão a corrente tem uma bifurcação. O ramal norte dessa bifurcação flui directamente para a região dos Açores, enquanto que o outro ramal se direcciona para sudoeste, descrevendo um círculo e voltando novamente à corrente original (Klein & Siedler 1989).

A corrente dos Açores flui para Sudeste até encontrar a cadeia montanhosa submersa da região, perto de $35^\circ\text{N} - 45^\circ\text{W}$, onde se direcciona então para Este, até próximo da costa africana, onde parte da corrente é direccionada para o golfo de Cadiz, e para Gibraltar, fazendo parte do caudal afluente ao Mar Mediterrâneo (Johnson & Stevens 2000). Durante o seu percurso para Este, a corrente dos Açores produz três ramificações para Sul. Dessas ramificações, a que se situa mais a Este alimenta a corrente das Canárias (Stramma 1984), enquanto que as outras duas juntam-se à corrente Equatorial – Norte, (Maillard & Käse 1989). Uma pode ser encontrada entre 23°W e 27°W , e a outra entre 32°W e 36°W . A sua localização exacta varia anualmente e de forma sazonal (Klein & Siedler 1989).

O fluxo principal da corrente dos Açores tem cerca de 150 km de largura e uma profundidade de 1000 metros. Fortes gradientes térmicos e de salinidade são característicos da região. Em relação à velocidade média da corrente, existem vários estudos e medições na região. Como foi constatado pela pesquisa realizada neste estudo, existem inúmeros valores para esta corrente, sugeridos por diversos autores. No que se refere à intensidade da corrente, a condição adoptada foi a de um transporte na região de 8 Sv ($10^6 \text{ m}^3/\text{s}$), vindo de Oeste e perpendicular à fronteira. Noutros cenários foram consideradas velocidades de corrente na fronteira Oeste, também perpendiculares a esta e de valores da ordem dos 0.3 m/s.

O valor de $8 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$ resulta do facto das correntes na envolvente da Ilha Terceira ser influenciada pelas restantes ilhas do grupo central e da largura de influência do modelo ser de 45 km, quando os valores de transporte referidos anteriormente compreendem toda a massa de água da corrente dos açores, que tem cerca de 150 km de largura.

É de salientar que, nestas condições, os vectores velocidade nas fronteiras Norte e Sul serão paralelos, ou seja, apenas têm componente horizontal.

4. RESULTADOS

O modelo foi aplicado no cálculo de diferentes situações hidrodinâmicas características da região em análise. Assim, foram definidos diferentes cenários em função da intensidade e direcção da corrente e das características de actuação da maré e do vento.

Os valores adoptados para as condições de fronteira associadas aos distintos cenários correspondem a valores médios possíveis para o local do estudo e em alguns casos a valores extremos. Foram ainda considerados alguns cenários que serviram para se efectuar uma análise de sensibilidade aos parâmetros de calibração do modelo.

O efeito da acção do vento nas correntes médias segundo a direcção vertical para os valores de profundidade envolvidos no modelo não é de grande significado, uma vez que estas correntes só apresentam intensidades significativas numa camada superficial de pequena espessura (quando comparada com a profundidade total). Por outro lado, padrões de circulação costeira relacionados com episódios de *upwelling* e *downwelling* estão fora das possibilidades de um modelo bidimensional no plano horizontal. No entanto, foram criados alguns cenários considerando uma profundidade máxima no domínio de 200 metros, para compreender, numa primeira aproximação, qual a influência do vento nas correntes que se verificam nas proximidades da Ilha Terceira.

Uma das simulações foi realizada em regime variado, para um período de simulação de 25 horas, com um intervalo de integração temporal de 30 minutos, totalizando então, 50 instantes de cálculo. O vento não foi considerado, pois dos resultados obtidos para outros cenários, verifica-se que não existe influência significativa deste, para as profundidades mais frequentes no domínio. Com esta simulação é possível prever aproximadamente as velocidades e alturas da superfície livre para um dia completo, com a variação da altura da maré.

Na fronteira Oeste foi considerado um caudal de 8×10^6 m³/s perpendicular à fronteira. As elevações da maré foram impostas na fronteira Este. Não é considerada a acção do vento neste cenário pelas razões já mencionadas anteriormente.

Foram adoptados os seguintes valores para os parâmetros de calibração: coeficiente de difusão turbulenta igual a 70000 N.s/m² e coeficiente de Manning igual a 0.025 m^{-1/3}s.

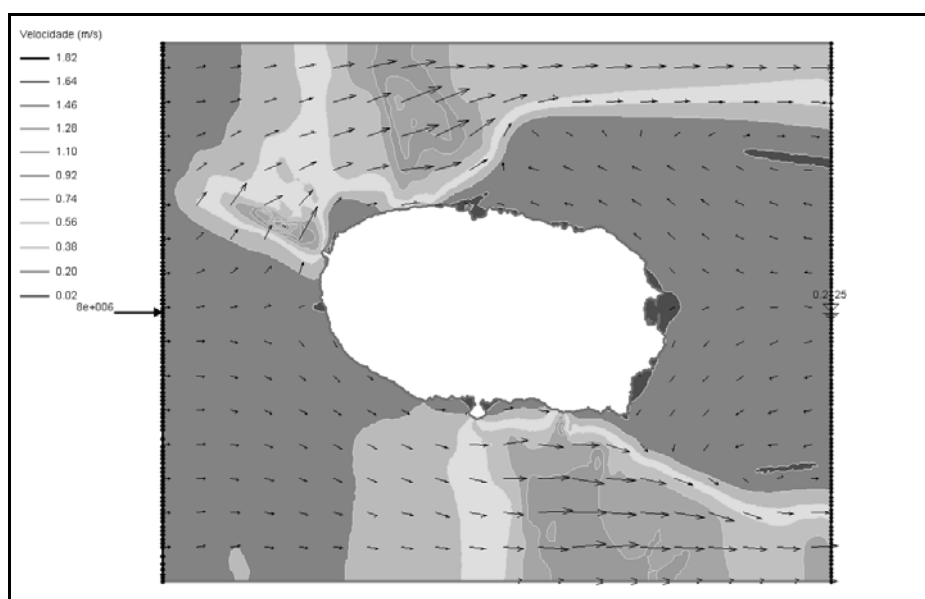


Figura 4 – Modelo hidrodinâmico da região envolvente da Ilha Terceira: resultados para a intensidade e direcção das correntes no instante final da simulação associada ao cenário 1.

Da análise dos resultados apresentados na Figura 4, verifica-se a oportunidade de localização de algumas infra-estruturas da Ilha Terceira, nomeadamente a localização do Porto da Praia da Vitória, numa zona de correntes pouco intensas para a situação hidrodinâmica mas frequente (correspondente aos resultados apresentados), adequadas para a aproximação de navios aos portos, representado pela zona mais escura na parte Este da ilha. Também coincidindo claramente com as zonas mais escuras da Figura 4, temos áreas de deposição de areias, como é o caso da praia da Vitória, na parte Este e também de uma zona de deposição na parte Este da península do Monte Brasil.

As correntes mais intensas ocorrem sobretudo em regiões de baixas profundidades (Baixo da Serreta, cabeços e ilhéus).

Na Figura 5 apresenta-se um pormenor das correntes junto do Monte Brasil. Neste pormenor é possível perceber a magnitude da velocidade junto à costa e na zona envolvente desta península. Na zona 1, a velocidade é de 0,24 m/s, passando para 0,6 m/s na zona 2.

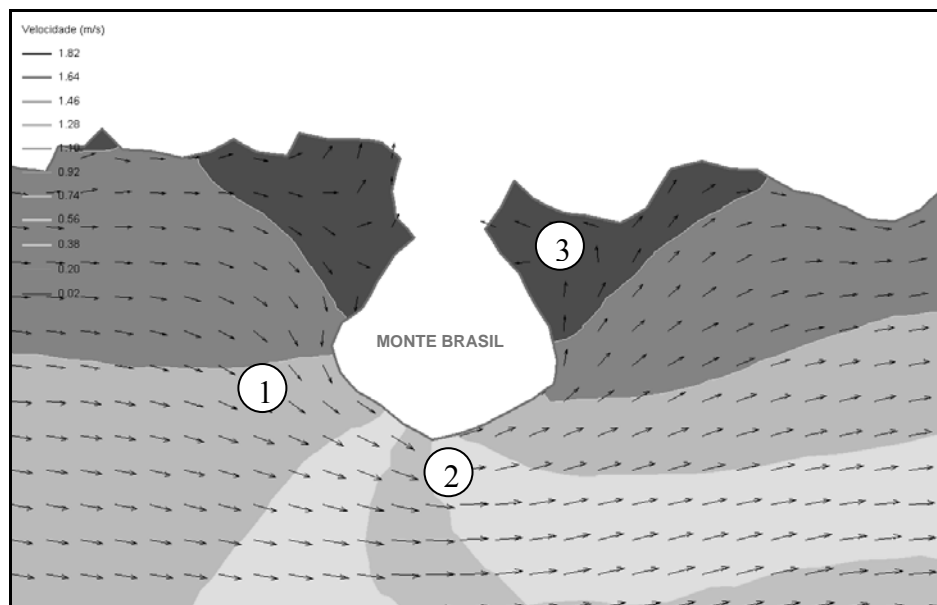


Figura 5 – Intensidade e direcção das correntes, junto ao Monte Brasil.

A zona 3 tem velocidades bastante reduzidas e muito próximas de zero. Nesta zona está localizado o Porto de Angra que beneficia destas condições de abrigo das correntes. Também na zona 3, junto ao Monte Brasil existem dois cais, o cais da Alfândega e o cais da Figueirinha, mais a Sul. Na Figura 6 apresenta-se uma proposta do esquema de circulação para a zona portuária de Angra de Heroísmo.



Figura 6 – Esquema de circulação na zona do porto de Angra de Heroísmo.

Na Figura 7 apresentam-se os resultados para a elevação da superfície livre para o cenário 1.

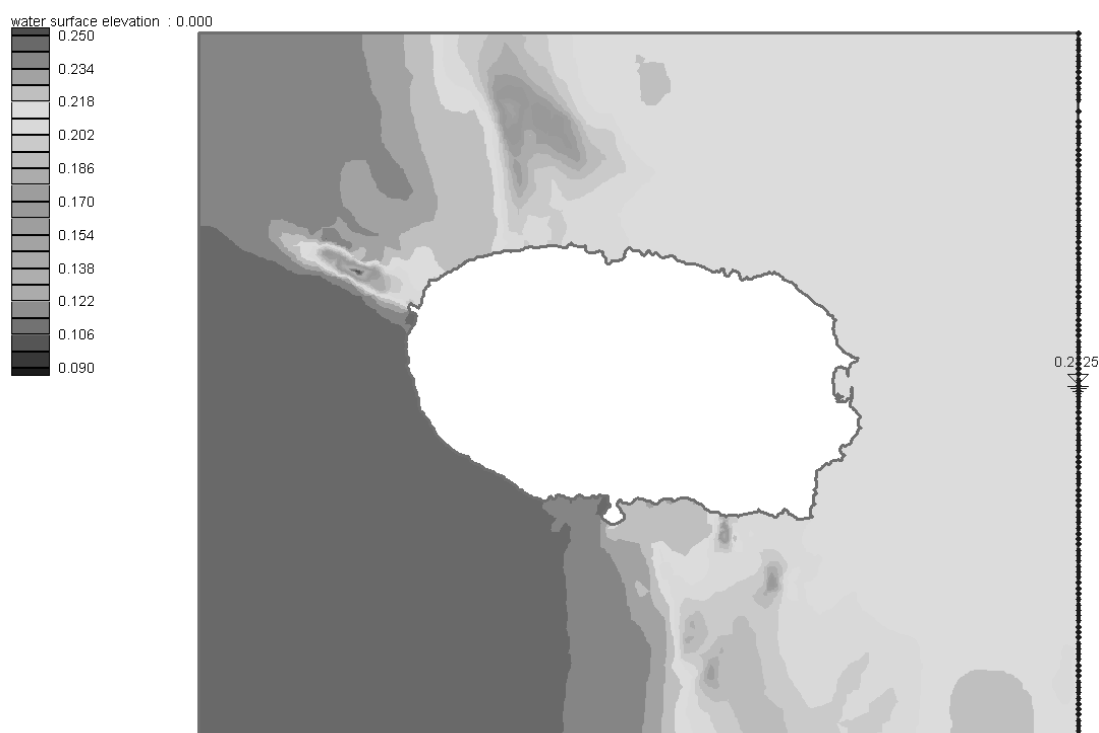


Figura 7 – Modelo hidrodinâmico da região envolvente da Ilha Terceira: resultados para a elevação da superfície livre.

Para todos os instantes, a variação da elevação da superfície livre mantém-se praticamente constante ao longo do domínio modelado, qualquer que seja a altura de maré imposta na fronteira. Entre as fronteiras Este e Oeste existe uma variação de cerca de 4 centímetros e a variação máxima verificada é de 15 centímetros.

O Baixo da Serreta, situado nas coordenadas (38°47'N ; 27°25'W), tem uma profundidade mínima de 7,6 metros. Nas Figuras 8a) e 8b) apresentam-se com maior detalhe alguns resultados obtidos para esta zona de correntes mais intensas no cenário simulado.

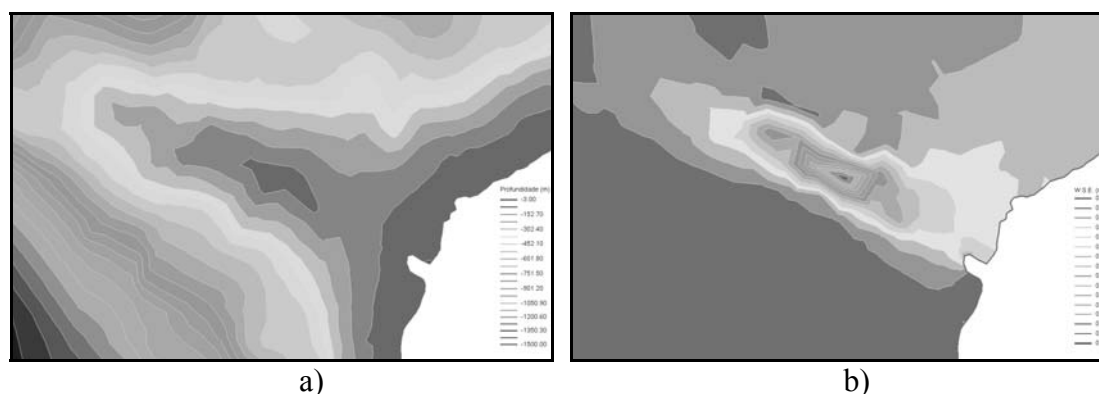


Figura 8 – Relação entre a profundidade b) e a altura da superfície livre a), na zona do Baixo da Serreta.

5. CONCLUSÕES

Os dados utilizados na elaboração deste estudo apresentam algumas limitações, sobretudo no que se refere aos registos de ventos e correntes, que se referem à região dos Açores e não a medições no local. Os valores apresentados podem sofrer variações significativas no caso de se considerarem os efeitos das diferentes ilhas na propagação das correntes oceânicas (corrente dos Açores). Desta forma os resultados obtidos com o modelo implementado deverão ser interpretados como resultados preliminares. Por outro lado, a modelação é realizada com recurso a um programa bidimensional no plano horizontal, devendo os resultados apresentados serem interpretados em conformidade com as limitações impostas pelo modelo.

Em termos qualitativos, os resultados apresentados neste estudo, constituem uma boa aproximação da realidade, em termos de correntes superficiais, como se pode constatar pelos resultados associados à simulação apresentada. As correntes em zona de baixa profundidade, como é o caso do Baixo da Serreta, zonas de correntes nulas ou com inversão de sentido, o que acontece na parte Este da ilha, são características conhecidas dos profissionais da região ligados aos recursos pesqueiros.

Pode afirmar-se que o vento não tem grande influência nas correntes médias segundo a direcção vertical, e que as correntes de maré apenas têm influência nas zonas menos profundas, na proximidade da linha de costa.

Os resultados obtidos podem ser utilizados para definir condições de fronteira de modelos de escala menor implementados em sub-domínios da região estudada.

6. REFERÊNCIAS

Ann. Geophysicae 15, EGS Springer-Verlag, T. Mailly, E. Blayo, J. Verron, *Assessment of the ocean circulation in the Azores region as predicted by a numerical model assimilating altimeter data from Topex/Poseidon and ERS-1 satellite* (1997).

Cromwell, D., P.G. Challenor, A.L. New, and R.D. Pingree, Persistent westward flow in the Azores Current as seen from altimetry and hydrography, *Journal of Geophysical Research*, 101, 11923-11933 (1996).

Direção regional do ordenamento do território e dos recursos hídricos – Região autónoma dos Açores – *Plano regional da água, relatório técnico, versão para consulta pública* (2001).

Gould, W.J, Physical Oceanography of the Azores Front. *Progress in Oceanography*, 14, 167-190 (1985).

International Research Institute for Climate Prediction, IRI/LDEO Climate Data Library – Base de dados “COADS”.

Johnson, J. and I. Stevens, A fine resolution model of the eastern North Atlantic between the Azores, the Canary Islands and the Gibraltar Strait. *Deep-Sea Research*, 47, 875-899 (2000).

Journal of computational physics 137, *A spectral filtering procedure for Eddy-Resolving simulations with a spectral element ocean model* - Julia G. Levin, Mohamed Iskandarani, Dale B. Haidvogel - *Institute of Marine and Coastal Sciences, Rutgers University, New Brunswick, New Jersey* (1997).

Journal of geophysical research, vol.106, David M. Fratantoni, *North Atlantic surface circulation during the 1990's observed with satellite-tracked drifters* (2001).

Klein, B. and Siedler, G., On the origin of the Azores Current. *Journal of Geophysical Research*, 94, 6159-6168 (1989)

Maillard, C. and R. Käse, The near-surface flow in the sub-tropical gyre south of the Azores. *Journal of Geophysical Research*, 94, 16133-16140 (1989).

Ministério da Defesa Nacional, Instituto Hidrográfico, *Roteiro da Costa de Portugal – Arquipélago dos Açores* (2000).

Pingree, R.D., The eastern subtropical gyre (North Atlantic): Flow rings recirculations structure and subduction. *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom*, 77, 573-624 (1997).

Rosentstiel School of Marine and Atmospheric Sciences, University of Miami, *Data assimilation and model evaluation experiment North Atlantic Basin* (1996).

Stramma, L., Geostrophic transport in the warm water sphere of the eastern subtropical North Atlantic. *Journal of Marine Research*, 42, 537-558 (1984).

WES-HL, US Army, Engineer Research and Development Center, Waterways Experiment Station Coastal and Hydraulics Laboratory, *Users guide to RMA2 WES, Version 4.5* (2001).

