

A AGITAÇÃO MARÍTIMA COMO FACTOR DETERMINANTE DO EQUILÍBRIO MORFODINÂMICO DA REGIÃO DAS BARRAS DO TEJO

Mário Teles, Engenheiro Hidrógrafo, HIDROPROJECTO, S.A.

Andreia Barata, Lic. em Ciências Geofísicas – Oceanografia, HIDROPROJECTO, S.A.

Cyrille Charbonnier, Engenheiro Civil, École Nationale Supérieure d'Hydraulique et Mécanique de Grenoble

RESUMO

A morfologia e a dinâmica da região das Barras do Tejo têm vindo a sofrer alterações, de que se destacam: a alteração das profundidades do “passe” da Barra Grande, o défice de alimentação em areias das praias da Costa da Caparica e o acréscimo da energia da ondulação em diferentes sectores das margens do trecho terminal do estuário. Essas alterações têm consequências que interferem com as utilizações correntes e programadas da Região. Procedeu-se ao estudo do funcionamento do respectivo sistema morfodinâmico como condição de base da pesquisa de soluções alternativas para um conjunto de problemas que interessam às entidades com jurisdição na região. O Estudo apoiou-se nos resultados das simulações num sistema de modelos matemáticos desenvolvido para o efeito. A sua aplicação requereu a criteriosa especificação de condições de fronteira, designadamente de agitação marítima.

Como aplicação subsidiária do Estudo foram definidas as condições de prática das Barras do Tejo pela navegação à custa da determinação da probabilidade conjunta de ocorrência da altura significativa das ondas e das alturas de maré, tendo presente os resguardos a observar sob a quilha dos navios.

PARTE I - EQUILÍBRIO MORFODINÂMICO DA REGIÃO DAS BARRAS DO TEJO

INTRODUÇÃO – ALTERAÇÕES NO CACHOPO DO NORTE

A região das Barras do Tejo tem vindo a sofrer alterações morfológicas, com consequências no seu comportamento hidrodinâmico, de que se destacam como mais evidentes as seguintes: acréscimo do ataque da ondulação ao Forte do Bugio; diminuição das profundidades do “passe” da Barra Grande; agravamento das condições de navegabilidade na Barra Grande; défice de alimentação em areias das praias da Costa da Caparica; tendência para assoreamento do sector da margem esquerda situado entre a Cova do Vapor e a Trafaria; e acréscimo da energia da ondulação junto ao troço de estrada marginal compreendido entre Caxias e Paço de Arcos. Constitui facto relevante e revelador desta evolução a recente necessidade de protecção do Forte do Bugio, cujas muralhas resistiram incólumes vários séculos, apesar de terem sido construídas sem o recurso a materiais e a métodos sofisticados.

Na raiz dessas alterações estão o aumento das profundidades sobre o Cachopo do Norte e a deslocação que a extremidade deste banco, a Cabeça do Pato, tem vindo a sofrer em direcção a les-sueste, isto é, em direcção ao “passe” da Barra Grande ou Barra Sul. As modificações na posição e na configuração do Cachopo do Norte até 1985 encontram-se ilustradas pelo Professor Mota Oliveira no Trabalho da Referência [1]. De acordo com esse Trabalho, a “Cabeça do Pato” deslocou-se 850 metros em direcção a les-sueste entre 1929 e 1985. No

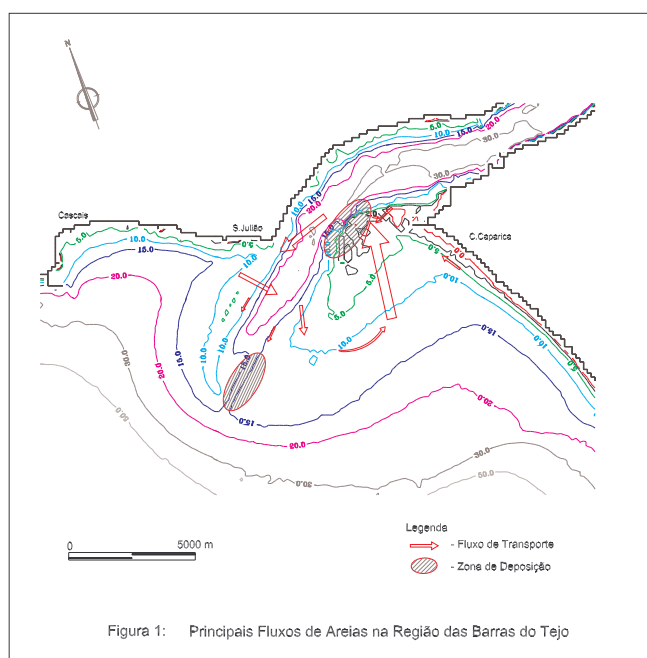
Trabalho da Referência [3], o Almirante A. Sousa Leitão corrobora estas conclusões e acrescenta que as profundidades no Cachopo do Norte têm vindo a aumentar.

A deslocação da Cabeça do Pato e o aumento das profundidades sobre pelo menos parte do Cachopo do Norte estão essencialmente associadas à intensidade das correntes de vazante e à alteração do equilíbrio entre as correntes de vazante e de enchente na presença da ondulação incidente. Este fenómeno fica a dever-se tanto à diminuição dos caudais de pico das cheias como à redução do prisma de maré do estuário. Contudo, não pode olvidar-se que as próprias dragagens de manutenção do “passe” da Barra também são susceptíveis de funcionar como sumidoiro de areias desse banco.

CONSEQUÊNCIAS PARA O EQUILÍBRIO MORFODINÂMICO DA REGIÃO

O Cachopo do Norte controla a passagem da ondulação do quadrante noroeste - cuja frequência anual tem o valor muito significativo de cerca de 95% (Referências [5], [6] e [7]) - em direcção quer ao interior do estuário quer à zona do Cachopo do Sul, situada a sueste da Barra Grande, quer ainda em direcção à zona das Goladas. As alterações que o banco tem vindo a sofrer, tanto da posição da sua extremidade como da sua profundidade, têm como consequência a perda da sua função de elemento dissipador da energia da ondulação proveniente das direcções mais frequentes.

O acréscimo de penetração da ondulação através da Barra Grande, que se verifica para determinadas direcções incidentes, traduz-se numa amplificação das chamadas “pancadas do mar”, fenómeno com que os Pilotos da Barra se confrontam aproximadamente a meio do percurso dessa barra, bem como em acréscimo de energia junto à margem direita do estuário, no troço da Estrada Marginal entre Caxias e Paço de Arcos. Em consequência do aumento da energia incidente sobre o Cachopo do Sul e sobre as Goladas assiste-se igualmente nestas zonas à intensificação do transporte de areias em direcção a norte, o que tem vindo a estreitar o próprio canal da Barra Grande junto ao Banco do Bugio. Mota Oliveira avaliou que a acumulação de areias sobre a vertente norte do Banco do Bugio atingiu 750 000 metros cúbicos por ano entre 1970 e 1985.



De forma esquemática, pode dizer-se que a região é sede de uma circulação de areias, com o sentido directo, que se representa na Figura [1]. Neste esquema a largura dos vectores é proporcional à taxa anual de transporte de areias calculada em modelo matemático. São de assinalar duas zonas de acumulação, uma sobre as vertentes norte e noroeste do Banco do

Bugio e outra precisamente sobre o “passe” da Barra. A primeira zona está associada ao transporte de areias sobre as Goladas em direcção a norte. A segunda zona encontra-se na intercepção de dois fluxos de transporte de areias que se estabelecem ao longo das vertentes dos dois Cachopos, dirigidos para sudoeste, e por isso é nela quase permanente a tendência para o assoreamento.

Os fluxos de areias representados no esquema estão referidos a uma dada situação morfológica. O não equilíbrio da circulação global representada induz uma evolução para outra situação morfológica, caracterizada essencialmente pelo avanço do Banco do Bugio em direcção a norte e a noroeste. Mota Oliveira estimou para esse avanço a velocidade de 16,4 metros por ano entre 1970 e 1985.

NECESSIDADE DE INTERVIR. OBJECTIVOS

As alterações morfodinâmicas a que se assiste no presente, na continuação da evolução registada no passado recente, têm consequências que interferem com as utilizações actuais e programadas da Região das Barras do Tejo. A par com a necessidade de continuar a assegurar condições de segurança da navegação e de navegabilidade para o tráfego marítimo actual e futuro, ocorre a necessidade de conferir protecção contra a agitação que penetra no interior do estuário e atinge a sua margem direita. Da mesma forma, em paralelo com a necessidade de robustecer a orla marítima da Costa da Caparica ocorre a necessidade de estancar o assoreamento na margem esquerda do estuário.

É neste contexto que foram estabelecidos os seguintes objectivos conjuntos para as eventuais intervenções a efectuar na região das Barras do Tejo:

- Aprofundar e manter a Barra Grande de forma a permitir o trânsito de navios até 17 metros de calado.
- Diminuir a incidência da ondulação na margem direita do estuário, designadamente entre Caxias e Paço de Arcos.
- Impedir o assoreamento do sector entre a Cova do Vapor e a Trafaria por areias provenientes das Goladas.
- Robustecer a orla costeira da Costa da Caparica através do seu enchimento com areias.

DISCUSSÃO DA ESTRATÉGIA PARA FUTURAS INTERVENÇÕES

A pesquisa dos tipos de intervenção susceptíveis de atingir os objectivos atrás enunciados foi subordinada a uma estratégia de retenção dos fluxos de areias dominantes na região, designadamente sobre os dois cachopos e na orla costeira da Costa de Caparica. A estratégia adoptada em trabalhos anteriores (APL, 1985 e APL, 1991, referências [2] e [4]), assentou no aumento da intensidade das correntes de vazante ao longo do canal da Barra através do fecho da Golada, em paralelo com a retenção de areias sobre o Banco do Bugio. A estratégia que tem vindo a ser adoptada na prática pela APL tem privilegiado a dragagem periódica do “passe” da Barra. Qualquer destes dois tipos de intervenção visou atingir apenas o primeiro dos objectivos enunciados.

A uma intervenção assente no aumento da intensidade das correntes sobre o canal da Barra, designadamente através do fecho do canal da Golada, foi pelo LNEC colocada prudente objecção, com base na impossibilidade de, no decurso dos estudos anteriores, se apurarem completamente as tendências de erosão e de deposição ao longo do canal da Barra Grande nas novas condições de hidrodinâmica. No presente Estudo, através do recurso ao Sistema de Modelos Matemáticos da Região das Barras do Tejo que para o efeito foi desenvolvido, verificou-se que, de facto, em paralelo com o pretendido aumento das correntes de vazante, aumentariam também as correntes de enchente. Desse modo, daquela intervenção resultariam efeitos negativos sobre o balanço sedimentar em alguns trechos do canal da Barra sem que pudesse ser totalmente garantida a sua eficácia sobre o desassoreamento do “passe” da Barra.

Por seu lado, uma solução assente na dragagem periódica do “passe” da Barra tem como consequências: a intensificação da tendência para o Cachopo do Norte se aproximar do “passe” da Barra, contribuindo para o seu assoreamento; e acréscimo da mobilização de areias sobre o Cachopo do Sul em direcção ao Banco do Bugio e, em seguida, para o canal da Barra, através do qual as areias atingirão a prazo a zona dragada. No entanto, pela sua economia relativa, foi retida a inclusão de dragagens periódicas como alternativa das intervenções subordinadas à estratégia de retenção de areias sobre os cachopos.

A adopção da estratégia de intercepção dos principais fluxos de areias da região e da respectiva contenção sobre um ou os dois cachopos e na orla costeira de Costa de Caparica decorreu da análise que foi efectuada do funcionamento do sistema morfodinâmico da região das Barras do Tejo e da sua evolução e do seu confronto com os objectivos que se pretende atingir, atrás enunciados. É validada pelo facto de se demonstrar que contribui para o reequilíbrio do sistema.

MÉTODO DO ESTUDO. SISTEMA DE MODELOS MATEMÁTICOS

A caracterização, tão avançada quanto possível, do comportamento morfodinâmico da região e o ensaio de soluções alternativas para as intervenções foi concretizada através do desenvolvimento de um sistema de modelos matemáticos com formulação bidimensional, constituído pelos cinco modelos a seguir indicados:

- modelo de propagação da maré;
- modelo de propagação da ondulação;
- modelo de propagação da maré e de correntes induzidas pelas ondas;
- modelo de transporte de sedimentos;
- modelo das tendências de evolução morfológica

Este sistema de modelos, baseado no sistema de modelos da Hidroprojecto, por diversas vezes aplicado e calibrado para o estuário do Tejo e zona costeira adjacente, simula os diferentes processos físicos que determinam o comportamento morfodinâmico da região. Nele assume relevância o modelo de propagação da ondulação, visto que o transporte sedimentar é controlado pela energia das ondas em vários sectores do domínio de cálculo. A sua aplicação requiriu uma criteriosa especificação de condições de fronteira a partir da caracterização do clima de agitação marítima da costa oeste. Apresentam-se no quadro seguinte as condições representativas do clima de agitação marítima que foram utilizadas. As ondas seleccionadas constituem não só as condições de fronteira dos modelos de propagação da ondulação e de correntes induzidas pelas ondas, mas também as condições de simulação do balanço anual de transporte de sedimentos não coesivos.

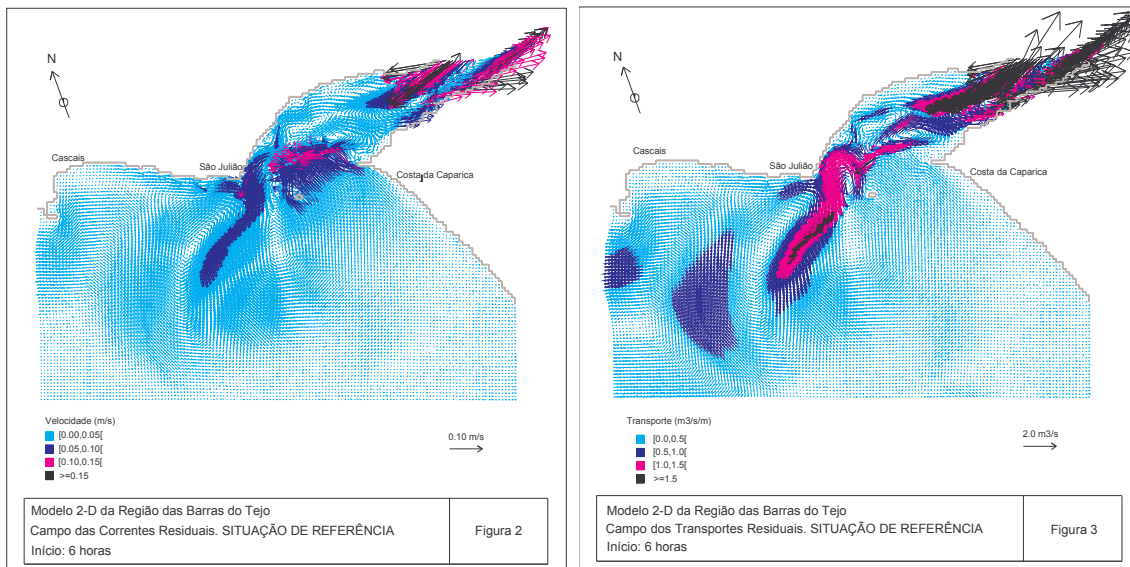
Ondas Representativas da Agitação Marítima
Seleccionadas para a Região das Barras do Tejo

CONDIÇÃO	ALTURA (M)	PERÍODO (S)	RUMO (°)	FREQUÊNCIA (%)
1	3.75	12	260	0.50
2	1.75	12	315	50.00
3	2.25	12	303.75	30.02
4	3.75	12	326.25	9.80
5	4.75	15	315	1.64
6	6.25	15	315	0.50
7	3.75	12	281.25	6.54
8	2.75	12	247.5	0.50
9	2.75	12	225	0.50

A sua aplicação foi enquadrada pelo estudo prévio da evolução da hidrografia da região através da comparação entre os levantamentos hidrográficos de 1964, 1996 e 2000, cuja apresentação sai do âmbito da presente comunicação.

CARACTERIZAÇÃO DA SITUAÇÃO ACTUAL

A caracterização da Situação de Referência através do recurso à modelação matemática assentou na hidrografia do levantamento de Junho de 2000 executado pelo IH por encomenda da APL. Os resultados da aplicação do modelo matemático de hidrodinâmica e do transporte e balanço sedimentares para essa situação estão representados nas Figuras [2] a [4].

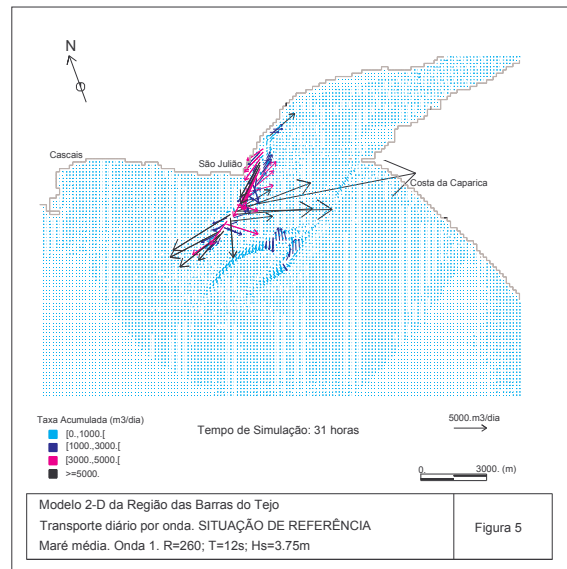
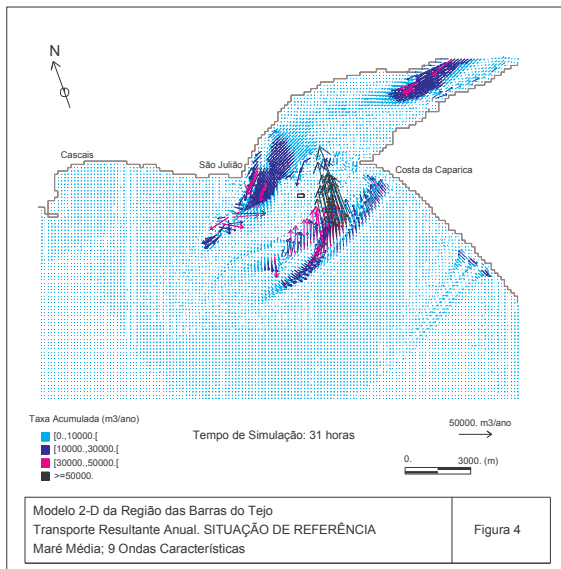


As Figuras [2] e [3] representam os resultados para a situação de referência respectivamente da velocidade e do transporte residual instantâneo associado à propagação da maré. As Figuras mostram que, actualmente, o escoamento do prisma de maré não está confinado às barras e a um canal junto ao esporão da Calha – Golada - como sucedia no princípio da década de 90. Nessa época o Banco do Bugio praticamente não era coberto por água. Pelo contrário, toda a extensa zona a leste do Bugio está actualmente sujeita a correntes de enchente e de vazante, devido a nela ter ocorrido um aumento generalizado das profundidades. No entanto, a maior parte do prisma de maré esco-se pela Barra Grande, dando origem, em marés médias, a correntes cuja intensidade máxima excede 1 metro por segundo (2 nós) sobre o eixo da Barra.

De cada um dos lados da Barra Grande a intensidade das correntes de enchente é superior à das correntes de vazante. Este aspecto vem a traduzir-se em correntes residuais de enchente na Barra Norte e sobre o Banco do Bugio, como pode ser verificado nas Figuras [2] e [3]. No “Corredor do Tejo” as circulações são predominantemente de vazante ao longo da margem norte e de enchente ao longo da margem sul.. Embora os padrões da circulação residual sejam melhor visualizados nos campos da velocidade residual, a importância relativa dos vários fluxos é melhor traduzida pelos campos do transporte residual de massa, isto é, pela quantidade de água que atravessa a coluna de água em cada célula.

A Figura [4] representa o transporte resultante anual de sedimentos, por acção de ondas e correntes, que se obtém através da extrapolação dos transportes diários calculados para as nove ondas representativas. O intenso transporte sobre o Cachopo do Sul e a zona das goladas em direcção ao Banco do Bugio bem como o intenso transporte no Canal da Barra na

zona entre S. Julião e a Torre do Bugio constituem os aspectos mais relevantes a reter nestes resultados.



Assinalam-se também os transportes que se estabelecem sobre ambos os Cachopos em direcção ao “passe” da Barra. Ainda que a escala destes fluxos seja inferior à dos atrás referidos, assumem significativa importância, atendendo a que influem sobre a zona mais sensível para a navegabilidade do Canal da Barra. Regista-se, por fim, que o transporte em frente à Praia da Costa da Caparica se processa a uma distância de terra superior ao comprimento dos actuais esporões de retenção desse sector, o que explica a reduzida eficácia actual dessas estruturas e aponta para o seu prolongamento e conseqüente redução em número.

A análise dos resultados relativos aos transportes diários relativos a cada onda, de que se retêm apenas na Figura [5] os resultados referentes à onda 1, indica que: o transporte sobre o sector exterior do Cachopo do Sul e a tendência para deposição sobre essas zonas estão associadas sobretudo à acção das ondas 1, 5, 6 e 7. As ondas 8 e 9 são responsáveis pelo transporte e depósito nos sectores interiores da zona, designadamente sobre o Banco do Bugio. Deste modo, confirma-se que ao longo do ano a zona, em toda a sua extensão e sucessivamente, é sede de um transporte de areias em direcção ao norte e ao noroeste, isto é, em direcção ao banco do Bugio. O avanço da Cabeça do Pato e de areias do Cachopo do Sul em direcção ao “passe” da Barra são suportados pela acção da onda 1. As ondas 7, 8 e 9 produzem avanços de areia sobre o canal da Barra na zona próxima do alinhamento S. Julião – Bugio.

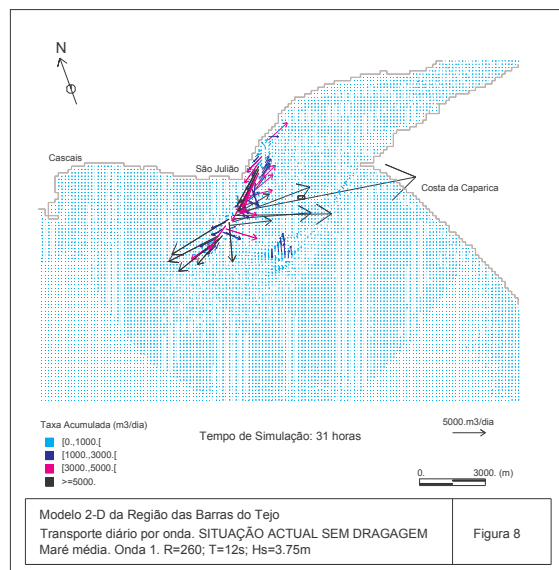
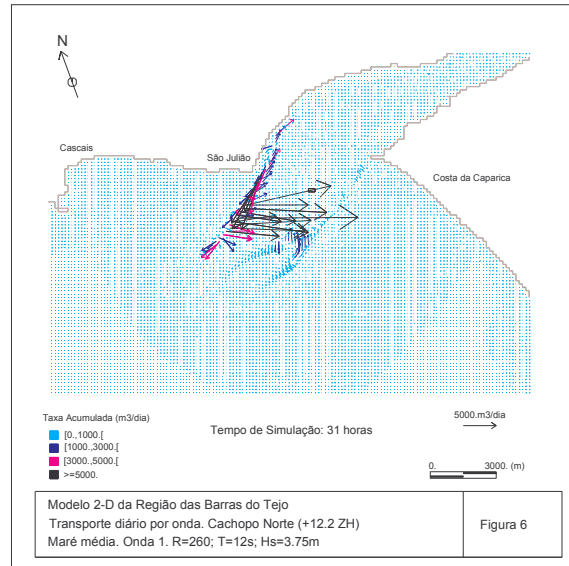
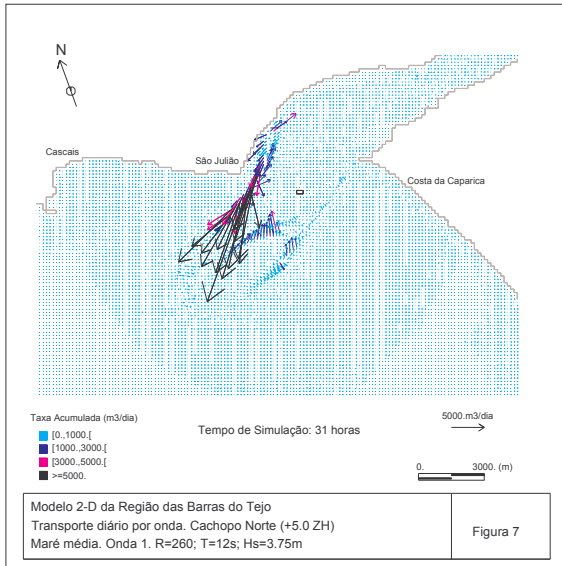
A análise das figuras indica distribuições espaciais distintas: enquanto nas duas primeiras figuras a acção das correntes assume maior relevância sobre os canais e barras Sul e Norte, bem como sobre as margens adjacentes, na segunda a acção conjugada de correntes e ondas evidencia, para além da zona anterior, as zonas do cachopo do Norte, do cachopo do Sul e Banco do Bugio, permitindo identificar claramente a contribuição determinante da acção da agitação marítima para o equilíbrio morfodinâmico da região das barras do Tejo.

ENSAIOS DE SENSIBILIDADE À VARIAÇÃO DA BATIMETRIA

Além da aplicação à Situação de Referência, o sistema de modelos foi aplicado às seguintes situações vizinhas daquela:

- Aprofundamento do Cachopo do Norte para profundidades de 12 metros, Figura [6].

- Enchimento do Cachopo do Norte para profundidades de 5 metros, Figura [7].
- Ausência de dragagem no “passe” da Barra, através da fixação da sua profundidade em 11 metros, Figura [8].



Com estas simulações visou-se analisar a sensibilidade do sistema à variação das profundidades no Cachopo do Norte e no “passe” da Barra. Para efeito desta análise retiveram-se apenas os resultados referentes à onda 1. Com base no conjunto destes resultados e nas análises feitas nos estudos anteriores, nomeadamente Mota Oliveira (1994) e LNEC (1998), é possível estabelecer-se que, na situação actual, o equilíbrio morfodinâmico na região das Barras do Tejo é caracterizado pelos seguintes processos dominantes, com influência directa nas profundidades do “passe” da Barra:

- Arrastamento de areias em direcção à zona do “passe” da Barra, quer ao longo do canal da Barra quer sobre as vertentes dos Cachopos do Norte e do Sul.

- b) Reacção do Cachopo do Norte em função da interacção que, em cada situação, se estabelece entre ondas e correntes sobre grande parte do canal da Barra:
- Ao aumento das profundidades sobre o Cachopo do Norte correspondem acréscimos dos índices de agitação ao longo do canal da Barra e sobre os bordos do Banco do Bugio. Estes factores proporcionam acréscimo da disponibilidade de areias a montante e acréscimo do respectivo transporte para jusante, designadamente em direcção ao Cachopo do Norte. Desta acção resulta que tendem a ser repostas sobre esse cachopo as profundidades menores anteriores à intervenção, tendendo assim a restabelecer-se o equilíbrio artificialmente alterado.
 - Inversamente, a uma diminuição das profundidades sobre o Cachopo do Norte corresponde o decréscimo dos índices de agitação nas referidas zonas a montante e a diminuição das taxas de transporte em direcção ao mar, proporcionando a erosão do Cachopo até às profundidades de equilíbrio, desta vez superiores às provocadas pela intervenção.
- c) Arrastamento das areias conduzidas para o Cachopo do Sul em direcção às Goladas e aos bordos norte e noroeste respectivamente do Banco do Bugio e do próprio Cachopo do Sul. Uma vez acumuladas nestas faixas confinantes com o canal da Barra, essas areias depositam-se em seguida no próprio canal, onde são transportadas em direcção ao mar, como referido na alínea a).

Estes resultados estão de acordo com a evolução hidrográfica que a região tem vindo a sofrer - o que se procura sintetizar no esquema apresentado na Figura [1] - evolução essa detectada na comparação atrás referida entre os levantamentos de 1964, 1996 e 2000, mas também nas análises efectuadas nos anteriores estudos já referidos, cujos resultados fundamentais se citam seguidamente:

Entre 1964 e 2000 aparece um aumento da profundidade em volta da Cabeça do Pato. A sueste, essa alteração deve-se às dragagens de manutenção do "passe" da Barra. As erosões que se constata a norte e a leste traduzem o deslocamento dessa parte do banco para sueste. É interessante notar que, em distância percorrida, esta evolução é aproximadamente igual entre 1964 e 1996 e entre 1996 e 2000. Isto indica, claramente, um forte aumento da velocidade de deslocamento dessa extremidade do Cachopo do Norte.

No bordo contrário da Barra, o Banco do Bugio desloca-se para oeste, registando-se forte erosão a leste e assoreamento a noroeste e, mais recentemente, a nordeste. Esta evolução pode ser o resultado, evocado por Professor Mota Oliveira, do ataque oblíquo das ondas sobre o talude exterior do Banco do Bugio. Através da comparação das cartas do IH de 1993 e 1998, foi possível assinalar a evolução do Banco do Bugio durante os últimos anos, que é extremamente rápida: entre essas duas datas, o Banco imergido quase desaparece, para se reduzir a uma pequena acumulação de areia no nordeste. As profundidades aumentam a sul do banco, mas diminuem a noroeste. Este deslocamento do Banco do Bugio em direcção a noroeste não foi previsto em nenhum dos estudos anteriores. Actualmente, este banco não assegura a ligação entre a costa e farol do Bugio. Este fenómeno é provavelmente a consequência dos correntes de enchente de maré.

Pode dizer-se que o "rompimento da Golada" acelera muito. É interessante ver que esse fenómeno é acompanhado por uma aceleração do deslocamento do Bico do Pato, confirmando a correlação identificada por Mota Oliveira. Também se observa uma tendência geral de assoreamento (muito lento) no estuário, e em particular no "corredor". Isto confirmaria que o escoamento por cima do Banco está a desaparecer, e que assim o rompimento tem uma acção de assoreamento do estuário. Com esta situação, a interrupção deste processo é ao mesmo tempo mais urgente e mais difícil.

PARTE II - CONDIÇÕES DE PRÁTICA DAS BARRAS DO TEJO PELA NAVEGAÇÃO

Como aplicação subsidiária do Estudo foram definidas as condições de prática das Barras do Tejo pela navegação à custa da determinação da probabilidade conjunta de ocorrência da altura significativa das ondas e das alturas de maré, tendo presente o resguardo a observar sob a quilha dos navios, sendo também deduzidas as respectivas taxas de operacionalidade.

A fixação das condições de prática das Barras do Tejo pela navegação assenta na caracterização das condições hidrográficas, oceanográficas e meteorológicas prevaletes na região e na observância de valores de resguardo sob a quilha em consonância com a arte de navegar. A estimativa das taxas de operacionalidade em função do calado é obtida à custa das estatísticas maregráficas e do clima de agitação marítima da região (Referências [5] a [14]).

No desenvolvimento do presente trabalho foi adaptado o modelo de caracterização dos resguardos sob a quilha publicado pelo Instituto Hidrográfico (IH) e divulgado pelo Aviso aos Navegantes (AN) no seu Grupo Anual, publicado no início de cada ano.

Nesta parte do trabalho teve-se a colaboração do Capitão da Marinha Mercante Spínola Pitta, à época chefe do Departamento de Pilotos da APL, sendo seus destinatários os Pilotos da Barra, os Capitães e Armadores dos navios e os Agentes de Navegação.

CARACTERIZAÇÃO DAS CONDIÇÕES NÁUTICAS

Hidrografia

A ligação principal do Porto de Lisboa ao mar faz-se através da Barra Grande ou Barra Sul, cuja orientação, definida pelo enfiamento das marcas Gibalta, Esteiro e Mama, é aproximadamente nordeste-sudoeste. No seu troço de jusante - 2 000 metros para montante da bóia n.º2 - a Barra Sul é um canal dragado com largura de 200 metros. Apesar de a zona envolvente dos Cachopos Norte e Sul ser dinamicamente muito activa, a orientação da Barra Sul mantém-se estável há vários séculos.

Na ausência de intervenções de dragagem, a sonda mínima sobre o passe da Barra Sul tende para 12 metros. Contudo, a APL conduz periodicamente dragagens de manutenção nesta barra de forma a assegurar a sonda mínima de 15 metros.

A Barra Norte corre junto à margem, aproximadamente segundo a direcção leste-oeste. A sonda mínima na Barra Norte é de 5 metros. Esta barra apenas constitui um acesso alternativo para navios de Tonelagem Bruta (TB) inferior a 5000 toneladas.

Marés e correntes

As alturas de maré na região das Barras do Tejo oscilam entre os valores extremos de 3,8 e 0,4 metros. Em marés de águas vivas as alturas médias de preia-mar e baixa-mar, PMAV e BMAV, são respectivamente 3,5 e 0,7 metros. A distribuição dos tempos de permanência da maré acima de uma determinada altura, calculada com base na previsão da maré para Cascais, é indicada no Quadro seguinte.

Quadro 1 - Distribuição dos Tempos de Permanência das Alturas de Maré

Altura de maré (m)	0,5	0,75	1,0	1,25	1,5	1,75	2,0	2,25	2,5	2,75	3,0	3,25	3,5	3,75
Percentagem Acumulada de Permanência Acima da Altura de Maré (%)	99,6	97,1	91,4	82,7	71,8	61,3	52,4	44,0	34,6	23,8	13,7	6,2	1,6	0,2

As correntes nas Barras do Tejo são praticamente só de maré, não excedendo 5 nós. A intensidade das correntes de deriva de vento bem como das associadas a cheias do Tejo são desprezáveis perante a intensidade das correntes de maré.

As correntes de vazante produzem aumento significativo da declividade das ondas na Barra Sul para os rumos mais frequentes da ondulação. Para alturas significativas da onda superiores a 2 metros esse fenómeno tem incidência na manobra dos navios, nomeadamente na zona designada por “pancadas do mar”, que se estabelece na Barra Sul entre 2 e 3 milhas de distância do Forte de S.Julião da Barra.

Agitação marítima

A Barra Sul está muito exposta à agitação marítima, quer a gerada no Atlântico Norte – “mar de fora” – quer a gerada localmente – Sudoestes e Oestes – pelo que o espectro da ondulação é bastante largo, tanto em altura, como em período e direcção.

Para navios de calados superiores a 10 metros, as ondas que podem interferir com a operacionalidade das Barras do Tejo são as de altura superior a 3 metros que, nos meses de Inverno (de Outubro a Março) ocorrem em 31% dos dias, dos quais 13% são de ondas superiores a 4 metros (3,5% dos quais são devidos a ondas do largo, isto é, ondulação).

Para uso da navegação são de considerar as distribuições da altura significativa das ondas indicadas nos dois Quadros seguintes, respectivamente para um ponto situado na Barra Sul e outro situado sobre a batimétrica de 30 metros, a oeste do “passe” desta barra.

Quadro 2 - Distribuição de Alturas Significativas na Barra Sul

Altura Significativa (m)	Frequência de Ocorrência Acumulada (%)	Probabilidade de Excedência (%)
0,5	8.6	91.4
1,0	33.7	66.3
1,5	60.8	30.2
2,0	78.2	21.8
2,5	88.2	11.8
3,0	93.0	7.0
3,5	96.5	3.5
4,0	98,7	1.3

Quadro 3 - Distribuição de Alturas Significativas sobre a Batimétrica de 30 metros

Altura Significativa (m)	Frequência de Ocorrência Acumulada (%)	Probabilidade de Excedência (%)
0,5	5,1	94.9
1,0	20,2	79.4
1,5	71,5	28.5
2,0	86.1	13.9
2,5	93.3	6.7
3,0	96.6	3.4
3,5	98.3	1.7
4,0	99.2	0.8

Este regime foi estabelecido com base em diversos estudos, de transposição do regime em águas profundas para a região das Barras do Tejo, anteriormente referidos, a partir dos registos de ondógrafos fundeados quer ao largo da Figueira da Foz quer ao largo de Sines. Em face dos resultados apresentados nos dois quadros anteriores optou-se por reter os relativos ao Quadro 2, por serem os mais desfavoráveis, ainda que se possam considerar os do Quadro I como mais coerentes. O regime de agitação marítima nas Barras do Tejo pode ser revisto em função das conclusões de estudos específicos a executar com recurso em simultâneo à instalação de ondógrafos e à aplicação de modelos matemáticos nesta região.

Breve nota sobre a meteorologia marítima

Do ponto de vista da meteorologia local podem definir-se as seguintes situações adversas para a prática das Barras do Tejo:

- **Mar de Sudoeste** – condições de agitação marítima associadas a depressões ou superfícies frontais, originando áreas de geração de vento e mar de sudoeste junto à costa.

São características as situações correspondentes à aproximação de superfícies frontais frias e as de depressões quase estacionárias centradas a sudoeste da Península Ibérica. Ocorrem principalmente no Inverno e nos períodos de transição. A primeira destas situações é geralmente de curta duração - cerca de um dia – e origina agitação marítima com espectro largo, por também incluir componentes de noroeste, formando mar cruzado. A segunda situação é mais persistente - alguns dias - e os correspondentes espectros são mais estreitos na direcção que os anteriores.

São características do Mar de Sudoeste alturas das ondas de 3 a 4 metros com períodos de 9 a 10 segundos mas não é raro atingirem 7 metros no caso da aproximação de superfícies frontais associadas a depressões muito cavadas. Com Mar de Sudoeste a região entre os cabos Raso e Espichel é atingida por uma agitação marítima com alturas pouco inferiores às que ocorrem no resto da costa.

- **Temporal de Oeste** – quando a frente polar se desloca para sul aparecem áreas de geração à latitude de Portugal com ventos de sudoeste. Estas áreas de geração deslocam-se rapidamente para leste desenvolvendo ondulação forte ou muito forte de oeste que atinge a costa ocidental portuguesa.

Estas perturbações frontais atravessam a costa em sucessão rápida originando ventos por vezes fortes de sudoeste e mar grosso ou alteroso. Estas condições persistem por períodos da ordem de oito dias, por vezes mais e originam prolongadas situações de temporal em toda a costa ocidental. São características do período de Inverno, ocorrendo em média cerca de uma vez por ano, gerando ondulação de oeste e vaga de sudoeste) que pode atingir 8 metros na parte norte e cerca de 7 metros mais para sul, com períodos de cerca de 16 segundos. Raramente, em média de 10 em 10 anos, a agitação marítima associada ao temporal de oeste chega a atingir 10 metros.

RESGUARDOS SOB A QUILHA A OBSERVAR NAS BARRAS DO TEJO

Adoptou-se o modelo do IH para a caracterização dos resguardos sob a quilha. Neste contexto, foram adoptados os seguintes resguardos sob a quilha a observar nas Barras do Tejo, em condições de barra aberta:

a) Parâmetros físicos e meteorológicos:

- A incerteza nos levantamentos 0,10 m
- A incerteza nas previsões das marés 0,10 m
- Depósito entre dragagens 0,50 m
- A incerteza na leitura dos calados 0,10 m

- O contra-alquebramento 0,10 m
 - O assentamento (“squat”) 0,30 m
- Total **1,20 m**

No caso vertente não são de reter resguardos para a variação do calado com a densidade da água e para a pressão atmosférica.

- b) Pé-de-piloto: 1,00 m
- Total **2,20 m**

c) Efeito de ondulação

Os efeitos associados ao balanço, cabeceio e arfar, que representam os três movimentos associados aos graus de liberdade do navio (2 rotações e 1 translação) podem englobar-se num único movimento vertical, função da altura da onda, o qual provoca uma sobre imersão, **f(h)**, representada pela expressão seguinte:

$$f(h) = \left(\frac{2h}{3}\right)^3 - \frac{1}{3} [m]$$

em que h é a altura da onda, expressa em metros que, para efeitos de segurança, deverá ser a máxima contida no espectro, isto é, **H1/10 = 1,27 HS**. Entende-se que esta fórmula é válida para ondas de altura significativa entre 0,5 e 4 metros. Para alturas significativas superiores a 4 metros, o resguardo a observar sob a quilha fica ao inteiro critério do Piloto da Barra. Em condições de mar grosso ou alteroso, além da altura da onda deverão ser retidas na avaliação do resguardo tanto a relação entre o comprimento do navio e o período da ondulação, como o ângulo entre o rumo do navio e a direcção da ondulação incidente.

CONDIÇÕES GERAIS DE PRÁTICA DAS BARRAS

Barra Sul

Indicam-se no Quadro seguinte os calados máximos admissíveis na Barra Sul para cada par de condições de altura de maré, Hmaré, e de altura significativa das ondas, Hs, para a sonda mínima de 15 metros. A sua determinação assentou na aplicação dos critérios de resguardo sob a quilha atrás fixados.

Quadro 4 - Calados Máximos Admissíveis (m) na Barra Sul com a Sonda Mínima de 15 m

Hs (m)	H maré (m)													
	0,5	0,75	1	1,25	1,5	1,75	2	2,25	2,5	2,75	3	3,25	3,5	3,75
0,5	13,3	13,6	13,8	14,1	14,3	14,6	14,8	15,1	15,3	15,6	15,8	16,1	16,3	16,6
0,75	13,1	13,3	13,6	13,8	14,1	14,3	14,6	14,8	15,1	15,3	15,6	15,8	16,1	16,3
1	12,8	13,1	13,3	13,6	13,8	14,1	14,3	14,6	14,8	15,1	15,3	15,6	15,8	16,1
1,25	12,6	12,8	13,1	13,3	13,6	13,8	14,1	14,3	14,6	14,8	15,1	15,3	15,6	15,8
1,5	12,3	12,5	12,8	13,0	13,3	13,5	13,8	14,0	14,3	14,5	14,8	15,0	15,3	15,5
1,75	11,9	12,2	12,4	12,7	12,9	13,2	13,4	13,7	13,9	14,2	14,4	14,7	14,9	15,2
2	11,6	11,9	12,1	12,4	12,6	12,9	13,1	13,4	13,6	13,9	14,1	14,4	14,6	14,9
2,25	11,3	11,5	11,8	12,0	12,3	12,5	12,8	13,0	13,3	13,5	13,8	14,0	14,3	14,5
2,5	10,9	11,2	11,4	11,7	11,9	12,2	12,4	12,7	12,9	13,2	13,4	13,7	13,9	14,2
2,75	10,5	10,8	11,0	11,3	11,5	11,8	12,0	12,3	12,5	12,8	13,0	13,3	13,5	13,8
3	10,2	10,4	10,7	10,9	11,2	11,4	11,7	11,9	12,2	12,4	12,7	12,9	13,2	13,4
3,25	9,8	10,0	10,3	10,5	10,8	11,0	11,3	11,5	11,8	12,0	12,3	12,5	12,8	13,0
3,5	9,4	9,6	9,9	10,1	10,4	10,6	10,9	11,1	11,4	11,6	11,9	12,1	12,4	12,6
3,75	9,0	9,2	9,5	9,7	10,0	10,2	10,5	10,7	11,0	11,2	11,5	11,7	12,0	12,2
4	8,5	8,8	9,0	9,3	9,5	9,8	10,0	10,3	10,5	10,8	11,0	11,3	11,5	11,8

Para sondas mínimas inferiores a 15 metros o calado máximo admissível obtém-se subtraindo aos valores do Quadro 4 a diferença da sonda mínima para o valor de 15 metros.

O calado máximo admissível na ocorrência de ondas de altura máxima inferior a 0,5 metros – praticamente mar chão – obtém-se adicionando 0,5 metros ao calado máximo admissível para ondas de $H_s = 0,5$ metros.

Barra Norte

Indicam-se no Quadro 5 os calados máximos admissíveis na Barra Norte para cada par de condições de altura de maré, $H_{maré}$, e de altura significativa das ondas, H_s . Na sua determinação foi adoptada a sonda mínima de 5 metros.

Quadro 5 - Calados Máximos Admissíveis (m) na Barra Norte com a sonda mínima de 5m

Hs (m)	H maré (m)													
	0,5	0,75	1	1,25	1,5	1,75	2	2,25	2,5	2,75	3	3,25	3,5	3,75
0,5	3,3	3,6	3,8	4,1	4,3	4,6	4,8	5,1	5,3	5,6	5,8	6,1	6,3	6,6
0,75	3,1	3,3	3,6	3,8	4,1	4,3	4,6	4,8	5,1	5,3	5,6	5,8	6,1	6,3
1	2,8	3,1	3,3	3,6	3,8	4,1	4,3	4,6	4,8	5,1	5,3	5,6	5,8	6,1
1,25	2,6	2,8	3,1	3,3	3,6	3,8	4,1	4,3	4,6	4,8	5,1	5,3	5,6	5,8
1,5	2,3	2,5	2,8	3,0	3,3	3,5	3,8	4,0	4,3	4,5	4,8	5,0	5,3	5,5
1,75	1,9	2,2	2,4	2,7	2,9	3,2	3,4	3,7	3,9	4,2	4,4	4,7	4,9	5,2
2	1,6	1,9	2,1	2,4	2,6	2,9	3,1	3,4	3,6	3,9	4,1	4,4	4,6	4,9
2,25	1,3	1,5	1,8	2,0	2,3	2,5	2,8	3,0	3,3	3,5	3,8	4,0	4,3	4,5
2,5	0,9	1,2	1,4	1,7	1,9	2,2	2,4	2,7	2,9	3,2	3,4	3,7	3,9	4,2
2,75	0,5	0,8	1,0	1,3	1,5	1,8	2,0	2,3	2,5	2,8	3,0	3,3	3,5	3,8
3	0,2	0,4	0,7	0,9	1,2	1,4	1,7	1,9	2,2	2,4	2,7	2,9	3,2	3,4

OPERACIONALIDADE DA BARRA SUL

Probabilidades conjuntas

A operacionalidade da Barra Sul, única que interessa considerar, decorre dos calados máximos admitidos para cada condição de agitação marítima e de maré e das distribuições da altura de maré e da altura das ondas no local.

Indica-se no Quadro 6 a probabilidade conjunta, P , de permanência da altura significativa das ondas, H_s , abaixo de um determinado valor e de permanência da altura da maré, $H_{maré}$, acima de um valor dado, calculada com base na distribuição da altura de maré do marégrafo de Cascais e na distribuição da altura significativa na Barra Sul, indicadas, respectivamente, nos Quadros 1 e 2.

Taxas de operacionalidade

As taxas de operacionalidade da Barra Sul, referidas ao ano, estão indicadas no Quadro 7. No seu cálculo, adoptou-se o valor de 15 metros para a sonda mínima nesta barra, valor que pressupõe a realização de dragagens de manutenção periódicas.

Quadro 6 - Probabilidade conjunta (%) altura de maré – altura significativa da onda

		H maré (m)													
		0,5	0,75	1	1,25	1,5	1,75	2	2,25	2,5	2,75	3	3,25	3,5	3,75
Hs (m)	%	99,6	97,1	91,4	82,7	71,8	61,3	52,4	44	34,6	23,8	13,7	6,2	1,6	0,2
0,5	8,6	8,6	8,4	7,9	7,1	6,2	5,3	4,5	3,8	3,0	2,0	1,2	0,5	0,1	0,0
0,75	21,15	21,1	20,5	19,3	17,5	15,2	13,0	11,1	9,3	7,3	5,0	2,9	1,3	0,3	0,0
1	33,7	33,6	32,7	30,8	27,9	24,2	20,7	17,7	14,8	11,7	8,0	4,6	2,1	0,5	0,1
1,25	47,25	47,1	45,9	43,2	39,1	33,9	29,0	24,8	20,8	16,3	11,2	6,5	2,9	0,8	0,1
1,5	60,8	60,6	59,0	55,6	50,3	43,7	37,3	31,9	26,8	21,0	14,5	8,3	3,8	1,0	0,1
1,75	69,5	69,2	67,5	63,5	57,5	49,9	42,6	36,4	30,6	24,0	16,5	9,5	4,3	1,1	0,1
2	78,2	77,9	75,9	71,5	64,7	56,1	47,9	41,0	34,4	27,1	18,6	10,7	4,8	1,3	0,2
2,25	83,2	82,9	80,8	76,0	68,8	59,7	51,0	43,6	36,6	28,8	19,8	11,4	5,2	1,3	0,2
2,5	88,2	87,8	85,6	80,6	72,9	63,3	54,1	46,2	38,8	30,5	21,0	12,1	5,5	1,4	0,2
2,75	90,6	90,2	88,0	82,8	74,9	65,1	55,5	47,5	39,9	31,3	21,6	12,4	5,6	1,4	0,2
3	93	92,6	90,3	85,0	76,9	66,8	57,0	48,7	40,9	32,2	22,1	12,7	5,8	1,5	0,2
3,25	94,75	94,4	92,0	86,6	78,4	68,0	58,1	49,6	41,7	32,8	22,6	13,0	5,9	1,5	0,2
3,5	96,5	96,1	93,7	88,2	79,8	69,3	59,2	50,6	42,5	33,4	23,0	13,2	6,0	1,5	0,2
3,75	97,6	97,2	94,8	89,2	80,7	70,1	59,8	51,1	42,9	33,8	23,2	13,4	6,1	1,6	0,2
4	98,7	98,3	95,8	90,2	81,6	70,9	60,5	51,7	43,4	34,2	23,5	13,5	6,1	1,6	0,2

Quadro 7 - Taxas Anuais de Operacionalidade da Barra Sul

Calado (m)	Taxa Acumulada de Operacionalidade	
	(%)	(dias)
16	1	3
15	14	51
14	41	150
13	70	256
12	87	318
11	94	343
10	97	354
9	98	358
< 8,5	Quasi-permanente	

CONCLUSÕES

Da análise conjunta dos resultados para a situação de referência, dos testes de sensibilidade simulados e das comparações hidrográficas efectuadas extrai-se a conclusão geral de que para assegurar a manutenção do actual equilíbrio da região é indispensável intervir a barlar do canal da Barra Grande, isto é, na zona da Cabeça do Pato e sobre o Cachopo do Norte. Especificamente, a intervenção principal que se preconiza consiste em implantar um dique ou quebra-mar submersos na zona da Cabeça do Pato, que funcione simultaneamente como dique de retenção dos fluxos de areias que desse banco se dirigem para o canal da Barra.

De forma a interceptar os fluxos de areias que, a nordeste do Canal da Barra, percorrem o Banco do Bugio e a zona das Goladas em direcção a norte e a noroeste e que produzem assoreamento do Canal de Navegação, preconiza-se também, em princípio, a implantação de um dique de retenção dessas areias. No entanto, face à redução da intensidade desses fluxos que o próprio quebra-mar sobre o Cachopo do Norte proporciona, a necessidade dessa intervenção deve ser confirmada em função dos resultados da monitorização dos efeitos da intervenção na Cabeça do Pato. Como intervenção complementar daquelas preconiza-se o

prolongamento de dois dos esporões da Costa de Caparica até à batimétrica de 5 metros, numa extensão total de 700 metros.

Ao dar por concluído o presente Estudo cabe dizer que o conjunto de resultados obtidos aponta para uma elevada complexidade do sistema morfodinâmico da Região das Barras do Tejo. Apesar de se ter recorrido a métodos avançados de análise de sistemas e de, por essa via, se julgar ter conseguido aprofundar alguns dos aspectos menos esclarecidos do comportamento morfodinâmico da região, compete-nos registar que persistem outros aspectos que não foi possível esclarecer completamente.

Pertence ao grupo dos aspectos que se aprofundaram a confirmação da ausência de efeitos de desassoreamento da zona do “passe” da Barra das intervenções de intensificação das correntes de vazante, à custa do fecho da Golada, ou da implantação de um dique de correntes ao longo do bordo nordeste do canal da Barra. Acontece que estas intervenções também induzem uma intensificação das correntes de enchente que, na presença da ondulação, contraria o efeito pretendido.

Permanecem no entanto dúvidas em relação ao comportamento do sistema quanto:

- ao padrão de acumulação de areias nos sectores situados a noroeste do dique do Cachopo do Norte e a sueste do dique do Cachopo do Sul.
- ao processo de acumulação que se estabelecerá junto à Golada actual em conexão com o efeito do prolongamento dos esporões da Costa de Caparica.

Quer para aprofundar o conhecimento do regime morfodinâmico da região quer para a implementação das condições de prática das barras por parte da Pilotagem das Barras do Tejo foram elaboradas especificações para a monitorização da agitação marítima através de dois ondógrafos, sendo um fixo e de superfície e outro móvel e de fundo cuja exploração, além de servir directamente a Pilotagem pode ser utilizada em conexão com o aperfeiçoamento do sistema de modelos matemáticos da região das Barras do Tejo.

REFERÊNCIAS:

- [1] – Academia de Marinha: Melhoria das Condições de Acesso pela Barra Sul, Mota Oliveira, I., 1994
- [2] – APL: Melhoria das Condições de Acesso pela Barra Sul, Hidrotécnica Portuguesa, 1985
- [3] – APL: O Transporte Marítimo, a Evolução Hidrográfica do Porto de Lisboa e outras Reflexões, Almirante A. Sousa Leitão, 1990
- [4] – APL: Obra de Fecho da Golada entre a Cova do Vapor e o Bugio – Estudo de Impacte Ambiental, HP, 1991
- [5] – APL: Estudo de Viabilidade de Implantação dum Terminal de Contentores de Águas Profundas na Zona Portuária de Algés, CONSULMAR, 1996
- [6] – APL: Minimização das Dragagens na Embocadura do Estuário do Tejo – Análise de Soluções Alternativas, LNEC, 1998
- [7] – APL: Doca de Pedrouços. Ribeira de Barcarena – Caracterização da Agitação Marítima, LNEC, 1998
- [8] – Sverdrup, H.U. and W.H. Munk: Wind, Sea and Swell: Theory of Relations for Forecasting – HO Pub. N.º 601;
- [9] – HO: Observing and Forecasting Ocean Waves – HO Pub. N.º 603
- [10] – IH: NATO PO-WAVES – Wind Wave Climatology of the Portuguese Coast, 1992.
- [11] - Instituto Nacional de Meteorologia e Geofísica: Elementos Estatísticos de Ventos e Agitação Marítima.

[12] - Myers, Holm and McAllister: Handbook of Ocean and Underwater Engineering — McGraw-Hill Book Company.

[13] – Rawson, K.J. and E.C. Tupper: Basic Ship Theory

[14] - Waves Forecasting – WMO;