

MELHORIA DA ACESSIBILIDADE E DAS CONDIÇÕES DE SEGURANÇA

NA BARRA DO DOURO

LUÍS PEIXEIRO – CONSULMAR

ADÉLIO SILVA – HIDROMOD

Sumário

Os estudos realizados referem-se às obras necessárias à criação de um canal de navegação na embocadura do rio Douro, com fundos compatíveis, que sirva as necessidades operacionais e de segurança da navegação fluvio-marítima.

Os aspectos hidromorfológicos constituem uma das componentes mais relevantes do estudo e neles se apoia a definição de parâmetros de grande importância para a concepção e dimensionamento das obras e intervenções visadas, relacionados com a avaliação da sua eficácia funcional e a minimização dos impactes ambientais e dos encargos de manutenção das dragagens e obras fixas que será necessário realizar para conseguir um acesso seguro à embocadura do Douro.

Para a análise dos aspectos hidráulicos e aluvionares, dada a complexidade de que se revestem, por se estar em presença de correntes de maré, agitação marítima e dos seus efeitos conjugados, recorreu-se largamente à modelação matemática, tendo sido implementado um modelo hidromorfológico do estuário do Douro e da zona costeira adjacente, baseado no sistema MOHID.

Este modelo, para além de ser usado como ferramenta de apoio aos estudos de engenharia e impacte ambiental específicos, teve ainda como objectivo contribuir para uma melhor compreensão da hidrodinâmica e dos fenómenos de transporte locais.

1 - INTRODUÇÃO

A barra do rio Douro sempre proporcionou a toda a navegação condições de utilização extremamente desfavoráveis. Nos últimos anos, essas condições têm-se deteriorado, obrigando a dragagens permanentes para manter uma situação, mesmo assim precária, de barra aberta a navios de pequeno porte, tendo-se identificado como principais dificuldades, as devidas à grande instabilidade dos fundos, à falta de abrigo contra a agitação marítima e à ocorrência de fortes correntes na embocadura, particularmente nos períodos de maiores caudais fluviais.

Os estudos a que se reporta a presente comunicação foram realizados para a Administração dos Portos do Douro e Leixões e referem-se às obras para melhoria da acessibilidade e das condições de segurança na barra do Douro.

2 - AS CONDIÇÕES NATURAIS

Embora interesse fundamentalmente caracterizar o funcionamento hidrodinâmico e a movimentação e equilíbrio aluvionar da área directamente envolvida no estudo, onde estão previstas as intervenções de melhoramento, isto é, da área que engloba a embocadura, o banco exterior e o Cabedelo, o estudo abrangeu também o estuário do rio Douro e a orla marítima que se estende de Leixões a Espinho (cf. Fig. 1).

2.1 - O Estuário

O estuário desenvolve-se nos últimos 22 km do curso do rio, entre Crestuma e a foz.

Durante os períodos secos os caudais fluviais são diminutos, pelo que o escoamento é quase completamente influenciado pelas marés, comportando-se o estuário como uma laguna bem misturada, com um pequeno caudal tributário de água doce.

Após a ocorrência de períodos de chuvas, as barragens começam a descarregar a água em excesso. O estuário torna-se então estratificado, desenvolvendo-se o característico sistema de escoamento em cunha salina.

Em Crestuma, o caudal médio diário, no período de 1932 a 1975, igualou $456 \text{ m}^3/\text{s}$, enquanto que, nos anos secos do mesmo período, o caudal médio desceu para $222 \text{ m}^3/\text{s}$ e, nos anos húmidos, aumentou para $655 \text{ m}^3/\text{s}$.

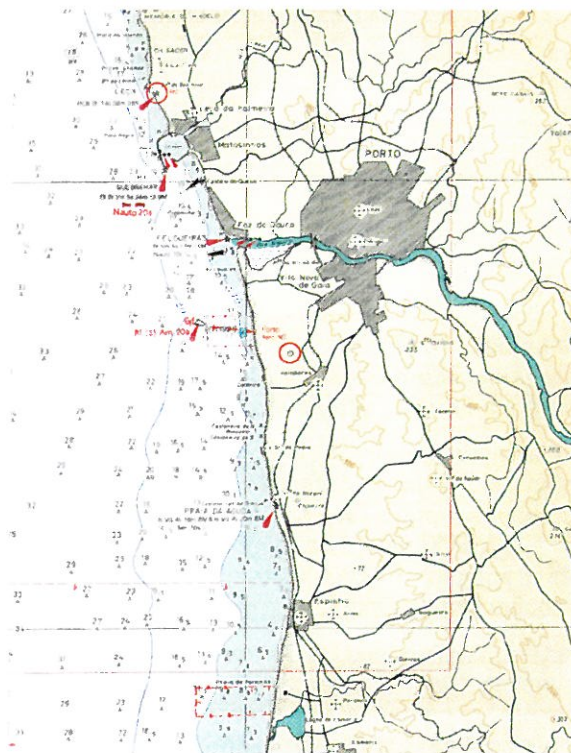


Fig. 1 - O estuário do Douro e a orla marítima

Às cheias com períodos de retorno de 10 e 50 anos correspondem caudais de ponta de $11\,250$ e $16\,500 \text{ m}^3/\text{s}$, respectivamente. A maior cheia de que há memória ocorreu em 1739 e apresentou um caudal de ponta que foi estimado em $19\,000 \text{ m}^3/\text{s}$. Em Dezembro de 1961, registou-se uma cheia com caudal máximo estimado em $18\,000 \text{ m}^3/\text{s}$. A última grande cheia, com um caudal de $11\,000 \text{ m}^3/\text{s}$, medido na barragem de Crestuma, ocorreu em 1989.

2.2 - A Orla Marítima

Para enquadramento da foz do Douro, estendeu-se a caracterização das condições naturais ao trecho de costa compreendido entre Leixões e Espinho. Trata-se de uma costa voltada aproximadamente a $W-10^0-S$, com marés do tipo semi-diurno de amplitude apreciável, onde incide um regime de agitação de grande energia, a que corresponde um transporte sólido potencial muito elevado.

A zona da foz do Douro e o trecho de costa a sul, têm sido alimentados por uma fonte aluvionar principal, o rio Douro, a que se junta uma secundária, a da sua fronteira norte.

Estima-se que nas primeiras décadas deste século, anteriormente à construção de barragens e ao desenvolvimento das actividades de extracção de inertes para a construção civil, o Douro debitaria $0,9 \times 10^6$ a $2,0 \times 10^6 \text{ m}^3$ de areia por ano. Após a construção da barragem de Crestuma esse débito não excederá $0,25 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{ano}$.

O caminhamento litoral proveniente da costa a norte que era de $0,15$ a $0,18 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{ano}$ foi anulado com a construção do molhe norte do porto de Leixões e posteriores dragagens na entrada desse porto.

O quase esgotamento das fontes de alimentação teve como consequência o desencadeamento do processo erosivo que levou ao desaparecimento das praias anteriormente existentes entre Leixões e a foz do Douro e emagreceu sensivelmente as que se situam a sul, entre o Douro e Espinho. Estas praias só não desapareceram também por

dispõem de uma defesa natural constituída por bancadas rochosas, que se desenvolvem paralelamente à linha de água, a cotas relativamente elevadas.

A zona de Espinho e a costa a sul, até às proximidades da embocadura da Ria de Aveiro, passaram a sofrer de um processo erosivo persistente que se encontra ainda em desenvolvimento.

2.3 - A Embocadura, Banco Exterior e Cabedelo

Os agentes fisiográficos, isto é, os factores que influenciam a morfologia desta zona, são o prisma de maré, o escoamento fluvial e a agitação marítima.

O prisma de maré é o factor que determina as condições de equilíbrio médio da embocadura. Os caudais fluviais, embora tenham pouca importância no comportamento e morfologia média da embocadura, concorrem para a sua instabilidade fisiográfica. A agitação marítima tem uma importância grande no processo fisiográfico, traduzindo-se a sua acção, principalmente, na recondução ao Cabedelo das areias repulsadas pelo jacto da vazante e nos transportes longitudinais ao longo desta formação aluvionar.

A embocadura apresenta uma forte variabilidade no que respeita a áreas de secção e larguras. A secção alarga durante os períodos de caudais fluviais elevados, os quais satisfazem a necessidade de maiores secções de escoamento à custa da erosão da extremidade do Cabedelo. Volta a estreitar nos períodos de caudais baixos, durante os quais a extremidade do Cabedelo volta a prolongar-se para norte.

Os numerosos levantamentos analisados permitiram atribuir-lhe uma secção média, abaixo do nível médio das águas, igual a 1285 m² e máximos e mínimos da ordem de 2400 e 700 m². A largura média encontrada foi de 230 m e as máximas e mínimas de 380 e 120 m (cf. Fig. 2).

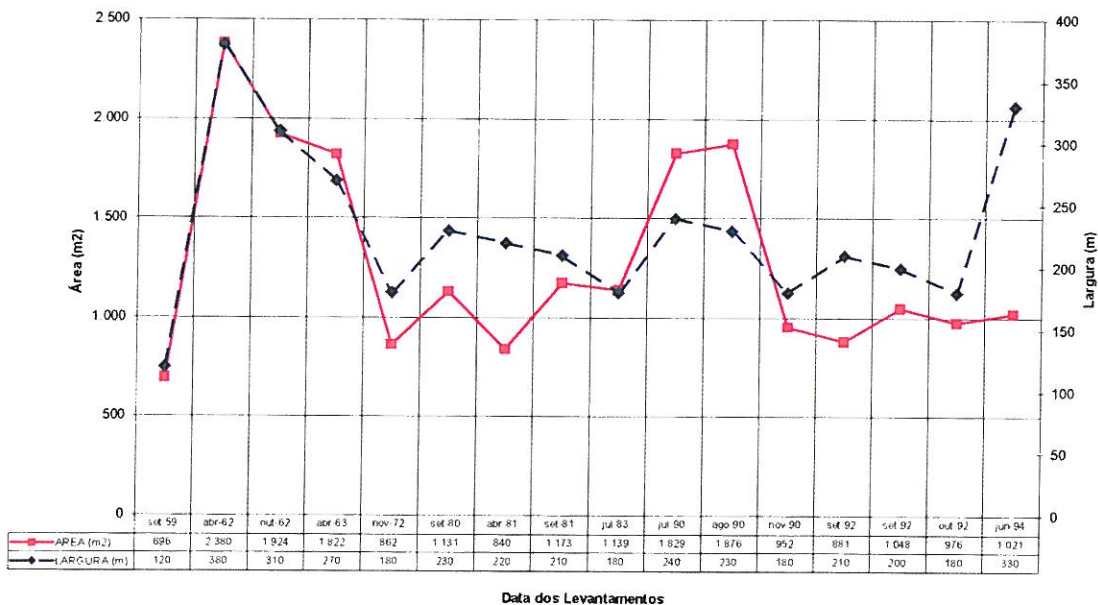


Fig. 2 - Variação das áreas e das larguras da secção da embocadura do Douro

A análise da sua posição mostra que se tem vindo a deslocar no sentido do interior do estuário, desde meados do século XX. Localizava-se por essa época a oeste da Meia Laranja, tendo-se deslocado gradualmente nas década seguintes em direcção à saliência de margem da Cantareira e encontra-se actualmente na posição mais interior de que há registo, a nascente dessa saliência. Esse deslocamento resultou da progressão contínua para nascente que a extremidade do Cabedelo tem vindo a sofrer.

O talvegue do canal de acesso à embocadura tende a desenvolver-se segundo o andamento das obras fixas de regularização da margem norte da foz do estuário, que se estendem desde

o molhe de Felgueiras à Cantareira. Sofre, no entanto, frequentes deslocamentos devido ao constante assoreamento de fundos resultante do afluxo de areias provenientes do Cabedelo.

Da análise das cotas e posicionamento da barra, patentes nos numerosos levantamentos analisados, ressaltam como aspectos mais significativos que o valor médio geral da cota do passe da barra é da ordem de (-5,00 m)ZH e que a sua localização média cai praticamente sobre o meridiano que passa pela cabeça do molhe de Felgueiras, num ponto a cerca de 150 m a sul dessa obra.

O banco exterior e o Cabedelo têm apresentado evoluções quer de tipo sazonal quer de longo prazo. Estão entre as primeiras:

- As desencadeadas por grandes cheias e que se caracterizam pela forte erosão da extremidade do Cabedelo com a deposição de grandes volumes de areia a sudoeste da embocadura; com a normalização dos caudais fluviais o Cabedelo volta a estender-se para norte, estreitando de novo a embocadura. Os grandes volumes de areia repelidos para o banco exterior e depositados à ilharga do canal de acesso, são gradualmente transportados para o Cabedelo sob acção das correntes de massa da onda.
- As que ocorrem no seguimento de períodos longos com baixos caudais fluviais, em que o Cabedelo reforça a sua extremidade norte, constringendo a embocadura. Quando acompanhados de agitação marítima de elevada energia, aumenta a entrada de areias na embocadura, o que leva a extremidade do Cabedelo a deflectir para o interior do estuário.

No que respeita às evoluções de longo prazo, há a destacar um conjunto de tendências que parecem decorrer da diminuição da frequência e intensidade das cheias, associada à menor disponibilidade de areias para o transporte, as quais, como se referiu, têm vindo a ser retiradas do estuário para abastecimento da indústria da construção civil, considerando-se como mais significativas, as seguintes (cf. Fig. 3):

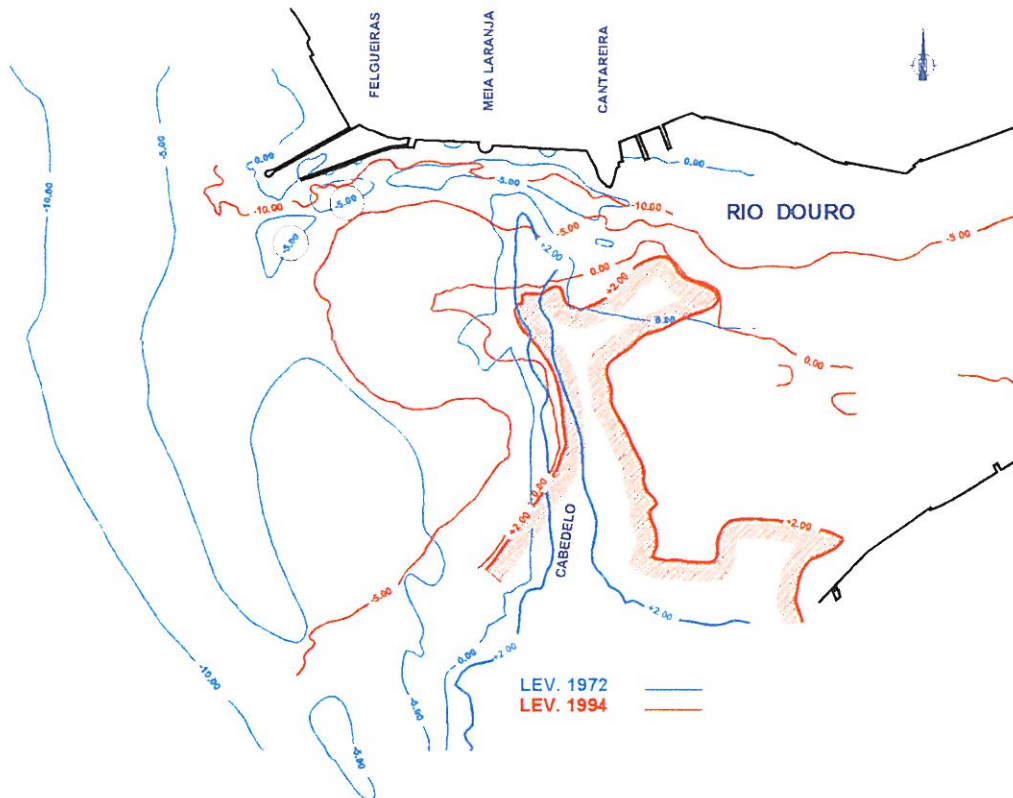


Fig. 3 - Morfologia da zona exterior em diferentes datas

- São cada vez menos frequentes as configurações de inflexão para o exterior da extremidade do Cabedelo, características da ocorrência de cheias importantes.
- A comparação de levantamentos mostrou uma situação global estável entre 1935 e 1972, com assoreamentos e erosões da mesma ordem de grandeza; o período de 1972 a 1994 foi caracterizado por uma forte erosão, com um saldo da ordem de $2,9 \times 10^6 \text{ m}^3$.
- A consulta de levantamentos de diferentes datas mostra que existe tendência permanente no sentido do recuo e emagrecimento do Cabedelo, a qual se acentuou nas últimas décadas; devido a esse recuo, o seu extremo norte, que no início do século, apontava normalmente a um ponto a oeste da Meia Laranja, está hoje a nascente da Cantareira.
- O emagrecimento do Cabedelo deu a esta formação as características de uma praia encaixada entre a saliência de Felgueiras e as rochas da Seca do Bacalhau.

2.4 - Interpretação global da dinâmica da barra do Douro

A interpretação dos processos fisiográficos dominantes na barra do Douro, embora não possa em grande parte ultrapassar os aspectos qualitativos, apresenta, apesar disso, um interesse fundamental. A compreensão da forma como a morfologia desta zona reage à actuação dos agentes naturais, caudais de maré e fluviais e das ondas, é indispensável para se poderem orientar as intervenções de correcção, permitindo prever a forma como o sistema aluvionar irá reagir na presença de obras.

Está presente no caso da foz do Douro, como aspecto marcante da movimentação e equilíbrio sedimentar, a existência de uma intensa circulação de caudais de areia entre a parte norte do Cabedelo, a embocadura, o canal de acesso e o banco exterior. Esta circulação, que os resultados da modelação matemática evidenciam com clareza, foi também apontada como elemento básico da fisiografia local em anteriores estudos realizados sobre a barra do Douro

A movimentação de areias na foz do Douro tem uma base hidrodinâmica bem definida e apresenta o seguinte padrão:

- O sector norte da orla do Cabedelo apresenta forte predominância de correntes longitudinais dirigidas para norte, as quais, originariam um transporte estimado em $1,5 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{ano}$ que tende a colmatar a embocadura. As causas da marcada orientação para norte destas correntes são o efeito de difracção provocado na zona da embocadura pela acentuada saliência da costa a norte da foz do Douro e ainda a rotação, por efeito de refracção, que sofrem as ondas dominantes antes de atingirem o extremo do Cabedelo.
- Dependendo dos estados da maré e das características da agitação marítima, verifica-se ainda com frequência o afluxo de caudais de areia ao canal de acesso, sobre a zona de afloramentos rochosos que o ladeia a sul. Estas areias são transportadas pelas correntes de massa da onda, com ou sem rebentação, reforçadas pelas correntes de enchente.
- As correntes de vazante geradas pela embocadura removem estes sedimentos para o exterior, transportando-os ao longo do canal de acesso, o qual é um canal modelado pelas correntes de vazante. A muito maior capacidade de movimentação da vazante resulta de dois factores principais e que são a sua concentração em forma de jacto e as maiores velocidades que apresenta, devido ao desfaseamento existente entre as curvas de níveis e de caudais e ao reforço da vazante pelos caudais de origem fluvial.
- Embora o transporte sobre o canal de acesso apresente movimentações alternadas por efeito das correntes de enchente e de vazante, a resultante é dirigida para o mar. As areias são repulsadas até uma distância da costa em que o jacto de vazante perde a sua capacidade de transporte. Essa distância tende a aumentar

bastante durante a ocorrência de cheias, as quais intensificam fortemente o jacto gerado pela embocadura.

- Dessas posições de deposição sobre o banco exterior só a acção da onda as pode mobilizar de novo. As correntes de massa geradas pela agitação, antes ou após a rebentação, eventualmente complementadas pela acção das correntes de enchente, encaminha-as de novo em direcção à costa. Podem cair de novo no canal de acesso ou encaminhar-se para a orla do Cabedelo, onde serão reintegradas na circulação dirigida para a embocadura.
- Uma parte da massa de sedimentos em movimento, que se julga ser actualmente pouco significativa, consegue escapar a esta circulação em circuito fechado, indo alimentar a costa a sul. Estas deverão ser as areias que foram repulsadas para maiores distâncias da embocadura e que ao voltarem à orla litoral atingiram o Cabedelo em pontos mais próximos do seu enraizamento, onde as correntes longitudinais são mais frequentemente dirigidas para sul.
- Na situação actual pode considerar-se que o trecho de costa da foz do Douro, compreendendo o Cabedelo e o banco exterior, constitui uma unidade fisiograficamente independente, sem fontes de alimentação significativas.
- Esta unidade fisiográfica funciona como uma praia de pequenas dimensões, encaixada entre a saliência costeira de Felgueiras e as rochas da Seca do Bacalhau, onde a mesma massa de areia está sujeita a movimentações em circuito fechado e a deslocções sazonais, decorrentes da variação ao longo do ano das características da agitação marítima que aí incide.

3 - SOLUÇÕES ALTERNATIVAS PARA MELHORIA DA ACESSIBILIDADE

Os dois factores de que dependem as condições de larguras e cotas de rasto do canal de acesso desde a barra à embocadura são, como foi referido, o prisma de maré do estuário e o volume total de areia que ao longo do ano aflui a essa zona, da qual deve ser expulso pelas correntes de vazante, reforçadas pelos caudais de origem fluvial.

A situação existente é bastante desfavorável, sendo caracterizada por um acesso com deficientes condições de profundidades, acentuada instabilidade e sinuosidade do rasto do canal e completa exposição à agitação marítima.

É, no entanto, bastante compreensível que assim seja, pois embora se esteja em presença de um prisma de maré de valor razoável, as correntes de vazante por ele geradas na embocadura têm que promover ao varrimento de um enorme caudal anual de sedimentos, estimado em $1,75 \times 10^6$ m³/ano, soma do transporte litoral ao longo da extremidade do Cabedelo com o caudal de areias debitado pelo estuário.

Foram estudadas diferentes soluções alternativas para as obras destinadas à melhoria da acessibilidade e das condições de segurança na barra, apresentando-se seguidamente a tipologia dessas soluções e uma breve análise dos objectivos a atingir com cada uma delas e dos resultados que se espera alcançar com cada uma delas.

Como Situação de Referência, considerou-se a ausência total de intervenções na embocadura do Douro. Não seriam executadas quaisquer obras fixas ou dragagens de estabelecimento e parar-se-ia, de forma definitiva, com as dragagens de manutenção que têm vindo a ser realizadas nos últimos anos no canal de acesso.

Prevê-se que em tais circunstâncias e de acordo com a experiência do passado, haveria uma sensível deterioração das condições de profundidades e traçado do canal natural no percurso de acesso à embocadura. Como consequência, agravar-se-iam fortemente as limitações de navegabilidade já actualmente existentes.

A eliminação das dragagens de manutenção teria, em contrapartida, um efeito positivo sobre a situação de erosão do Cabedelo, pois atenuaria o agravamento do processo de emagrecimento que esta formação aluvionar tem vindo a sofrer. Não seria suficiente, no entanto, para promover a sua recuperação, dado o limitado caudal de areias que aflui a esta zona.

Seria de esperar, por isso, que o Cabedelo mantivesse a posição recuada em que actualmente se encontra, com a extremidade Norte apontada para montante da Cantareira.

Esta situação morfológica, associada à fraca volumetria do banco exterior, permite prever a manutenção das condições de exposição aos ataques da agitação marítima da orla marginal do Passeio Alegre da Foz.

Na Alternativa 1 (cf. Fig. 4) foi considerada a dragagem do canal de acesso a (-5,0 m)ZH sem obras fixas de protecção. A conservação seria garantida unicamente por dragagens de manutenção.

Esta solução apresenta os inconvenientes conhecidos, visto estar próxima da que funcionou nos últimos anos. Exige um pesado esforço de dragagem, dado o grande afluxo de areias ao canal, e não garante a estabilidade da implantação, da largura e da profundidade de rasto do canal.

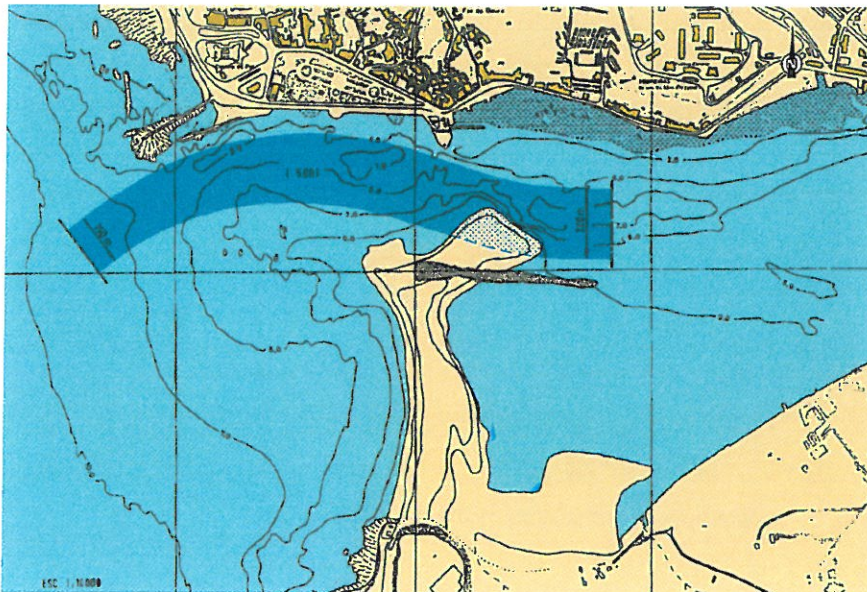


Fig. 4 - Implantação do canal - Alternativa 1

O reforço do prisma de maré que as correcções na zona da embocadura possam produzir será pouco sensível, pelo que não poderá conduzir a um melhoramento significativo.

A tipologia das restantes Alternativas encaradas envolve a construção de obras fixas, tendo em vista melhorar o canal da embocadura, conseguindo uma situação estável que sirva os propósitos da navegação e exija um mínimo de manutenção.

Na Alternativa 2 (cf. Fig.5) procura-se obter um melhoramento muito acentuado da estabilidade e das condições de navegação de um canal de acesso com fundos a (-5,0 m)ZH, pela redução drástica do caudal de sedimentos provenientes do Cabedelo que atinge a embocadura.

Para o conseguir propõe-se a construção de um molhe sul que intercepte a circulação de sedimentos que afluem à embocadura.

As acções das correntes de maré e das ondas, relacionadas com o comprimento do molhe e a profundidade no seu extremo, determinarão a maior ou menor capacidade da obra para reter o caudal litoral.

O corte completo da recirculação de sedimentos proveniente do Cabedelo, reduziria o volume do caudal total de areias que atinge o canal de acesso ao débito do estuário, o qual se estimou grosseiramente em $0,25 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{ano}$. Nestas condições, atingir-se-iam boas condições de funcionamento da embocadura e do canal de acesso.

Um molhe sul teria outra vantagem, além de fazer diminuir drasticamente os volumes de areia que o canal de acesso tem de movimentar. Promoveria o guiamento e regularização das correntes de vazante, factor importante na obtenção de mais favoráveis condições de acesso.

A volumetria do banco exterior seria também reduzida, pois depende do volume de sedimentos em jogo na zona da embocadura. Com a redução, a zona da barra ficaria muito próxima da extremidade do molhe, pelo que sofreria uma actuação directa do jacto de vazante, favorecendo a manutenção das suas profundidades.

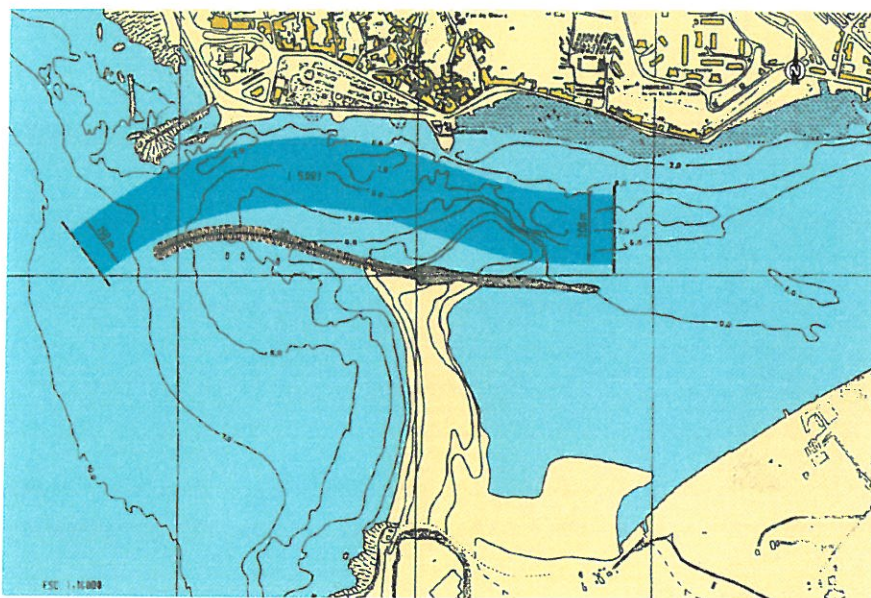


Fig. 5 - Implantação do canal e do molhe sul - Alternativa 2

Na Alternativa 3 (cf. Fig. 6) a construção adicional de um molhe norte, de menor comprimento, acompanhada da dragagem do canal de acesso com um traçado idêntico ao das Alternativas anteriores, apresentaria os seguintes objectivos:

- Melhorar as condições de abrigo, facilitando a navegação no seu acesso ao estuário e impedindo a repetição dos ataques do mar à marginal do Passeio Alegre da Foz.
- Acentuar a orientação a sudoeste do jacto de vazante à saída dos molhes, o que favoreceria francamente a eficiência do processo de transposição. Nestas condições, os sedimentos carregados pelo jacto de vazante seriam depositados mais a sotamar da embocadura, o que facilitaria a sua reintegração no processo litoral, a ser realizado pela onda.
- Aproximar o guiamento do jacto de vazante da barra do banco exterior, facilitando o seu aprofundamento.

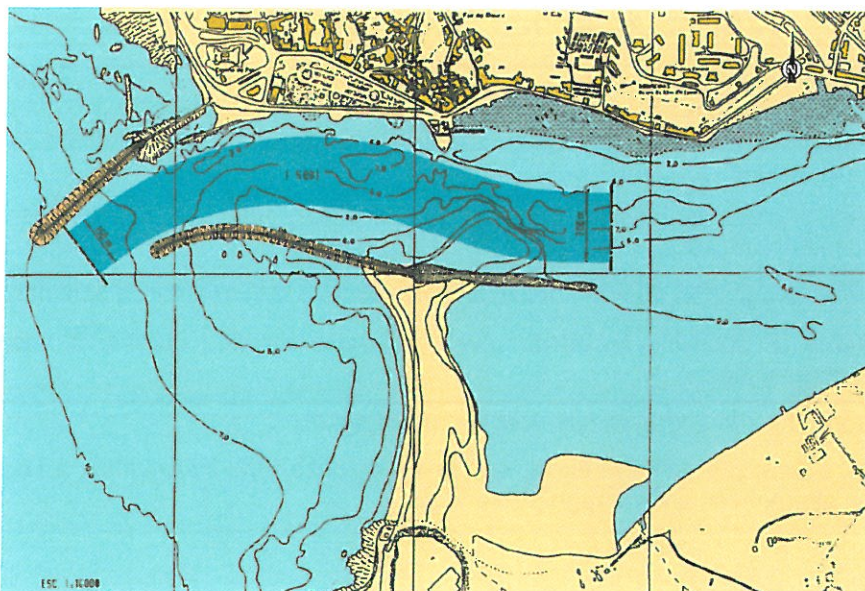


Fig. 6 - Implantação do canal e dos molhes norte e sul - Alternativa 3

Um aspecto importante a ter em consideração nas alternativas que envolvem a construção de obras fixas exteriores, para melhoramento do acesso da navegação à embocadura, é o que se relaciona com as condições de escoamento das grandes cheias. A passagem das pontas de cheias, de baixa probabilidade de ocorrência, origina grandes sobreelevações de níveis no baixo estuário e a inundação de áreas ribeirinhas. Importa que estas inundações não venham a ser agravadas com o esquema de obras que se adopte.

A secção crítica no escoamento dessas cheias é a embocadura, sendo aí que o escoamento se apresenta mais estrangulado e com maiores velocidades. O processo natural dispõe, no entanto, de dois mecanismos de adaptação às necessidades acrescidas de área na secção da embocadura para o escoamento dessa cheias excepcionais:

- O alargamento da secção da embocadura à custa da erosão pelas correntes da extremidade do Cabedelo, até valores da ordem dos 370 metros, máximo imposto pela fronteira rígida constituída pelas duas margens rochosas e pelo dique de Luiz Gomes de Carvalho;
- A rotura ou varrimento do Cabedelo. Dá-se muito excepcionalmente, quando os caudais são de tal forma elevados que o alargamento da embocadura não é suficiente para impedir a elevação dos níveis na bacia de S. Paio até cotas próximas do coroamento da crista do Cabedelo. Este é então galgado e rapidamente erodido, dadas as grandes diferenças de nível entre o interior e o mar.

A construção de um ou dois molhes, vai enfraquecer o primeiro dos mecanismos de compensação referidos. A secção crítica de escoamento deixará de poder sofrer alargamentos sob acção dos grandes caudais, pois passará a ser localizada na zona das cabeças dos molhes, limitada portanto por obras fixas.

É indispensável que o segundo dos mecanismos referidos seja mantido. É necessário, para isso, que se mantenha livre uma faixa do estuário de algumas centenas de metros a sul do dique de Luiz Gomes de Carvalho e a correspondente frente do Cabedelo, num comprimento da ordem de 300 m. Esse trecho de Cabedelo poderá continuar a romper por ocasião de cheias excepcionais, constituindo uma secção de escoamento complementar da embocadura fixada, o que limitará as sobreelevações de níveis no baixo estuário, na passagem da ponta das cheias excepcionais.

4 - Simulação das Soluções Alternativas

Foi aplicado um sistema integrado de modelos capazes de simular a propagação da agitação, determinar os campos de correntes associados à acção conjunta da agitação, maré e caudal do rio e, ainda, prever as potenciais zonas de erosão e sedimentação associadas aos campos de correntes calculados.

As simulações efectuadas tiveram por objectivo analisar quais os efeitos das diferentes alternativas de intervenção:

- Sobre a agitação marítima local, as correntes e a movimentação sedimentar;
- Sobre as sobrelevações de níveis no baixo estuário durante a ocorrência de grandes cheias;
- Sobre as alterações na salinidade e na dispersão.

Foi analisada a Situação de Referência, que teve por base topo-hidrográfica o levantamento de 1994, e as alternativas anteriormente referidas.

4.1 - Informação de Base

No âmbito deste estudo, para além da recolha de elementos já existentes sobre o estuário e zona costeira adjacente, foram efectuadas campanhas de recolha de dados de campo destinadas a complementar e actualizar a informação. Nesta perspectiva, para além de um levantamento batimétrico que abrangeu uma área desde a barragem de Crestuma até à batimétrica dos 10 metros no exterior do Estuário, foram efectuadas medidas de níveis, correntes, granulometria e taxas de transporte em suspensão e junto ao fundo.

A avaliação dos caudais do rio foi efectuada com base em valores médios diários em Crestuma, onde foi possível dispor de informação contínua, entre Janeiro de 1985 e Dezembro de 1994.

O clima de agitação resultou da análise da bóia direccional instalada ao largo da Figueira da Foz, sendo depois a informação transferida para os limites do modelo com base num programa de refracção espectral. Não foi possível utilizar informação proveniente da bóia instalada em Leixões, dado não se dispor de dados suficientes.

4.2 - Metodologia Utilizada

A metodologia seguida passou pela implementação e aplicação de um sistema integrado de modelos capazes de simular a propagação da agitação, determinar os campos de correntes associados à acção conjunta da agitação, maré e caudal do rio e, finalmente, prever as potenciais zonas de erosão e sedimentação associadas aos campos de correntes calculados. Em termos gerais, o modo de funcionamento do sistema pode ser observado na *Fig. 7*.

Assim, a definição do problema para uma situação específica implica o conhecimento de diversas grandezas:

- características das ondas (altura, período e direcção) em profundidades da ordem dos 50 metros, local onde foi colocada a fronteira do modelo REFDIF;
- características da maré (definida a partir de uma data e um conjunto de componentes);
- características do caudal fluvial. (Valores de caudal médio diário em Crestuma).

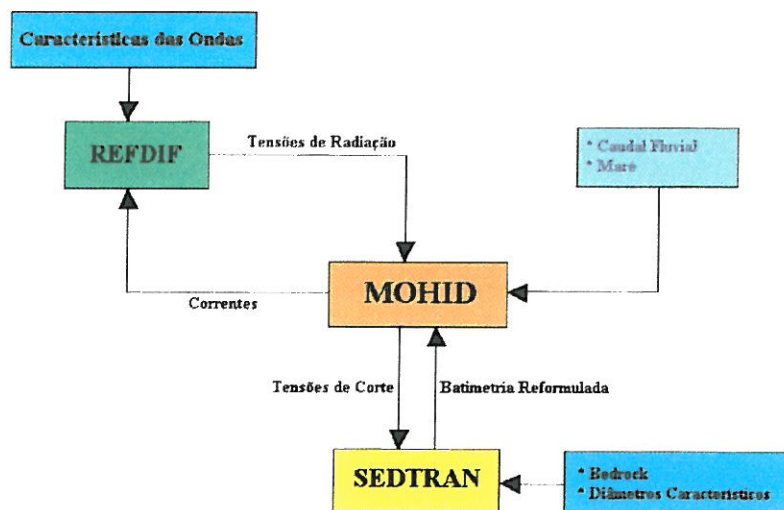


Fig. 7 - Metodologia utilizada na implementação do Modelo

Uma vez escolhidos estes valores começa por se correr o módulo de propagação da agitação REFDIF. Este módulo tem em consideração os níveis e as correntes verificados nesse instante e calculados pelo módulo de cálculo da hidrodinâmica MOHID. O cálculo é repetido cada duas horas com actualização dos níveis e correntes. Durante este intervalo é considerado que as alterações quer dos níveis quer das correntes não é suficiente para provocar alterações significativas no campo de ondas calculado.

Em simultâneo com o módulo de cálculo da hidrodinâmica, encontra-se a correr o módulo de cálculo do transporte SEDTRAN. Neste caso, o módulo de transporte é chamado de 10 em 10 minutos, calculando as taxas de transporte e actualizando a batimetria, reflectindo-se estas alterações imediatamente no módulo hidrodinâmico.

O módulo hidrodinâmico do estuário do Douro é baseado no código numérico MOHID e engloba uma área que se estende desde o exterior do estuário (em cotas da ordem dos 15-20 metros) até Crestuma, sendo constituído por um modelo bidimensional integrado na vertical que inclui a zona terminal do estuário, desde a ponte D. Luís até ao exterior e um modelo unidimensional, desde Crestuma até à ponte D. Luís. A malha utilizada tem um passo variável que na direcção E-W varia entre 50 metros e 150 metros e na direcção N-S varia entre 25 metros e 200 metros, apresentando a resolução mais fina (25 m x 50 m) na zona da barra e garantindo a resolução de 25 metros na direcção N-S em todo o troço do rio até à ponte D. Luís.

O módulo de propagação da agitação engloba uma zona que se estende desde profundidades da ordem dos 50 metros até ao interior do estuário. O código numérico utilizado é o REFDIF v 2.5, cujo algoritmo foi desenvolvido na Universidade de Delaware por Kirby e Dalrymple. Este modelo é baseado na forma parabólica das *mild-slope equations*, permitindo ter em consideração os efeitos da refacção, difracção, rebentação e interacção ondas-correntes.

4.3 - Avaliação das alterações das condições de agitação na zona do canal de acesso

A análise dos resultados de simulações com o modelo REFDIF permitiu caracterizar o comportamento das diferentes alternativas no que respeita ao grau de abrigo que conferem ao canal de acesso e à forma como se concentra a agitação sobre o Cabedelo (cf. Fig. 8 e Fig. 9):

- A Alternativa 1 não introduz modificações sensíveis nos valores dos índices de agitação nem na sua distribuição;
- A Alternativa 2 implica alterações diminutas. Dada a orientação aproximada a oeste da secção formada pela cabeça do molhe sul e a saliência de Felgueiras e a

apreciável largura dessa secção, não se verifica acréscimo de protecção ao longo do canal de acesso, entre a barra e a Cantareira. A construção do molhe sul não será, por si só, suficiente para proteger dos ataques do mar a zona do Passeio Alegre da Foz ;

- A Alternativa 3 não aumenta os índices de agitação no Cabedelo e é muito eficiente a abrigar o canal de acesso, fazendo cair acentuadamente os seus índices de agitação. Nesta alternativa, os índices de agitação de Inverno em frente do Passeio Alegre da Foz descem do escalão dos 25 a 50% para o dos 0 a 25%. A construção de um molhe norte resolveria certamente os problemas de ataques do mar àquela marginal.

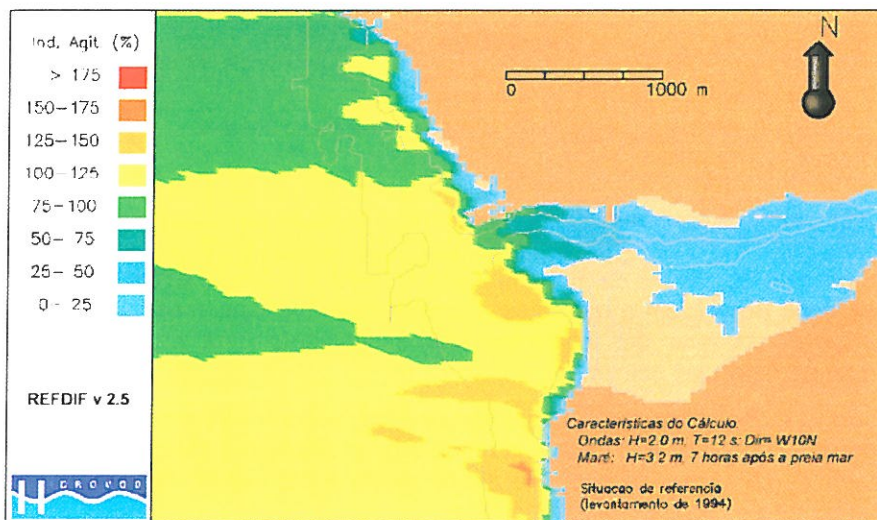


Fig. 8 – Índices de agitação na Situação de Referência

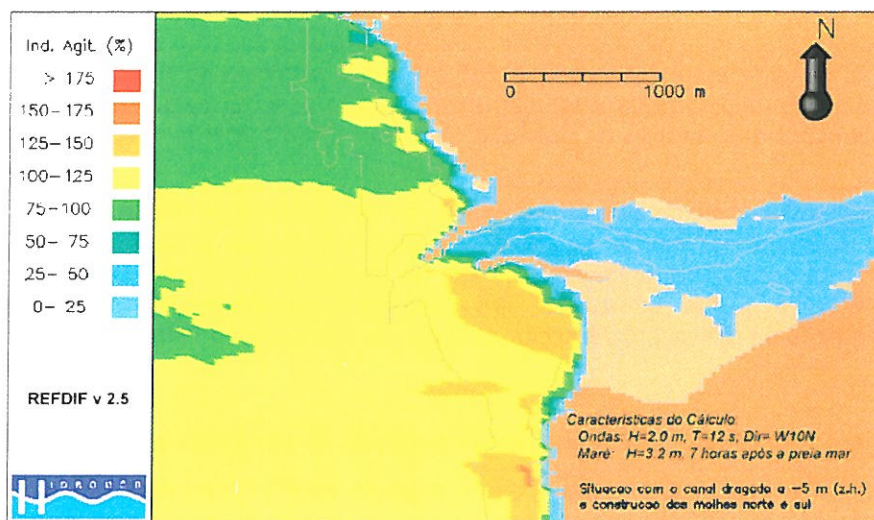


Fig. 9 – Índices de agitação com a construção dos molhes sul e norte

4.4 - Avaliação das alterações do regime hidrodinâmico

A aplicação de modelação hidrodinâmica, com consideração dos efeitos da actuação de caudais fluviais, ondas e correntes, permitiu caracterizar o comportamento das diferentes alternativas, no que respeita às alterações que introduziriam nos campos de correntes:

- A Alternativa 1 apresenta campos de correntes praticamente iguais aos que ocorrem na Situação de Referência;
- Na Alternativa 2 continuam a predominar as correntes longitudinais dirigidas para norte ao longo do Cabedelo, ocorrendo também correntes de maré e de massa da onda dirigidas para a orla desta. A grande diferença que agora se verifica é que essas correntes, como era de esperar, são impedidas pelo molhe sul de alcançar a embocadura pelo que tendem a ser deflectidas para o exterior (cf. Fig. 10 e 11);
- A Alternativa 3 apresenta comportamento muito semelhante à alternativa anterior. Distingue-se desta pela mais acentuada deflexão a sudoeste do jacto de vazante e especialmente do jacto gerado pelo escoamento da cheia.

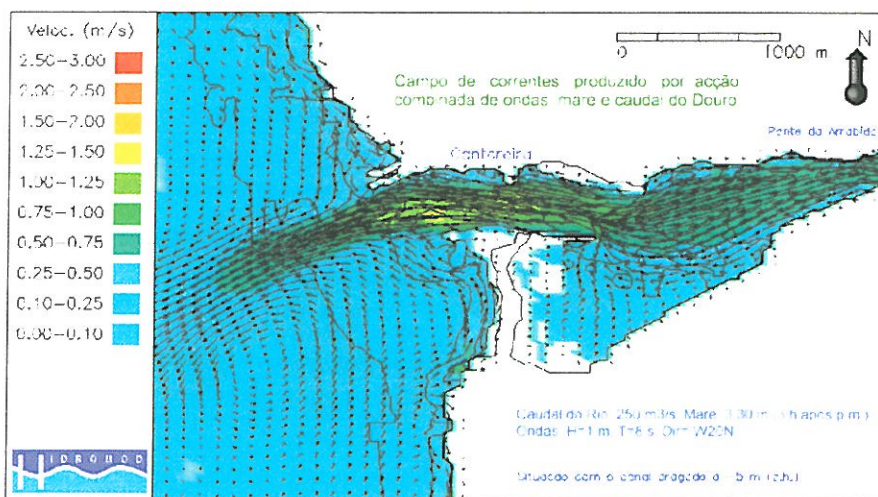


Fig. 10 – Campo de correntes produzido por acção combinada das ondas, da maré e do caudal do Douro (situação com o canal dragado)

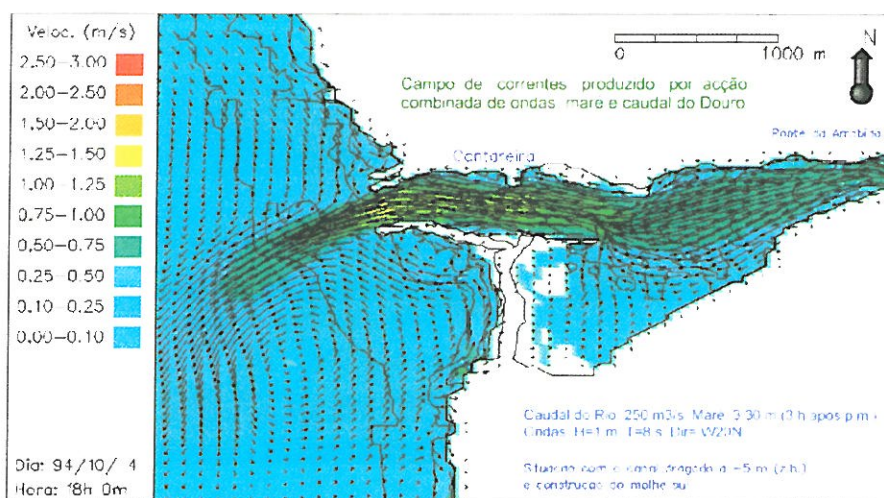


Fig. 11 - Campo de correntes produzido por acção combinada das ondas, da maré e do caudal do Douro (situação após a construção do molhe sul)

4.5 - Avaliação das alterações do regime aluvionar

Tal como referido anteriormente, a avaliação das alterações do regime aluvionar foi efectuada com base na aplicação de um modelo hidromorfológico, tendo sido detectadas as seguintes alterações:

- Na Alternativa 1 as alterações são praticamente inexistentes. A única diferença sensível que a dragagem de um canal a (-5,0 m)ZH introduz é um decréscimo da intensidade da expulsão de areia durante o escoamento da cheia visível na diminuição das acumulações de areias a oeste e sul do jacto de vazante sudoeste;
- A Alternativa 2 apresenta alterações significativas. O molhe sul passa a impedir os fluxos de areia do corpo do Cabedelo para a embocadura. O melhor guiamento das correntes no canal de acesso leva a maiores erosões na boca dos molhes com deposições mais intensas na zona fronteiria do banco exterior, especialmente no escoamento da cheia;
- A Alternativa 3 mostra, relativamente à alternativa anterior, a tendência para o desenvolvimento do banco exterior numa posição mais voltada a sudoeste, devido à acção deflectora do molhe norte. Esse aspecto é bem visível na situação de escoamento da cheia (cf. Fig. 12 e Fig. 13).

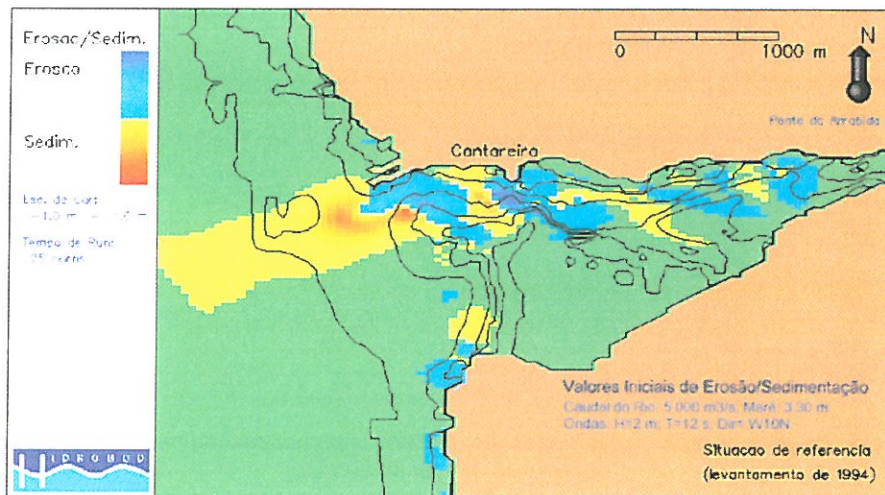


Fig. 12– Valores iniciais de erosão/sedimentação para um caudal do rio de 5000 m³/s (Situação de Referência)

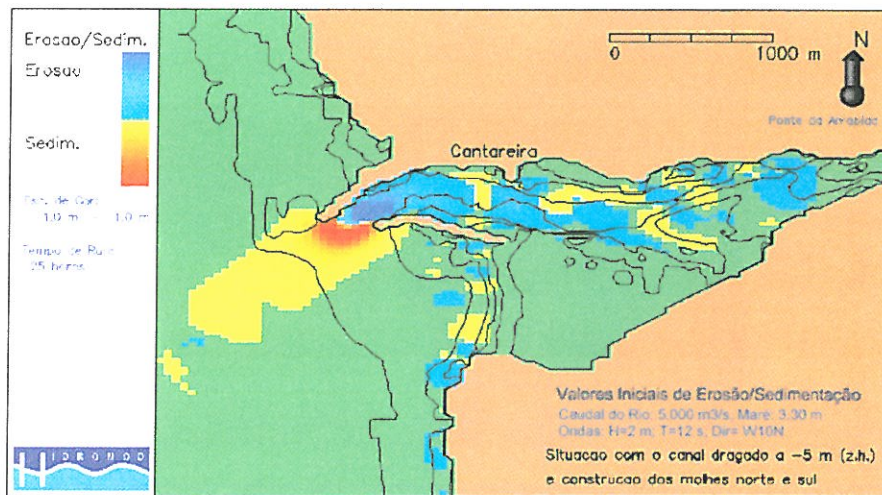


Fig. 13 - Valores iniciais de erosão/sedimentação para um caudal do rio de 5000 m³/s (situação após a construção dos molhes norte e sul)

4.6 - Avaliação das alterações no regime de escoamento de grandes cheias

Afim de testar o funcionamento hidrodinâmico das soluções, foi simulado no modelo matemático hidrodinâmico o escoamento de cheias de 10 000 e 16 500 m³/s, esta última com um período de retorno de 50 anos.

Cheia de 10 000 m³/s

Verifica-se que a cheia de 10 000 m³/s não provoca ainda o rompimento do Cabedelo, embora as obras propostas nas Alternativas 2 e 3 originem sobrelevações sensíveis no interior do estuário. O alargamento do canal de acesso para 200 m (inicialmente previsto com 150 m), atenua estas sobrelevações excessivas, fazendo com que os níveis não ultrapassem os que ocorrem na Situação de Referência (cf. Fig. 14 e Fig. 15).

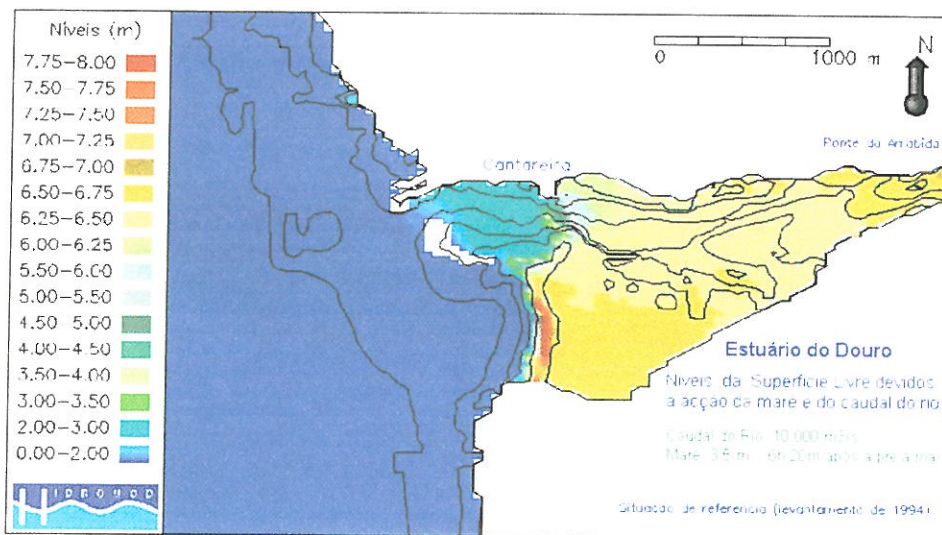


Fig. 14 – Níveis da superfície livre produzidos por ação de um caudal do Douro de 10.000 m³/s (Situação de Referência)

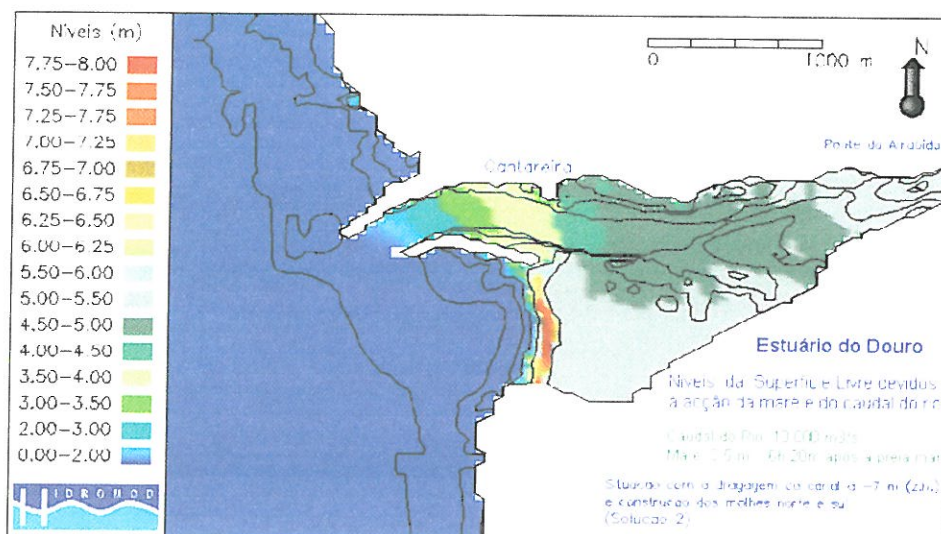


Fig. 15 - Níveis da superfície livre produzidos por ação de um caudal do Douro de 10.000 m³/s (situação após a construção dos molhes norte e sul)

Cheia de 16 500 m³/s

Consegue-se que o escoamento desta cheia, com probabilidade de ocorrência de uma vez em 50 anos, não apresente sobrelevações no estuário superiores à Situação de Referência, com a configuração de obras que garantem uma largura de rasto do canal entre molhes de 200 m, acrescida da manutenção da possibilidade de ruptura de um trecho do Cabedelo com 300 m de comprimento, localizado imediatamente a sul das Pedras do Lima.

O campo de correntes produzido por acção de um caudal do rio Douro de 16.500 m³/s (situação após a construção dos molhes norte e sul), prevendo a rotura do cabedelo numa extensão da ordem de 300 m, imediatamente a sul das Pedras do dique de Luiz Gomes de Carvalho, é ilustrado claramente através do gráfico representativo da situação testada em modelo (cf. Fig. 16).

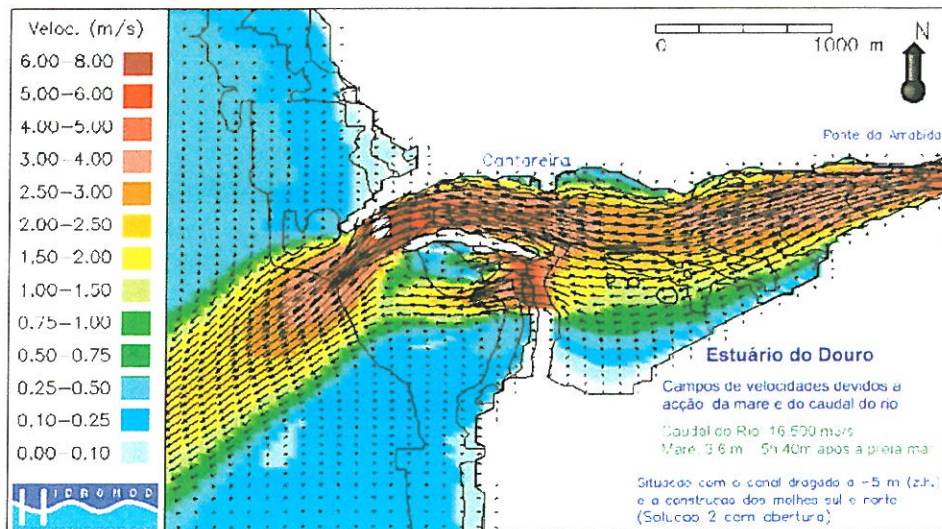


Fig. 16 – Campo de correntes produzido por acção de um caudal do rio Douro de 16.500 m³/s (situação após a construção dos molhes norte e sul)