



DAKHLA ATLANTIQUE – UM MEGA PROJETO DE UM PORTO INVULGAR

Carlos Abecasis; Miguel Robert; Luís Peixeiro; Sofia Freire; Pedro Melo
Consulmar c.abecasis@consulmar.pt; luis.peixeiro@consulmar.pt; mrobert@consulmar.pt;
sofia.freire@consulmar.pt; pedro.melo@consulmar.pt

Resumo

É apresentado “Dakhla Atlantique”, um interessante projeto de Porto de águas profundas, em região desértica, banhado por uma das maiores reservas mundiais de espécies pelágicas, e encarado pelas autoridades Marroquinas como um “farol” do desenvolvimento da sua região Sul.

1. Enquadramento Geral

A Direção dos Portos e Domínio Público Marítimo (DPDPM) de Marrocos adjudicou, em 2014, ao consórcio CONSULMAR/MDC/SIPORT21, os estudos de conceção e projeto do Porto Atlântico de Dakhla, envolvendo as seguintes missões:

- Missão 1 – Estudos de Base, Ordenamento e Implantação do Porto
- Missão 2 - Anteprojecto resumido (APS)
- Missão 3 - Ensaio em modelo físico reduzido
- Missão 4 - Estudo de Impacte Ambiental
- Missão 5 - Anteprojecto detalhado (APD)
- Missão 6 - Assistência Técnica ao Concurso

Nesta comunicação dar-se-á ênfase a aspetos das Missões 1 a 3 e 5, na perspetiva do desenvolvimento de estudos e projeto único e complexo, com profundas alterações de requisitos.

2. Estudos de Base, Ordenamento e Implantação do Porto

2.1 – Considerações iniciais

Os termos de referência definiam à partida o local exato onde deveria ser implantado o Porto, o seu programa geral e navios de projeto, assim como a sequência dos estudos de base a realizar (o que veio a condicionar sobremaneira o devir de todo o projeto), designadamente:

- 1.1 – Atualização do estudo de tráfego portuário (não abordado na comunicação)
- 1.2 – Estudo das Condições naturais (não abordado na comunicação)
- 1.3 – Estudo de Variantes para o Plano de Ordenamento do Porto
- 1.4 – Especificação de Campanha Geotécnica (local do Porto e Pedreiras)
- 1.5 – Estudo da Agitação na aproximação e interior do Porto
- 1.6 – Medição e estudo das Correntes devidas à maré, ondas e vento, sem e com Porto
- 1.7 – Estudo da Dinâmica litoral e Evolução da costa, sem e com Porto
- 1.8 – Estudo de navegabilidade e manobras de navios

Note-se que as missões 1.4 a 1.8 surgiam após seleção em 1.3 da variante de porto a desenvolver, decisão que deveria depender, pelo menos, do resultado das missões 1.6 e 1.7. Afloram-se seguidamente e de uma forma sequencial alguns dos principais aspetos associados.

2.2 – Estudo de Variantes para o Plano de Ordenamento e Implantação do Porto

Tendo em conta o “Plano Diretor Portuário Nacional” Marroquino (PDPN) para o Horizonte de 2030 e seus estudos de viabilidade, foi detalhado um exigente programa de necessidades, requerendo cais até -12m(ZH) para comércio (cargueiro e porta-contentores com, respetivamente, 160 e 220m de comprimento, 25 e 32m de boca e 10,4 e 10,0m de calado), e



cais até -8 m(ZH) para a pesca e reparação naval), separando os setores de Comércio e Pesca. Numa fase inicial dos estudos de ordenamento, foram consideradas 4 variantes portuárias (Figura 1), cada uma com duas fases (inicial+expansão). A separação dos setores do Comércio e Pesca foi feita na perpendicular à costa, tirando partido do aprofundamento natural dos fundos e considerando uma ou duas entradas independentes. Não obstante o PDPN apontar para solução de porto enraizado, considerou-se alternativa em porto destacado (Variante 4), destinada a minimizar potenciais impates sobre a dinâmica aluvionar e evolução da costa.

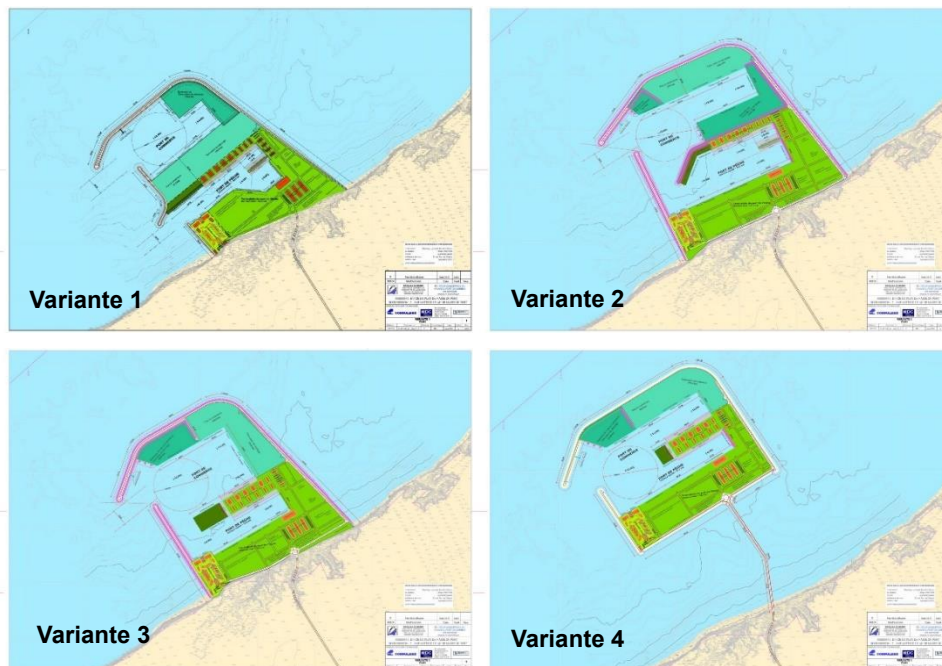


Figura 1. Plano de Ordenamento do Porto de Dakhla – Variantes iniciais (1 a 4)

A análise multicritério das variantes conduziu a 3 variantes “finais”, assumindo duas entradas (total separação de setores) e reajustes na implantação e distribuição de bacias e cais, para as seguintes configurações (Figura 2): a) Porto enraizado na praia e falésia, b) Porto “Ilha” ou destacado e c) Porto misto, enraizado (sector da Pesca) e destacado (sector do Comércio). Nesta fase, foram antecipados e aplicados a cada solução os estudos 1.6 e 1.7 (pontos seguintes). O Porto destacado foi reconfigurado (multiplicação de pontos de difração por redução progressiva da largura do porto para terra) e afastado da costa, por forma a minimizar o efeito de tómbolo, tendo em conta os rácios (distancia a terra e comprimento de “sombra”) sugeridos pelo CEM.

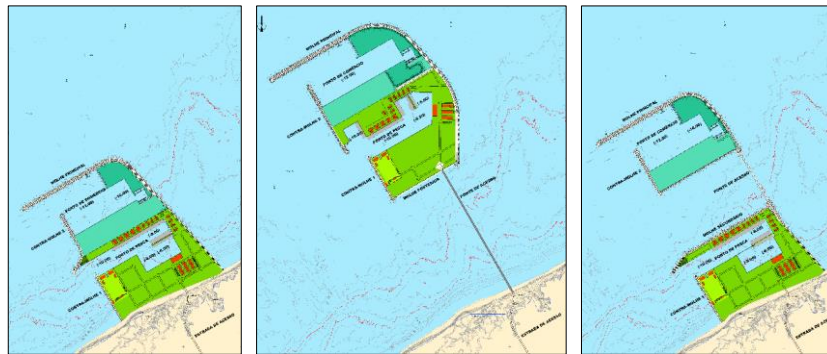


Figura 2. Plano de Ordenamento do Porto de Dakhla : a) Enraizado, b) Destacado, c) Misto.

2.3 – Estudo das Correntes devidas à maré, ondas e vento, sem e com Porto

Com base no modelo numérico MOHID da HIDROMOD, calibrado com recurso a medições “in situ”, foram realizadas simulações abrangendo ciclo de marés completo (vivas, médias e mortas), para a situação de referência e variantes do porto, considerando os efeitos dinâmicos da maré astronómica isoladamente e associados às condições de vento e agitação. A direção predominante das correntes máximas na aproximação é SSW, com velocidades entre 0.2 e 0.3m/s em águas-vivas (e vento de 30km/h), e inferiores a 0.5m/s, em condições de tempestade.

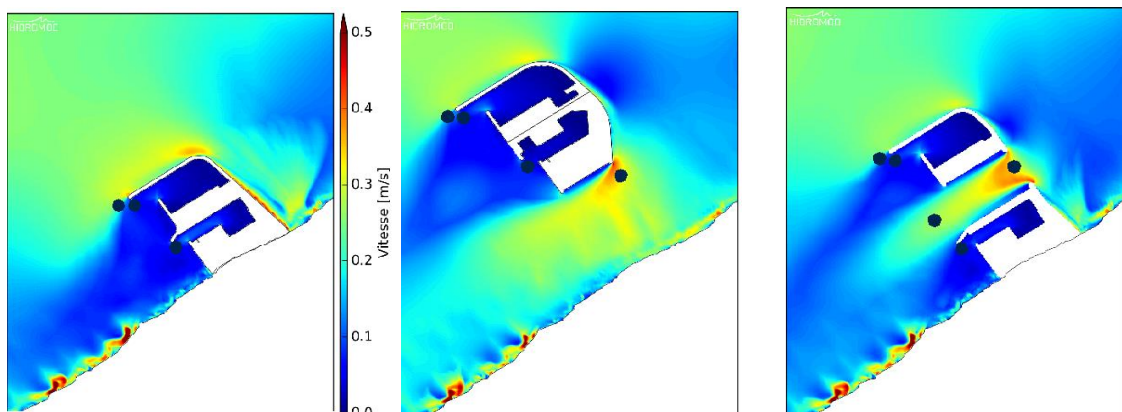


Figura 3. Velocidades máximas de corrente, para a conjugação das marés, ventos e agitação marítima de N ($H_s=1,5m$, $T_p=10s$), para diferentes variantes.

2.4 – Estudo da Dinâmica litoral e Evolução da costa, sem e com Porto

Dada a ausência de dados históricos, começou-se por enquadrar o regime sedimentar, tendo em conta o comportamento observado à entrada da Baía de Dakhla (natural ou por dragagem, no porto atual e canal de acesso) e nas regiões e portos a Norte (Laâyoune) e Sul (Nouakchot). A partir dos dados de campanha local (batimetria e granulometria das areias), do regime de ventos e da agitação local (ondulação e vaga), estimou-se o transporte sólido potencial no local (fórmulas do “CEM” e “CERC”), mensal e anual (15 anos de dados de 3 em 3h), replicando para dois trechos, a Norte e Sul, próximos, mas com orientações de costa ligeiramente diferentes. Considerando a morfologia envolvente do local, definiu-se esquema de funcionamento aluvionar com transporte nos dois sentidos e saldo médio anual da ordem de 200000 m³ (ondas) e 15000 m³ (vento), para Sul.

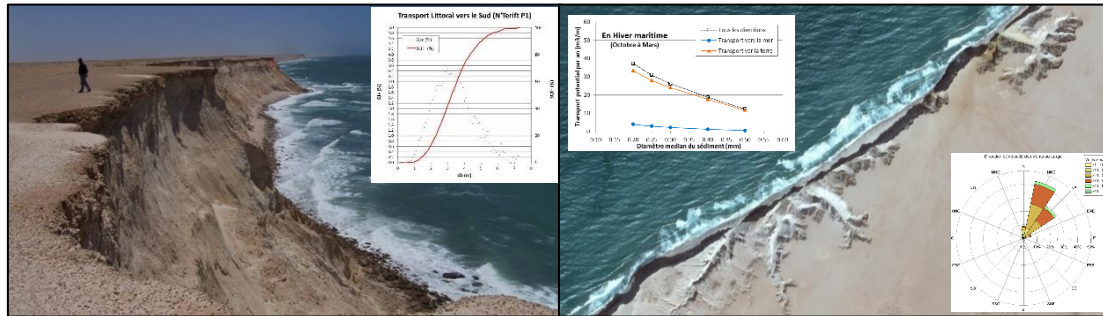


Figura 4. Fotos do local, com exemplos de Transporte potencial das ondas (esq.) e eólico (dir.)

Para avaliar o impacto das 3 variantes de porto sobre os processos de transporte (análise a curto prazo) e evolução da costa (análise a longo prazo), foram utilizados os modelos numéricos MOHID e SEDTRAM, e GenCade, respetivamente, operados pela Hidromod, numa análise de sensibilidade e risco, para vários cenários de caudal sólido transportado (0,2, 0,5 e 1,0 milhões de m³/ano) e horizontes temporais de 10 a 100 anos. As variantes A e C bloqueiam completamente a deriva litoral, apresentando assoreamento, com avanço máximo da ordem de 500 e 300 m (em 30 anos), imediatamente a Norte e Sul, respetivamente, e erosão distribuída, mais para Sul, limitada pelas falésias, até ser atingido um novo estado de equilíbrio dinâmico. A variante B induz a formação de tómbolo incompleto (por difração das ondas nos seus lados opostos), assim como a redução do transporte para Sul. A erosão a Sul é menor.



Figura 5. Exemplo da Evolução da linha de costa em 30 anos, para as 3 variantes do porto, e para 3 cenários de caudal sólido transportado (modelo GenCade).

2.5 – Primeira alteração dos requisitos de base (novo navio de projeto)

Na sequência de (re)avaliação dos estudos de viabilidade anteriores, entendeu a “Agência Nacional de Portos” Marroquina (ANP) considerar navio de projeto mais ambicioso, um porta-contentores com 250m de comprimento, 32m de boca e 12m de calado, exigindo cais com fundos de serviço a -14m(ZH). Esta cota era já muito próxima dos fundos naturais existentes, impondo restrições de navegabilidade no acesso ao porto ou exigindo a dragagem de canal de acesso. Para além do aprofundamento dos cais e revisão do layout geral do porto, decidiu ainda o Governo Marroquino optar pela configuração de porto enraizado (menor custo). As missões 1.5 (agitação) e 1.8 (navegabilidade) foram realizadas para o novo layout portuário da configuração enraizada, para os fundos de acesso existentes e alternativa com canal dragado à -17 m(ZH).

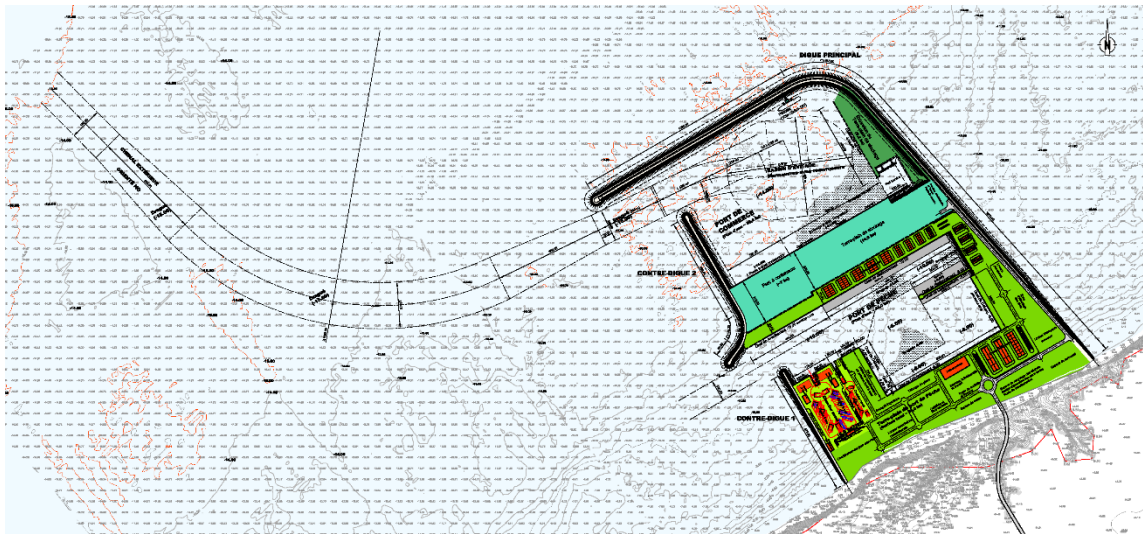


Figura 6. Planta do Porto para Cais a -14m(ZH) e opção de Canal de Acesso a -17m(ZH).

2.6 – Estudo da Agitação na aproximação e interior do Porto

Recorrendo ao modelo numérico MIKE 21-BW da DHI (“Danish Hydraulics Institute”), baseado das equações de Boussinesq modificadas, foi simulada a propagação de condições de agitação irregular até ao interior do Porto, considerando os efeitos da variação da profundidade, dissipação por atrito do fundo, reflexão e difração, porosidade das obras e a rebentação da onda. Foi realizada uma análise à indisponibilidade de todos os cais e bacias, a partir da comparação entre a agitação e vento aí obtidos (baseado em 15 anos de dados) e seus limites admissíveis.

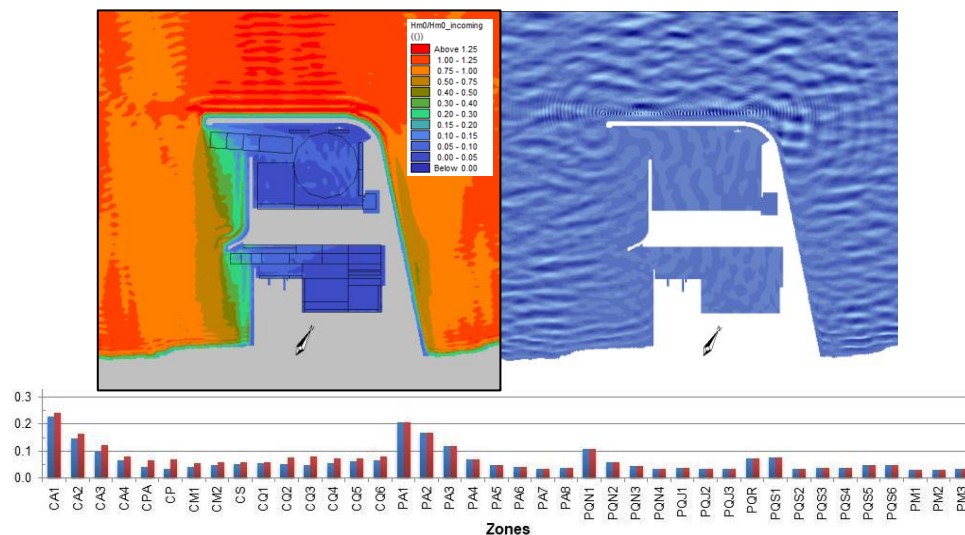


Figura 7. Mapas de variação dos índices de agitação (esq.) e superfície livre (dir.) de solução em taludes, comparação com solução vertical (baixo), para o rumo NO, $H_s=1m$, e $T_p=12s$.

2.7 – Estudo de navegabilidade e manobras de navios

Procedeu-se à simulação de manobras de navios em tempo real nas instalações da Siport21 e envolvendo pilotos Marroquinos, reproduzindo o comportamento de navios específicos, na



execução de manobras de acesso e saída do porto, sob a influência de ventos, correntes, ondas, limitações de profundidade, entre outros, em condições normais e excecionais (avaria de máquinas, ventos fortes, redução da eficácia dos rebocadores, etc). Foi simulada a configuração de porto enraizado, com fundos naturais e para canal de acesso dragado à -17.0m(ZH), dois tipos de navio (porta-contentores e graneleiro), apoio de rebocadores, e o atraque/saída aos postos referentes ao Porto de Comércio. O modelo mostrou que apenas os navios de contentores (250m) eram condicionados (abaixo da meia maré) para canal de fundos naturais, sendo viável a frequência de todos os navios, para o canal dragado, dentro de determinadas condições meteorológicas e com o apoio de rebocadores.



Figura 8. Simulação da acostagem de porta-contentores com apoio de rebocadores (Siport21).

3. Estudo adicional e segunda alteração dos requisitos de base (novo local e configuração portuária)

Em paralelo com os estudos então em curso, dadas as limitações dos fundos naturais do local previsto, face ao novo navio de projeto e, em particular, a extensão de canal a dragar e suas condições de navegabilidade, realizou-se um estudo de alternativas de localização do porto, na “vizinhança” do local inicial, incluindo a possibilidade de separar em locais distintos o Porto de Comércio e o de Pesca. Interessava manter a proximidade da estrada-eixo de infra-estruturas regionais de Dakhla (e da futura auto-estrada do Sul), assim como de extensa faixa de terreno alocável à urbanização e indústria previstas em terra. A análise multicritério dos potenciais locais, incluindo os levantamentos aí realizados, levou à escolha do local definitivo (B'') e situado cerca de 9Km a WSW do local originalmente previsto (Figura 9).

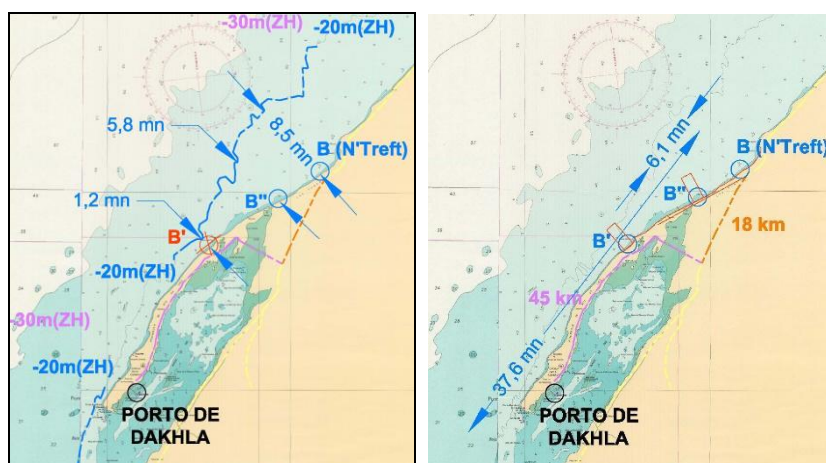


Figura 9. Plantas de localização alternativa (B – Localização original, B'' – Localização final).



4. Anteprojeto Resumido (APS)

Assumindo o promotor Dakhla Atlantique como um porto de águas profundas, reconfigurou-se o layout dos setores portuários (Figura 10), com maior comprimento de cais de comércio, reorganizado segundo duas bacias de acostagem orientadas na perpendicular à costa, criando um porto de reparação com acesso e bacia próprios, entre outros aspetos. Uma parte dos estudos anteriores teve de ser repetido para a nova situação.

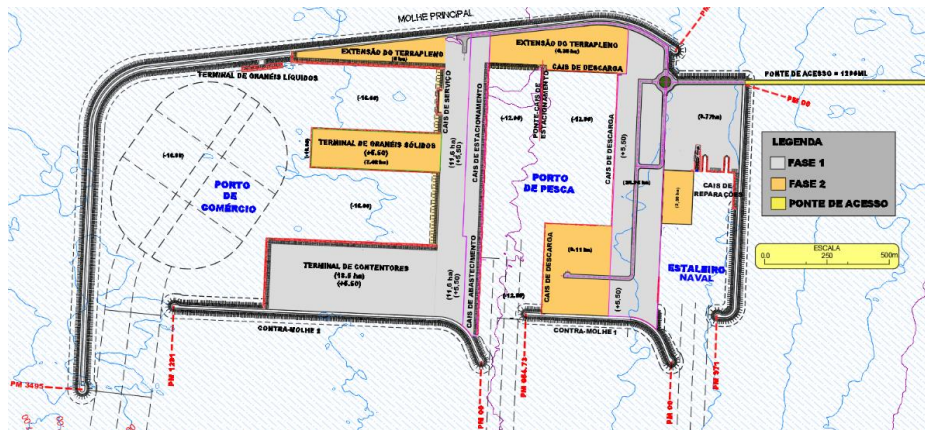


Figura 10. Plano de Ordenamento do Porto de Dakhla (Fases 1 e 2).

Escolhida a nova implantação, ordenamento e configuração portuária pretendidos pelo promotor, procedeu-se ao estudo de alternativas estruturais para as diversas obras associadas, ao nível de APS. O APS (do Francês “Avant Projet Sommaire”) equivale formalmente a um Estudo Prévio, incluindo soluções alternativas, mas com um grau de desenvolvimento próximo de um Anteprojeto. Tem interesse referir que diversos pormenores das soluções adotadas foram adaptados, procurando integrar soluções práticas da engenharia franco-marroquina.

No caso das obras de acostagem interiores, dadas as elevadas profundidades do local, assim como as cotas de serviço requeridas, foram escolhidas soluções do tipo vertical, recorrendo a caixotões em betão armado. As restantes obras interiores (retenção e proteção do terrapleno) foram consideradas com prismas de enrocamentos.

Para as obras de abrigo e proteção marítima exterior, procedeu-se a uma análise preliminar de alternativas e suas combinações, resultando na pré-seleção de dois conjuntos de soluções: um vertical (caixotões), outro com obras em talude (protegidos por mantos de enrocamentos e blocos de betão). Dada as elevadas profundidades, interessava sobretudo reduzir a volumetria das obras, sendo mais eficaz atuar na geometria exterior de cada perfil, do que na dimensão individual (e peso) dos seus elementos. No caso das obras em talude (perfis apresentados no ponto seguinte), foram considerados mantos de proteção com blocos Antifer (“BCR”, em francês) e Tetrápodos, inclinados a 3(H):2(V) e 4(V):3(V), respetivamente. No núcleo de ToT foi incorporado prisma de material pétreo de jazida especial, a envolver com o ToT de pedreiras selecionadas. No caso dos caixotões, procurou minimizar-se o volume de enrocamentos de fundação, aumentando a altura dos caixotões, assim como uniformizar a geometria destes com as soluções consideradas para as obras interiores.

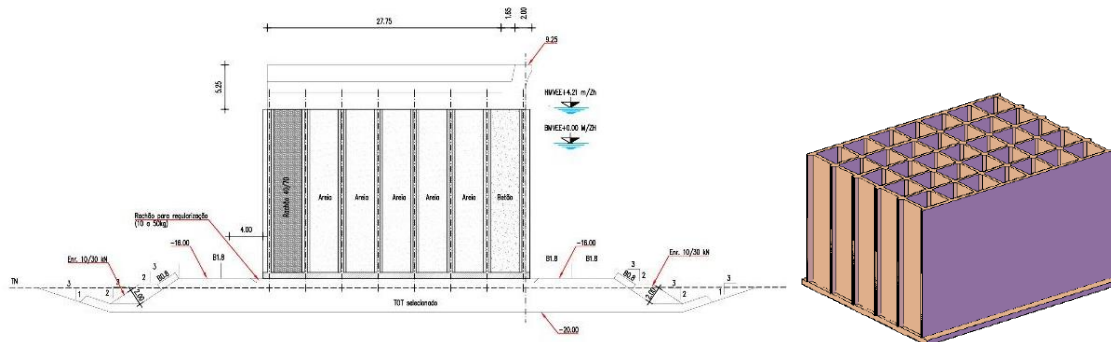


Figura 11. Perfil tipo de Molhe em caixotões (esq.) e perspetiva 3D de caixotão (dir.).

A estabilidade dos mantos foi verificada com a fórmula de Hudson e a resistência dos muros-cortina à ação das ondas foi verificada com a formulação de F. Martin (distinguindo ação com ou sem “impato”). Os caixotões foram verificados em termos de flutuabilidade e das ações exteriores, incluindo a da onda, de acordo com o Manual PROVERBS e que distingue ações lentas (“quasi-standing wave”) de ações rápidas (“impact wave”). O galgamento foi verificado de acordo com as indicações do EurOtop. Todas as obras foram verificadas em termos geotécnicos, tendo em conta os resultados das campanhas realizadas.

A análise multi-critério da solução vertical e em talude, teve em conta critérios técnicos de funcionamento hidráulico e estrutural (estabilidade, geotecnia, galgamento e transmissão de ondas), riscos de exploração, durabilidade e facilidade de inspeção e manutenção, aspetos construtivos, capacidade para expansão futura, assim como critérios económicos (investimento inicial, riscos associados aos preços estimados, custo de inspeção/manutenção e reparação), e levou à opção pela solução de obras exteriores em talude.

5. Ensaios em Modelo Físico Reduzido

A solução escolhida do APS (obra em taludes) foi submetida a Ensaios em Modelo Físico Reduzido no Laboratório indicado pelo promotor, LPEE, em Casablanca, envolvendo testes em canal e em tanque, às escalas 1:50 (2D), 1:56 e 1:46 (3D). Foram gerados espectros de Jonwap, com altura significativa espectral (H_{m0}) de 2,5 a 6,6m, para períodos de pico (T_p) de 10 a 18 s.

Os testes em canal (dimensões 44m x 1.05m x 2m, Figura 12) permitiram verificar e otimizar o perfil corrente da proteção marítima do Molhe Principal, em termos de estabilidade e galgamento, com melhoramentos ao nível da elevação da berma de coroamento, reforço da berma de pé de talude e proteção do talude interior mais profunda mas com blocos de menor peso.





Figura 12. Ensaio em canal de ondas.

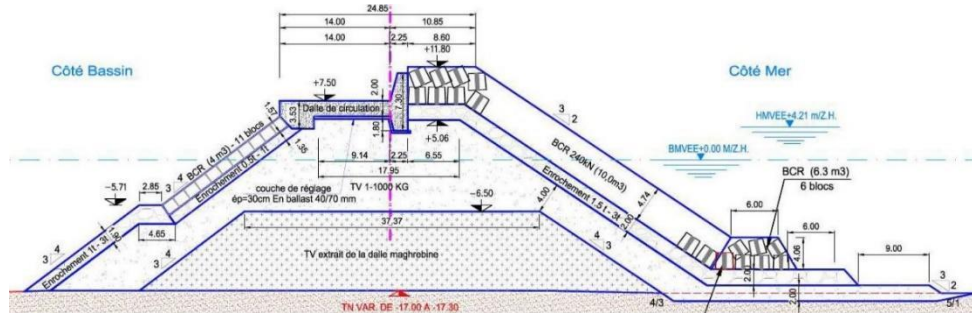
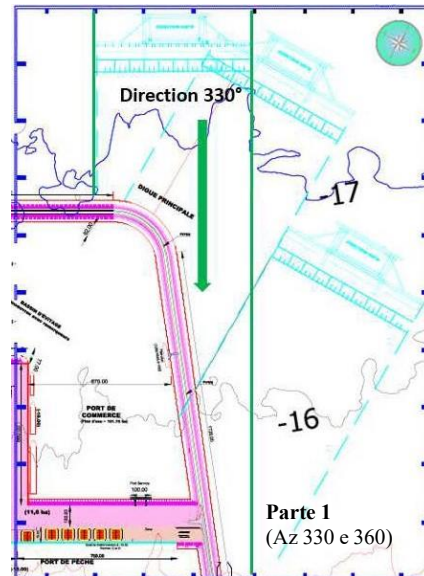
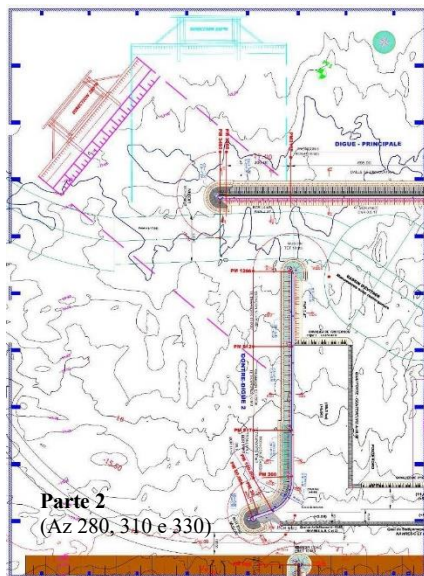


Figura 13. Perfil Tipo corrente do Molhe Principal.

Dadas as dimensões do tanque disponível (44m x 35m x 1.2m), face à dimensão do porto, para se assegurar a sua modelação integral (exigência do promotor) e representatividade dos principais fenómenos físicos envolvidos, os ensaios em tanque foram decompostos em 4 partes, cada uma correspondendo a um quadrante do porto (o que implicou a construção/demolição de 4 modelos!). Foi medida e analisada a agitação em várias sondas, verificada a estabilidade hidráulica dos mantos de proteção e o galgamento de todas as obras. No modelo 1 foram ensaiados rumos de 330 e 360°N, no modelo 2 testaram-se rumos de 330, 310 e 280°N, no modelo 3 foram reproduzidos rumos de 280 a 310°N, sendo simulado o rumo 360°N no modelo 4. A figura seguinte mostra o layout de cada modelo, sendo em alguns casos necessário mudar os batedores de ondas de lugar, para a mesma direção.



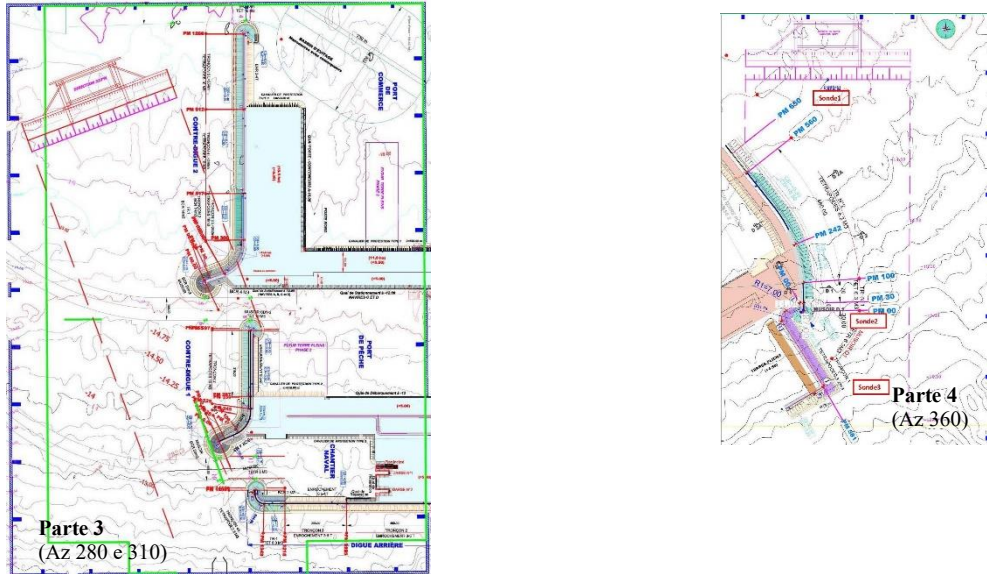


Figura 14. Implantação dos 4 modelos do Porto de Dakhla em um só tanque.

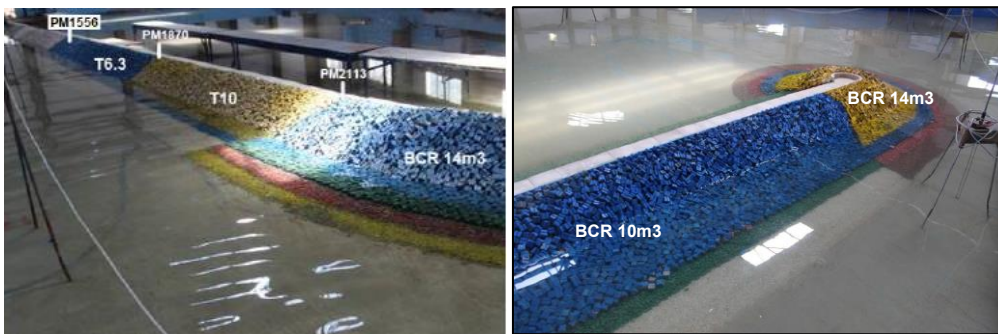


Figura 15. Fotos dos modelos 1 - NE-cotovelo (esq.) e 2 - NW-cabeça do Molhe principal (dir.).

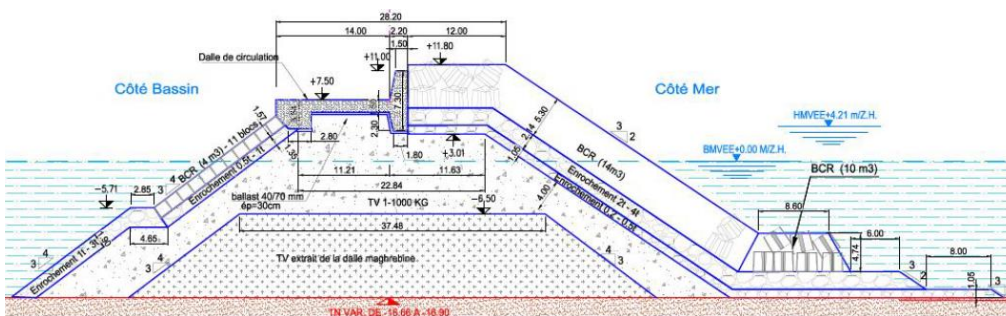


Figura 16. Perfil tipo do cotovelo e cabeça do Molhe Principal.

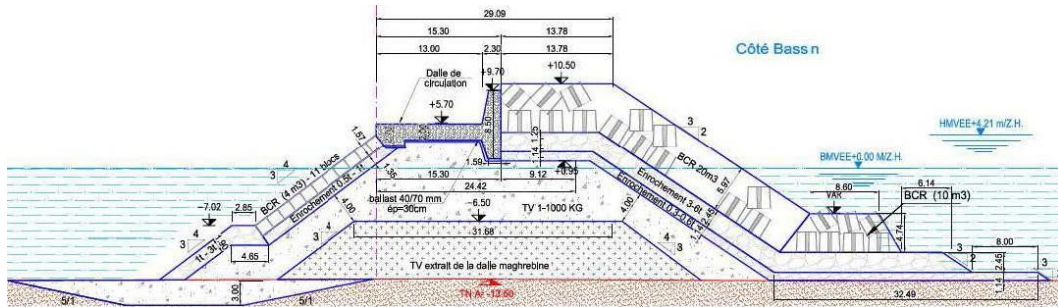


Figura 17. Perfil tipo da cabeça dos Contra-molhes 1 e 2.

Todas as obras se revelaram estáveis, apenas tendo sido necessário elevar a cota de coroamento dos Contra-molhes 1 e 2, para minimização de galgamento.

6. Anteprojeto Detalhado (APD)

O APD (do Francês “Avant-Projet Détaillé”) equivale formalmente a um Anteprojeto, mas com um grau de desenvolvimento próximo de um Projeto de Execução. Apresentam-se de seguida a planta geral das obras de Fase 1 e algumas secções tipo das obras interiores. As obras exteriores são muito semelhantes às do APS (ver ponto anterior).

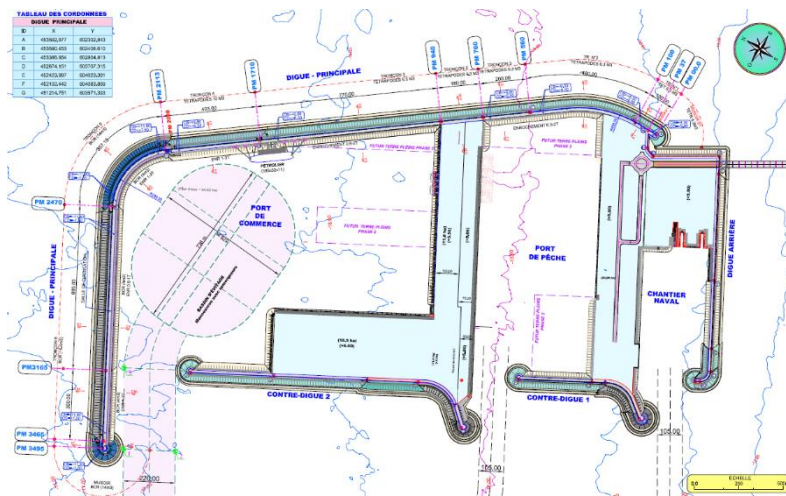


Figura 18. Planta com a configuração final das obras de Fase 1 do Porto de Dakhla Atlantique



Figura 21. Perspetiva do Porto “Dakhla Atlantique”

O porto subdivide-se do mar para terra em três setores específicos bem separados:

- Setor comercial, com cotas naturais a -16(ZH), cais para navios de mercadorias e porta-contentores, rampa Ro-Ro, posto para petroleiros, pontão flutuante de serviço;
- Setor da Pesca (costeira e de alto mar), com cotas a -12(ZH), dotado de cais para abastecimento, estacionamento e descarga de pescado;
- Setor da Indústria Naval, com cotas a -12(ZH), incluindo cais, docas de alagem e plano inclinado.

Do ponto de vista de consultor, todos os estudos e fases de projeto foram extremamente desafiantes, pela dimensão do porto e sua implantação em ambiente natural muito especial (e sem quaisquer dados de origem), assim como pelas várias alterações dos requisitos de base contratados. O consórcio CONSULMAR/MDC/SIPORT21, com a colaboração da empresa de modelação Hidromod, desenvolveu um vasto conjunto de campanhas e estudos de base, muitos deles incluídos nas missões 1.1 e 1.2, não abordadas aqui por insuficiência de espaço.

Referências Bibliográficas

- CONSULMAR/MDC/Siport21 (2015 à 2018). Étude de conception du nouveau Port Dakhla Atlantique. Mission 1 : Étude du Plan de Masse du Port. Rapports et Annexes des Sous-Missions 1.1 à 1.8.
- CONSULMAR/MDC/Siport21 (2016, 2017). Étude de conception du nouveau Port Dakhla Atlantique. Étude de localisations et configurations Portuaires Alternatives. Notes Techniques.
- DPDPM (2018). Analyse multicritère pour le choix du site d'implantation du nouveau port Dakhla Atlantique. Note Technique.
- CONSULMAR/MDC/Siport21 (2019). Étude de conception du nouveau Port Dakhla Atlantique. Mission 2 : Avant-Projet Sommaire.
- CONSULMAR/MDC/Siport21 (2019, 2020). Étude de conception du nouveau Port Dakhla Atlantique. Mission 3 : Étude de Stabilité sur Modèle Physique en Canal et en Cuve à Houles. Méthodologies des Essais.
- LPEE (2020). Étude de conception du nouveau Port Dakhla Atlantique. Mission 3 : Étude de Stabilité sur Modèle Physique en Canal et en Cuve à Houles. Rapports Définitifs.
- CONSULMAR/MDC/Siport21 (2020, 2021). Étude de conception du nouveau Port Dakhla Atlantique. Mission 5 : Avant-Projet Détaillé. Rapports.