



ESTUDO DO COMPORTAMENTO SÍSMICO DAS ESTRUTURAS PORTUÁRIAS DO PORTO NADOR WEST MED

Hugo Leite¹; Najat Chaouq²

¹MSW, Estudos e Projetos de Obras Marítimas, Lda; WW Consultores de Hidráulica e Obras Marítimas, SA; ²Nador West Med, SA

hleite@msw-consultores.pt, n.chaouq@nadorwestmed.ma.

1. Introdução

No âmbito da política que estabeleceu para o desenvolvimento das suas regiões, o Governo do Reino de Marrocos decidiu construir uma nova plataforma industrial e portuária na sua costa mediterrânea oriental, a qual designou de Nador West Med (NWM).

O projeto NWM localiza-se na zona estratégica da baía de Betoya, situada na fachada oeste do cabo *des Trois Fourches*, a menos de 250 milhas do Estreito de Gibraltar e a 25km da cidade de Nador. Trata-se de num local privilegiado pela sua proximidade às principais rotas marítimas este-oeste do tráfego de contentores e do transporte de produtos petrolíferos. O projeto compreende a construção de um porto de águas profundas e uma extensa plataforma logística e industrial a construir nas imediações do porto. A empresa pública Nador West Med, S.A. (NWMSA) foi criada com o objetivo de promover os estudos de base, o projeto e a construção do empreendimento, bem como de assegurar a sua futura gestão.

A empreitada relativa à primeira fase de construção do porto encontra-se concluída. Encontra-se em curso a 2^a fase de construção, que implica a ampliação do cais e dos terraplenos do Terminal de Contentores Oeste em 880m.

Tendo em conta a significativa atividade sísmica do local, o dimensionamento sísmico das estruturas portuárias constituiu uma preocupação central. A presente comunicação aborda os aspetos relacionados com a verificação do comportamento das obras mais críticas em situações sísmicas de projeto, recorrendo à metodologia *Performance-Based Design* (conceção baseada no desempenho).

Esta abordagem exigiu a definição de critérios de desempenho específicos para cada estrutura, em função dos níveis de dano admissíveis. Foram utilizadas metodologias de cálculo avançadas, incluindo análises dinâmicas não lineares, com o objetivo de avaliar a resposta das estruturas perante sismos de diferentes intensidades, conforme definidas nos dados de base do projeto.

A presente comunicação centrar-se-á em aspetos relacionados com a análise do comportamento em situações sísmicas das principais estruturas do porto, a saber:

- Quebra-mar principal com 4233 m de comprimento, com um troço em caixotões com 2733 m, construído em profundidades de até -35,00 m ZH, e um troço em talude de enrocamento com proteção em blocos pré-fabricados do tipo *accropode*, com 1500 m de extensão;
- Terminal de Graneis Líquidos com três postos de acostagem com fundo de serviço de -22,00 m ZH;
- Terminal de Contentores Este com 1520 m de extensão, com fundo de serviço de -18,00 m ZH e com um terraplano com 75 ha;
- Terminal de Contentores Oeste com 1440 m de extensão, com fundo de serviço de -18,00 m ZH e com um terraplano com 72 ha.

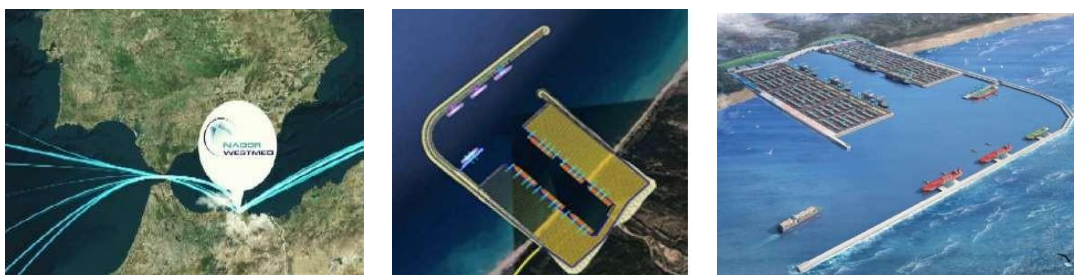


Figura 1. Porto Nador West Med. Localização (esquerda), planta geral (centro) e vista (direita) do porto NWM.



2. Sismicidade do local

O porto Nador West Med fica localizado numa zona de elevada sismicidade. De facto, Nador situa-se na região do Rif, uma das zonas mais ativamente sísmicas de Marrocos, facto ilustrado pelos numerosos eventos sísmicos registados nos catálogos e estudos sismológicos. A atividade sísmica na região deve-se à convergência das placas africana e euroasiática, o que tem causado, até à data, terremotos de intensidade relativamente moderada.

Um estudo específico de caracterização do risco sísmico do local do porto foi efetuado setembro de 2010 e atualizado em março de 2014 por Ait Brahim e Tadili. Este estudo de risco sísmico baseou-se numa avaliação probabilística, combinada com uma avaliação determinista do risco. A avaliação probabilística foi realizada com um modelo de cálculo considerando dois modelos sismotectónicos e cinco leis de atenuação do movimento sísmico. O estudo resultou no estabelecimento de três níveis de movimentos sísmicos em termos de acelerações máximas do solo (*Peak Ground Acceleration - PGA*) médias para três períodos de retorno (475 anos, 975 anos e 1975 anos).

O estudo realizado por Ait Brahim e Tadili não caracterizava, no entanto, os movimentos sísmicos do ponto de vista da sua riqueza espectral, ou seja, em termos da distribuição da energia sísmica em diferentes frequências ou períodos. Este aspeto é de vital importância para a consideração da ação sísmica no dimensionamento das obras do porto.

Em 2014, a empresa Fugro Geoter complementou o estudo de risco sísmico caracterizando os movimentos sísmicos do ponto de vista da sua riqueza espectral, implementando uma abordagem conforme com os requisitos do Eurocódigo 8. O estudo resultou na definição dos movimentos sísmicos para os três níveis de sismo estabelecidos, sob a forma, numa primeira fase, de espectros de resposta elástica de risco uniforme. Posteriormente, foram preparados um conjunto de acelerogramas calibrados com base em cada um dos espectros de resposta estabelecidos para o local.

Assim, no Caderno de Encargos do projeto, elaborado pela NWM, documento que serviu de referência no dimensionamento e na construção das obras portuárias, foram estabelecidos três níveis de ação sísmica, correspondentes a diferentes períodos de retorno, os quais deveriam ser considerados no dimensionamento das obras que integram o porto. Os três níveis de ação sísmica estabelecidos no Caderno de Encargos para o dimensionamento das obras portuárias foram os seguintes:

- Sismo N1 – Correspondente a um período de retorno de 475 anos. Aceleração máxima de referência em terreno rochoso de 0,14g. Magnitude de 5,5.
- Sismo N2 – Correspondente a um período de retorno de 975 anos. Aceleração máxima de referência em terreno rochoso de 0,19g. Magnitude de 5,5.
- Sismo N3 – Correspondente a um período de retorno de 1975 anos. Aceleração máxima de referência em terreno rochoso de 0,25g. Magnitude de 6,0.

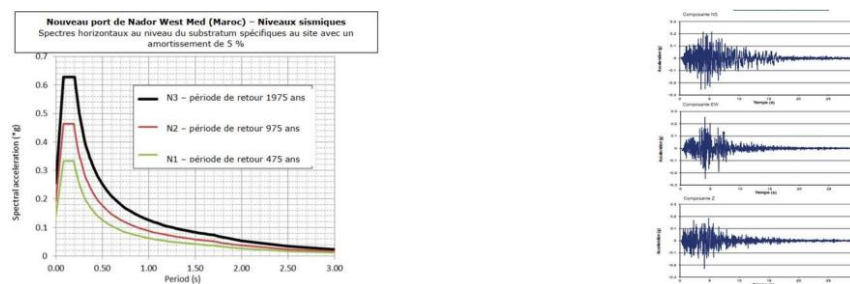


Figura 2. Espectros de resposta correspondentes aos diferentes níveis de ação sísmica (esquerda). Acelerogramas preparados para o sismo N3 (direita).



3. Critérios de dimensionamento

No Caderno de Encargos foi estabelecido o critério de dimensionamento das obras portuárias em situações de projeto sísmicas. O critério passou pela definição de níveis de danos nas estruturas considerados admissíveis para diferentes níveis de intensidade da ação sísmica. Foram estabelecidos dois níveis de danos para todos os tipos de estruturas portuárias.

- Operacional – A estrutura deveria permanecer em condições de operar após a ocorrência de um sismo, sem a necessidade de interromper a operação.
- Reparável – Após um sismo a estrutura poderia sofrer danos controlados que envolvessem resposta plástica e/ou deformação residual limitados, cuja reparação implicasse a interrupção da operação por um período de tempo curto a moderado.

A caracterização dos níveis de danos foi estabelecida recorrendo à publicação da PIANC [1].

No Caderno de Encargos foi atribuída uma determinada classe de comportamento a cada uma das diferentes estruturas portuárias. Para cada classe de comportamento são estabelecidos níveis de danos admissíveis para diferentes níveis de ação sísmica, tendo em conta a importância da estrutura. As classes de comportamento foram estabelecidas recorrendo à metodologia proposta em [1]. Seguindo esta metodologia a estruturas são classificadas como sendo de classe S, A, B e C, correspondendo os graus S e A respetivamente, a estruturas críticas, nas quais se operam produtos perigosos e a estruturas menos importantes que as estruturas de classe S, mas que, ainda assim, sejam estruturas importantes que uma vez danificadas, são de difícil reparação. As classes B e C correspondem a estruturas menos importantes.

Indica-se na tabela em baixo a classe de comportamento exigida para cada uma das principais estruturas do porto.

Tabela 1

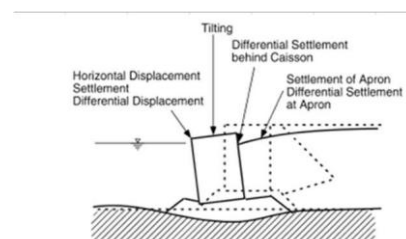
Estrutura	Classe de comportamento	Sismo N1	Sismo N2	Sismo N3
Quebra-mar de caixotões	A	Operacional (com onda)	Reparável (com onda)	Reparável
Terminais de combustíveis	S	-	Operacional	Reparável
Quebra-mar de taludes	A	Operacional	Reparável	-
Terminais de contentores	A	Operacional	Reparável	-
Cais de serviço	A	Operacional	Reparável	-

Os níveis de danos são estabelecidos por meio de valores limite dos deslocamentos e deformações das estruturas de gravidade. Em estruturas de contenção flexíveis e em estruturas porticadas, para além dos valores limite de deformação e de deslocamento, são definidos valores limite de extensões nas secções críticas dos elementos estruturais. Os valores limite adotados no dimensionamento das estruturas do porto Nador West Med foram os valores recomendados em [1] e em [2].

Apresentam-se de seguida, a título de exemplo, os parâmetros definidores dos níveis de danos em estruturas de gravidade recomendados em [1].

Tabela 2

Nível de danos	Operacional	Reparável
Deslocamento horizontal residual (% da altura)	1,5%	1,5% a 5%
Rotação no sentido do mar residual	Menos de 3°	3° a 5°





4. Análises do comportamento sísmico das estruturas

O comportamento de estruturas portuárias em situações de projeto sísmicas pode ser efetuado recorrendo a diferentes tipos de análises, com diferentes níveis de complexidade. Poderão ser utilizadas análises simplificadas, como sejam as análises pseudo-estáticas - historicamente muito utilizadas no dimensionamento de estruturas portuárias - as análises dinâmicas simplificadas - com maior grau de complexidade - ou as análises dinâmicas; análises mais complexas que permitem a avaliação detalhada do comportamento das estruturas em termos de deformações, deslocamentos, ductilidade, extensões, bem como em termos do que podem ser os respetivos modos de rotura.

Em [1] é recomendada a utilização de diferentes tipos de análise em função da classe de comportamento da estrutura e em função da fase de projeto.

Table 5.1. Types of analysis related to performance grades.

Type of analysis	Performance grade			
	Grade C	Grade B	Grade A	Grade S
Simplified analysis: Appropriate for evaluating approximate threshold level and/or elastic limit and order-of-magnitude displacements	■	■	■	■
Simplified dynamic analysis: Of broader scope and more reliable. Possible to evaluate extent of displacement/stress/ductility/strain based on assumed failure modes		■	■	■
Dynamic analysis: Most sophisticated. Possible to evaluate both failure modes and extent of displacement/stress/ductility/strain			■	■

Index:
■ Standard/final design
■ Preliminary design or low level of excitations

Figura 3. Recomendações relativas ao tipo de análise sísmica a adotar [1].

A aplicação da metodologia baseada no desempenho das estruturas (*Performance Based Design*) na sua plenitude, implica a realização de análises dinâmicas no dimensionamento de estruturas de gravidade e, pelo menos, a utilização de análises dinâmicas simplificadas no dimensionamento de estruturas porticadas.

Seguindo as recomendações de [1], na avaliação do comportamento das estruturas de gravidade do porto Nador West Med, foram realizadas análises dinâmicas totalmente acopladas (*fully coupled dynamic analysis*), simulando no mesmo modelo, o terreno, a estrutura e o fluido (água do mar). As análises dinâmicas foram realizadas recorrendo a modelos de elementos finitos construídos no software PLAXIS. As análises foram efetuadas no domínio do tempo, recorrendo aos acelerogramas preparados para o efeito, devidamente calibrados para os espectros de resposta estabelecidos para o local.

Nos modelos utilizados foram simuladas as características geométricas das estruturas, bem como o comportamento do terreno. A modelação do terreno foi realizada recorrendo a modelos constitutivos adequados à sua modelação em condições dinâmicas, simulando adequadamente a rigidez ao corte e a sua evolução em função dos níveis de distorção, bem o amortecimento do terreno e dos restantes materiais. Foram ainda utilizados modelos constitutivos do solo que simulam a liquefação do solo, permitindo simular o aumento de pressões intersticiais nos estratos de material arenoso sujeitos a corte cíclico.

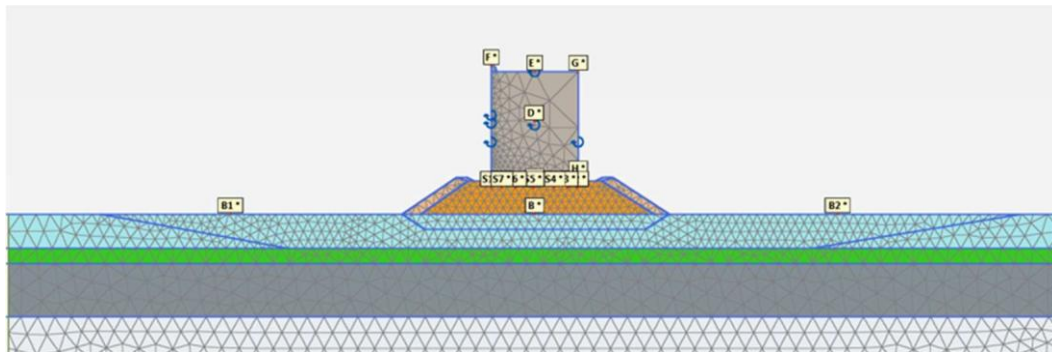


Figura 4. Exemplo de um modelo de cálculo utilizado na avaliação do comportamento sísmico do quebra-mar.

Na análise do comportamento das estruturas porticadas, como são as estruturas dos terminais de contentores, foram efetuadas análises modais com recurso aos espectros de resposta, bem como análises estáticas não lineares (*pushover analysis*). Este tipo de análises permitiu avaliar o comportamento não linear das estruturas e verificar o cumprimento dos critérios de danos estabelecido.

As análises dinâmicas permitiram avaliar as acelerações na estrutura, as deformações e os deslocamentos durante o sismo e os respetivos valores residuais. Os valores máximos das acelerações ao longo da estrutura foram utilizados no cálculo das forças de inércia adotadas no dimensionamento dos elementos estruturais. Os valores dos deslocamentos e das deformações da estrutura foram comparados com os valores limite estabelecidos no critério de danos adotado.

A título de exemplo, são apresentados nas figuras seguintes registos dos deslocamentos no topo de um caixotão do quebra-mar principal durante sismos de nível N3.

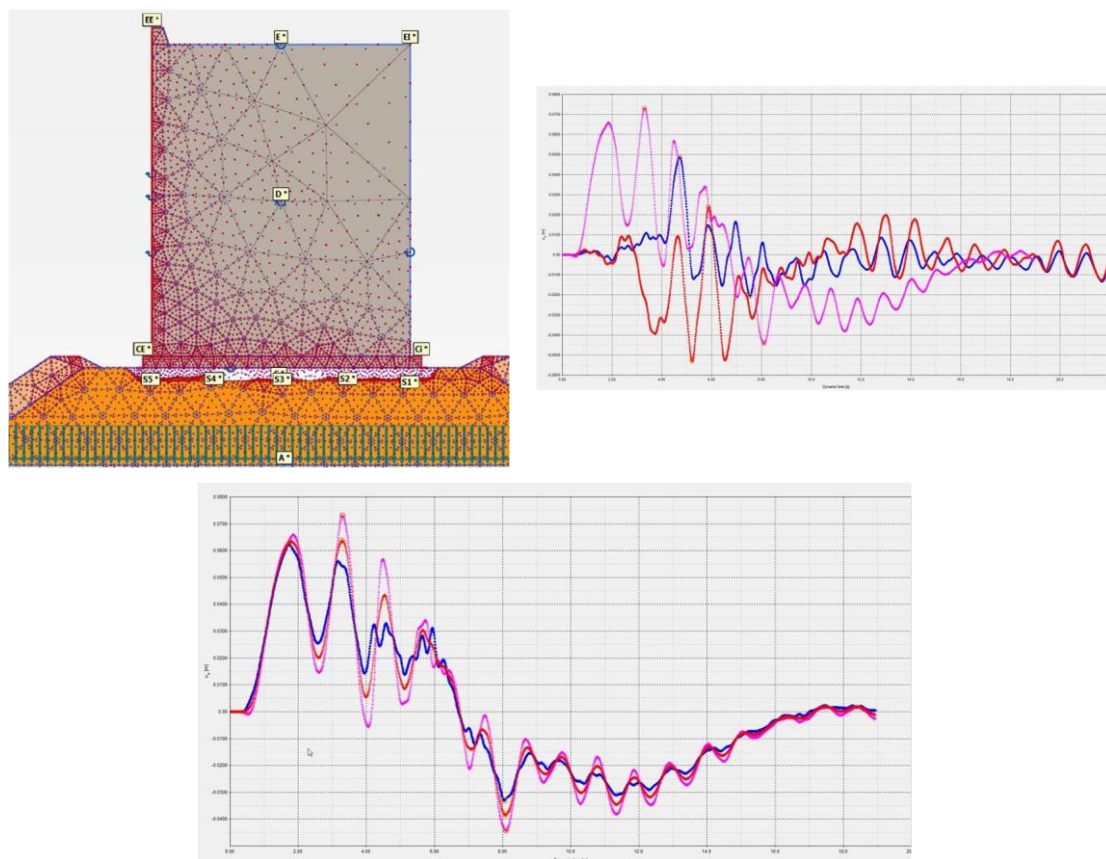


Figura 5. Registos dos deslocamentos horizontais do ponto do coroamento do quebra-mar para sismos dos níveis N1, N2 e N3 (em cima à direita). Registos dos deslocamentos horizontais dos pontos do coroamento, do centro e da base do quebra-mar, para sismos dos níveis N1, N2 e N3 (em baixo).

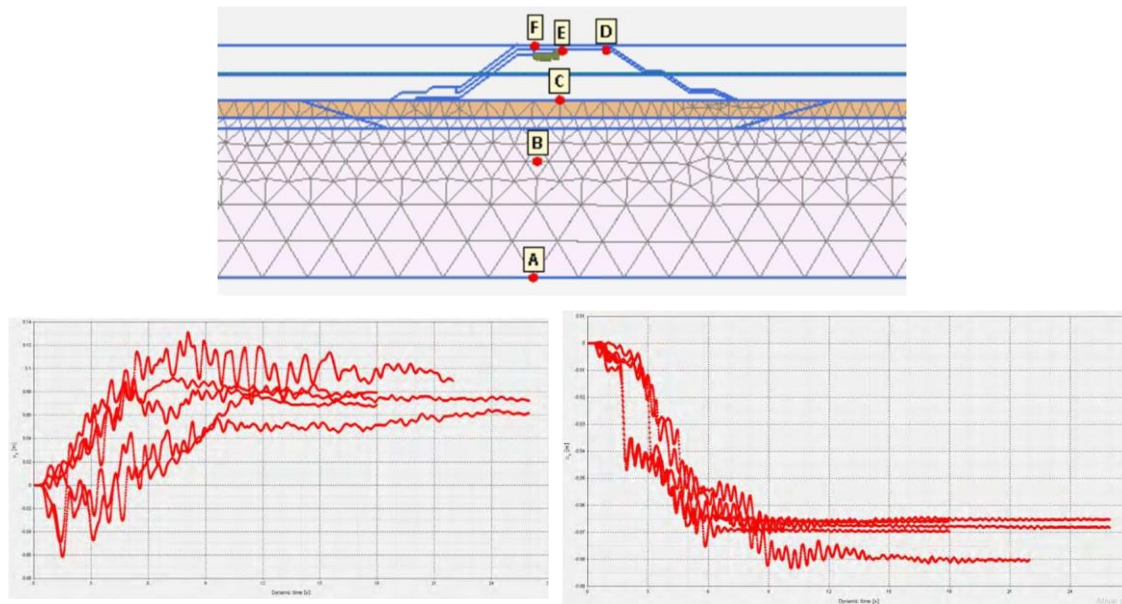


Figura 6. Registos dos deslocamentos horizontais (à esquerda) e deslocamentos verticais (à direita) dos pontos do coroamento do quebra-mar de taludes para sismos do nível N2.

Referências Bibliográficas

- [1] MarCom, P.I.A.N.C. (2001). "Seismic design guidelines for port structures". In Working Group (No. 34).
- [2] ASCE (2014). "Seismic design of piers and wharves". American Society of Civil Engineers.