



4<sup>as</sup> Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária  
Angra do Heroísmo, 20 e 21 de Outubro de 2005

## **ESTRUTURAS MARÍTIMAS DO TERMINAL DE DESCARGA DE “LNG” NO PORTO DE SINES**

Alexandre Ferreira da Costa, Pedro Bastos Martins

Consulmar – Projectistas e Consultores, Lda.  
Av. Joaquim António de Aguiar, 27-9º, 1099-062 Lisboa  
afcosta@consulmar.pt, pedro.m@consulmar.pt

### **RESUMO**

O Terminal de “LNG” do Porto de Sines, da Transgás Atlântico, é uma instalação que permite a recepção de navios tanques de “LNG”, procedendo à sua descarga, armazenagem temporária, processamento da sua gasificação e introdução na rede de distribuição de gás natural do país.

O Terminal de Descarga fica implantado no intradorso do Molhe Leste do Porto de Sines, em frente ao Terminal de Carvão, partilhando a mesma bacia de manobra.

A frente de acostagem é do tipo descontínuo (jetty), formada por uma plataforma de descarga em posição central, com dois duques de alba de acostagem de cada lado, e permitindo receber navios tanques com capacidades até 165000 m<sup>3</sup> de “LNG”, caracterizados por dimensões máximas de 300 m de comprimento, 42 m de boca e 13m de calado.

A estrutura do terminal é constituída por caixotões de betão armado de grandes dimensões, fundados sobre enrocamentos parcialmente colocados sobre o talude interior do molhe já existente.

A natureza criogénica e combustível do produto a movimentar obriga à adopção de medidas de segurança muito exigentes com repercussão no dimensionamento das estruturas, nomeadamente quanto às acções sísmicas.

Esta comunicação apresenta os aspectos mais relevantes da concepção e projecto das obras acostáveis do Terminal “LNG” no Porto de Sines, sendo referidos os aspectos construtivos da execução destas estruturas e os parâmetros condicionantes do dimensionamento e verificação da estabilidade.

### **ARRANJO GERAL DO TERMINAL**

O Arranjo Geral do Terminal de “LNG” de Sines apresenta-se na figura seguinte, Fig.1, nela estando identificadas as localizações das seguintes instalações :

- Terminal de Descarga, no canto sudoeste da bacia portuária este, onde se situam também o Terminal de Carvão e o Terminal Multiusos ;
- Esteira de Tubagens, que se estende desde o Terminal de Descarga, primeiro numa estrutura ao longo do talude interior do molhe, depois sobre o travessão do enraizamento do molhe, seguindo pelo terraplano, até à área operacional ;
- Área Operacional, com os dois Depósitos de “LNG” e as instalações de processamento da gaseificação ;



## 4<sup>a</sup>s Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária Angra do Heroísmo, 20 e 21 de Outubro de 2005

- Tomada de Água, no saco do porto da nova bacia sueste, destinada à captação de água do mar para a gaseificação do “LNG” ;
- Área de Apoio, com as instalações técnicas e administrativas de apoio ao funcionamento do terminal.

São igualmente de referir a ampliação do Molhe Este para sul e o terminal para contentores patentes na figura, e cujas empreitadas decorreram praticamente em simultâneo.



Fig.1 – Fotografia aérea do Terminal de “LNG” (Google Earth)

### TERMINAL DE DESCARGA

A localização do terminal no intradorso do Molhe Este (braço norte), teve por objectivo obter o máximo abrigo da ondulação, mantendo a maior distância de manobra ao cais do terminal de carvão, e permitindo a folga adequada ao travessão do enraizamento, para a manobra dos navios tanques e reboques.

O terminal foi concebido de modo a receber navios tanques de “LNG” com dimensões máximas de 300m de comprimento total, 42m de boca e 13m de calado, correspondendo a uma capacidade de 165 000m<sup>3</sup> de “LNG”, estando igualmente preparado para permitir a acostagem de navios de menor capacidade, até 35 000 m<sup>3</sup> de “LNG”, com cerca de 120m de comprimento.

A implantação do terminal situa o seu eixo a cerca de 255m do eixo do travessão do enraizamento, com o alinhamento da acostagem paralelo ao eixo do Molhe Este, situado a 84m de distância, correspondendo à optimização do aproveitamento da área da bacia de manobra a partilhar com o terminal de carvão que se situa em frente.

No arranjo geral do terminal salienta-se a frente de acostagem e o alinhamento das amarrações, com a qual coincide a estrutura de apoio das tubagens, conforme se indica na figura seguinte.

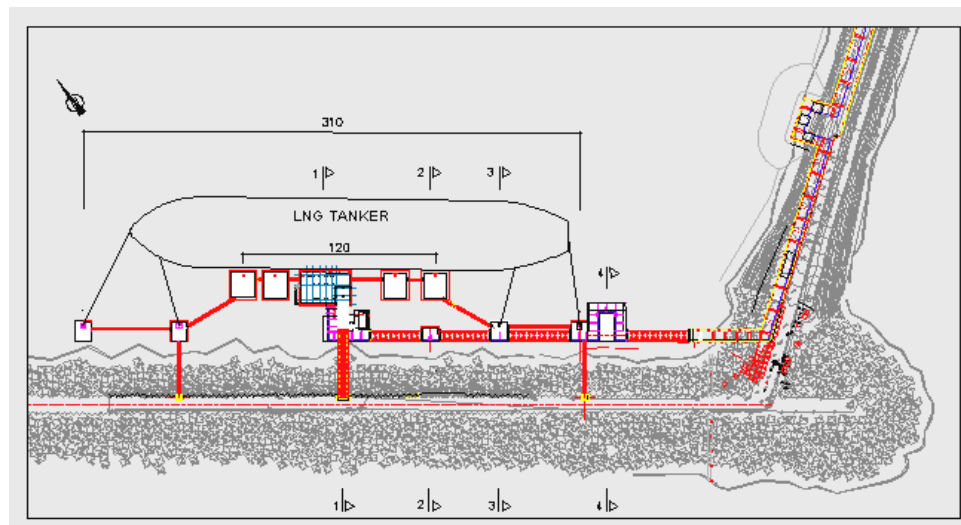


Fig. 2 – Planta geral do Terminal de Descarga

A gama de dimensões dos navios a servir, bem como a excentricidade, para vante, da posição das tomadas (manifold) em relação ao comprimento do navio, conduziram a este arranjo, no qual a plataforma de descarga (caixotão C2) se situa para vante do eixo da frente de acostagem, posicionando-se dois duques de alba de acostagem de cada lado da mesma. Por razões de segurança, a acostagem do navio será sempre feita com a proa para o exterior da bacia, permitindo uma mais rápida manobra de saída.

Os duques de alba de acostagem (caixotões C1) extremos estão afastados, a eixo, de 120m entre si e a 60m do eixo da frente de acostagem. Para receber navios de menores comprimentos estão posicionados mais dois duques de alba para o interior destes, afastados 75m entre si. Em resultado da posição descentrada, da plataforma os dois duques de alba de vante estão mais próximos um do outro.



## 4<sup>as</sup> Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária Angra do Heroísmo, 20 e 21 de Outubro de 2005



Conforme se mostra na figura, a amarração dos navios faz-se para um segundo alinhamento de duques de alba, recuados de cerca de 35m em relação ao alinhamento da frente de acostagem, por forma a garantir ângulos adequados dos cabos de amarração nos planos horizontal e vertical.

Na direcção longitudinal os duques de alba de amarração (caixotões C5) de vante, distam 100m e 40m do duque de alba de acostagem exterior, e os duques de alba da ré distam de 90m e 40m respectivamente. O duque de alba de amarração mais a vante está assim mais afastado do eixo da frente de acostagem, favorecendo o posicionamento dos cabos lançantes da proa, particularmente importantes para os maiores navios.

Para apoio da esteira de tubagens (caixotão C4), foi instalada uma estrutura afastada de 40m do eixo do molhe por forma a não ser atingida pelos galgamentos que podem ocorrer para as situações de temporal. Esta estrutura é uma treliça metálica com vãos superiores a 30m, utilizando também como apoios os duques de alba de amarração da ré.



Em posição recuada em relação à frente acostavel, mas com o tardoz alinhado pelas estruturas de amarração, está implantada a Plataforma de Apoio (caixotão C3), destinada ao apoio da ponte de acesso à Plataforma de Descarga, ao edifício de Monitorização e ao apoio das tubagens na curva.

A estrutura metálica de apoio das tubagens tem quatro vãos, pelo que para além de utilizar as estruturas dos duques de alba de amarração, utiliza ainda um apoio intermédio e um apoio na estrutura da lira de dilatação das tubagens terminando num encontro construído sobre o talude interior do travessão do enraizamento.

As estruturas do terminal são estruturas de gravidade formadas por caixotões pré-fabricados de betão armado, fabricados por sistema de deslize, sobre doca flutuante, cheios com enrocamentos e com a superestrutura de betão armado colocado "in situ".

A frente de acostagem é formada por cinco caixotões, constituindo o caixotão central a Plataforma de Descarga, onde fica implantado todo o equipamento necessário à descarga do gás liquefeito, e sendo os outros quatro os duques de alba de acostagem, situados dois de cada lado da plataforma.

Estes caixotões são fundados à cota de -16mZH, sobre um prisma de enrocamento colocado sobre o fundo e parcialmente sobre o pé do talude do molhe existente.

No alinhamento dos duques de alba de amarração e de apoio, estão implantados sete caixotões, com quatro dimensões em planta diferentes, que são fundados à cota de -3,5mZH sobre prismas de enrocamento colocado sobre o talude do molhe, mas sem interferir com o manto de blocos de 600kN do intradorso do molhe.

Nas figuras seguintes, Fig. 3 e Fig. 4, mostram-se os cortes transversais da estrutura do terminal, cuja posição está indicada na planta da figura anterior.

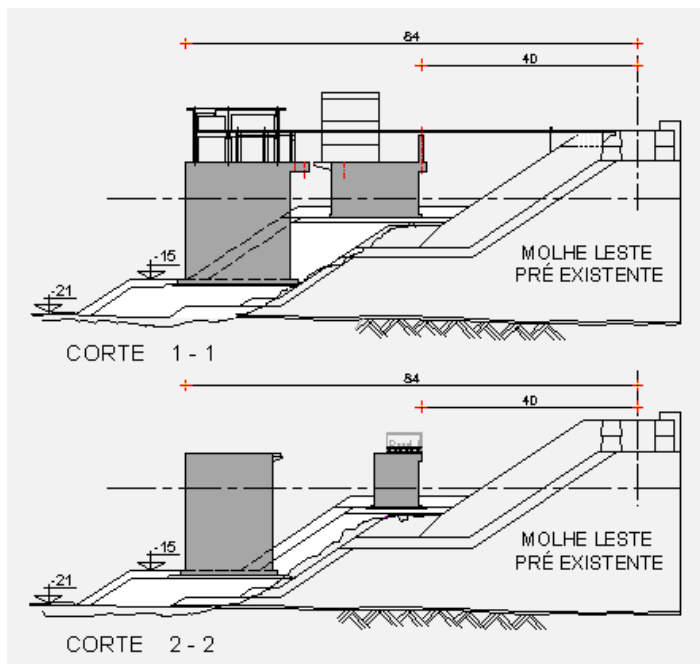


Fig. 3 – Cortes transversais. Corte 1-1 e Corte 2-2

No Corte 1-1 estão indicadas as plataformas de Descarga e a de Apoio situada na sua retaguarda.

No Corte 2-2 está indicado um duque de alba de acostagem e o apoio da Esteira de Tubagens.



## 4<sup>as</sup> Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária Angra do Heroísmo, 20 e 21 de Outubro de 2005

No Corte 3-3 está indicado o duque de alba de amarração mostrando a partilha com o apoio da estrutura da Esteira de Tubagens.

No Corte 4-4 mostra-se o caixotão de apoio da lira de dilatação da Esteira de Tubagens, indicando as consolas realizadas na superestrutura para acomodar a respectiva geometria.

### CAIXOTÕES DE BETÃO ARMADO

Para satisfazer a complexidade do arranjo geral do terminal foi necessário utilizar caixotões com seis geometrias em planta diferentes, tendo sido adoptada a solução de utilizar uma única dimensão em planta para as células dos caixotões, por forma a rentabilizar a utilização dos moldes.

As paredes exteriores dos caixotões são de 0,40m de espessura e as interiores de 0,20m, com 50mm de recobrimento mínimo. Para os cinco caixotões da frente acostável, sujeitos a maiores solicitações, é de 0,75m a espessura da laje de fundo, sendo de 0,50m para os restantes caixotões.

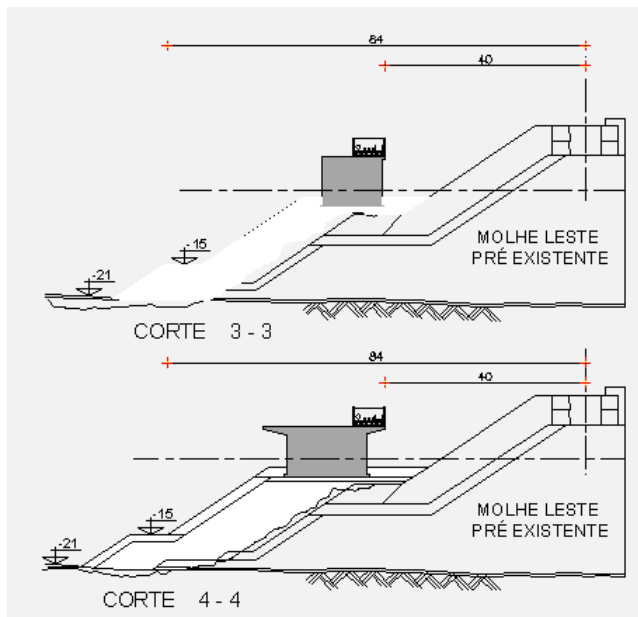


Fig. 4 – Cortes transversais. Corte 3-3 e Corte 4-4

A cota superior das paredes é de +5mZH para todos os caixotões por forma a permitir os trabalhos de colocação, enchimento e execução da superestrutura sem interferência das marés e ondulação. Os caixotões da frente de acostagem têm 21m de altura sendo de 8,5m a altura dos restantes.

As lajes do fundo dos caixotões apresentam consolas de dimensão adequada para permitir uma conveniente distribuição das tensões na fundação.

Vamos apresentar seguidamente as dimensões dos caixotões utilizados :

- Plataforma de Descarga : caixotão de 31,30m x 19,10m com 32 células de 3,65m x 4,43m;
- Duques de alba de acostagem : 4 caixotões de 14,48m x 16,00m com 12 células;
- Plataforma de Apoio : caixotão de 28,35m x 16,00m com 24 células;
- Apoio da Esteira de Tubagens : caixotão de 9,85m x 8,30m com 4 células;



## 4<sup>as</sup> Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária Angra do Heroísmo, 20 e 21 de Outubro de 2005

- Duques de alba de amarração : 4 caixotões de 9,85m x 12,15m com 6 celulas;
- Apoio da lira da Esteira de Tubagens (caixotão C6) : caixotão de 23,73m x 16,00m com 20 celulas.

Os caixotões foram fabricados com o sistema de molde deslizante, utilizando macacos apoiados em varões de remonta, com recurso a uma doca flutuante.

### FUNDAÇÃO DOS CAIXOTÕES

Os caixotões são fundados sobre prismas de enrocamento colocados sobre o fundo natural rochoso, formação de Mira, ou sobre o talude interior do molhe, sendo posteriormente regularizados, e com bermas adequadas para suportar as cargas transmitidas à fundação.

Estes prismas são protegidos com enrocamentos de protecção de granulometria adequada para garantir a sua estabilidade à acção dos galgamentos.

Dada a implantação da obra todos os enrocamentos foram colocados por via marítima.

### SUPERSTRUTURA DOS CAIXOTÕES

Após a colocação os caixotões foram cheios com enrocamento, sendo controlado o seu assentamento. Os caixotões dos duques de alba de acostagem foram cheios com betão nas cotas de actuação das defensas.

As superestruturas são constituídas por lajes de betão armado com 1,60m de espessura colocado "in situ" até à cota de +6,60mZH, compensando o assentamento entretanto verificado. Os eventuais desvios resultantes da colocação dos caixotões, embora dentro das tolerâncias admitidas, foram corrigidos na betonagem das plataformas das superestruturas, pois o rigor na implantação dos equipamentos assim o exigia.

As superestruturas apresentam sempre que necessário consolas para alargamento da área da plataforma para instalação de equipamentos ou para o apoio de estruturas.

Nas fotos seguintes são apresentadas situações de fase da construção.





## 4<sup>as</sup> Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária Angra do Heroísmo, 20 e 21 de Outubro de 2005

### SISTEMA DE DEFENSAS

O sistema de defensas foi dimensionado para o maior navio a ser recebido, caracterizado pelas dimensões já indicadas às quais foi associado o deslocamento de 130 000 tf, para uma velocidade de acostagem normal de 0,12m/s e 0,15m/s para velocidade excepcional.

As defensas seleccionadas e instaladas são do tipo “Cell Fender” com capacidade de absorção de energia de 1830 kNm, valor que satisfaz a energia de acostagem prevista. As defensas com o respectivo escudo apresentam 2,40m de afastamento da plataforma, valor que foi levado em consideração no dimensionamento dos alcances dos braços de carga a instalar na plataforma.

### SISTEMA DE AMARRAÇÃO

No terminal foi instado um sistema de amarração constituído por cabeços de desengate rápido equipados com cabrestantes de alagem de cabos, com a seguinte distribuição e capacidade.

- Nos 4 duques de alba de amarração : Cabeço Triplo de 1000kN de capacidade em cada gancho;
- Nos 4 duques de alba de acostagem : Cabeço Duplo de 1000kN de capacidade em cada gancho;
- Na Plataforma de Descarga : 2 Cabeços Duplos de 750kN de capacidade em cada gancho.

Todos os ganchos de cada cabeço estão equipados com células de pressão que permitem conhecer em contínuo a carga a que está submetido cada cabo.

### VERIFICAÇÃO DA SEGURANÇA

O dimensionamento e verificação da segurança das estruturas constituintes do Terminal Marítimo foi realizado com base na Norma Europeia EN 1473 – Installation and Equipment for Liquefied Natural Gas – Design of Onshore Installations.

De acordo com a Norma Europeia EN 1473 as infraestruturas marítimas do Terminal foram classificadas, do ponto de vista da segurança, a partir de uma análise de risco, tendo sido definido que deveria manter-se operacional após a ocorrência de um sismo tipo OBE.

A operacionalidade da infraestrutura é assegurada pelo correcto funcionamento das instalações mecânicas tendo sido necessário avaliar os deslocamentos máximos e relativos em caso de ocorrência de um sismo tipo OBE.

A análise efectuada destinou-se, assim, a obter os valores dos deslocamentos máximos expectáveis quando da ocorrência de um sismo, tendo-se recorrido a uma análise dinâmica com base no método linear equivalente.

A análise dinâmica foi efectuada para dois tipos de acções sísmicas, sismos intraplaca (Sismos Tipo I) e sismos interplaca (Sismos Tipo II), tendo sido obtidos dois histogramas de aceleração, um para cada tipo de sismo, a partir de espectros de resposta em afloramento rochoso.

Os valores de pico assumidos para os movimentos sísmicos em afloramento rochoso [1] são resumidos no Quadro 1.

Quadro 1 – Valores de pico dos movimentos sísmicos

	OBE		
	$a_{max}$ ( $cm/s^2$ )	$v_{max}$ ( $cm/s$ )	$d_{max}$ ( $cm$ )
Sismo Tipo I	150	10,1	4,8
Sismo Tipo II	150	19,8	14,0



Representa-se na figura seguinte os pseudo-espectros de aceleração (PSA) adoptados, para uma fracção de amortecimento de 5% bem como os dois acelerogramas obtidos por geração artificial.

Os modelos computacionais consistiram em análises bidimensionais, tanto no sentido transversal como no sentido longitudinal. Nas duas figuras seguintes apresentam-se dois exemplos das análises efectuadas.

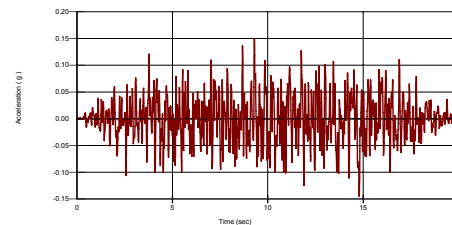
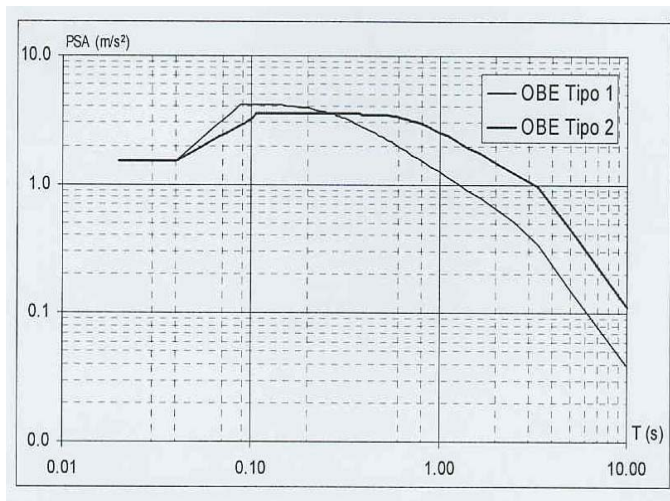


Fig. C1 - OBE / Intraplate

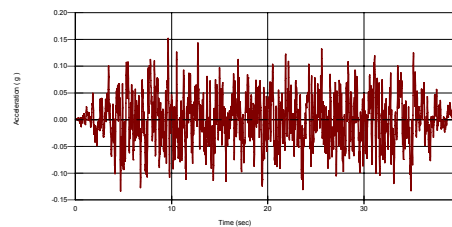


Fig. C2 - OBE / Interplate

Os deslocamentos sísmicos foram obtidos com código QUAKE / W [2]. Este programa destina à análise dinâmica de estrutura geotécnicas submetidas às acções sísmicas, baseando-se no método linear equivalente, no qual o módulo de distorção e o coeficiente de amortecimento são compatíveis com as deformações verificadas nos solos. Nas análises efectuadas o nível da água do mar foi considerado ao Nível Médio (+2,00m)ZH.

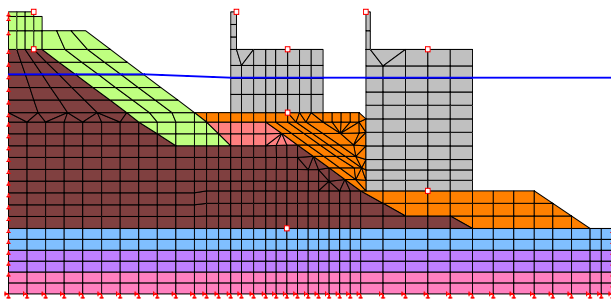


Fig. 6 – Análise Transversal

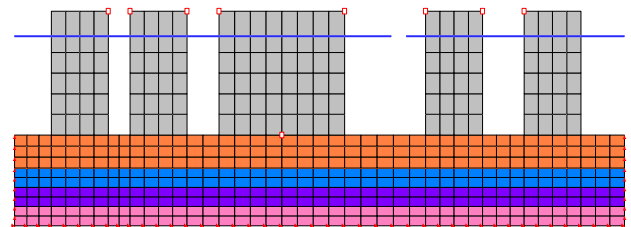


Fig. 7 – Análise Longitudinal



4<sup>as</sup> Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária  
Angra do Heroísmo, 20 e 21 de Outubro de 2005

O substrato rochoso que ocorre na área de implantação do terminal é conhecido pela formação de Mira sendo constituído essencialmente por xistos, grauvaques e corneanas resultantes do metamorfismo da zona. As propriedades dinâmicas das diferentes camadas do solo de fundação (Bed-Rock) são resumidas no quadro seguinte [3] :

	Velocidade das Ondas de Corte (m/s)	Massa Específica (T/m <sup>3</sup> )	Coefficiente de Poisson	Módulo de Deformabilidade (MPa)	Módulo de Distorção (MPa)
-12.0 → -15.5	1600	2.60	0.20	16 000	6 600
-15.5 → -19.0	2500	2.60	0.20	40 000	16 600
∞ → -19.0	2700	2.60	0.30	50 000	19 200

As características geomecânicas dos materiais constituintes do molhe existente foram obtidas de [4]. As propriedades dinâmicas do material de enrocamento do novo prisma de fundação são desconhecidas tendo sido admitidas as seguintes características:

Índice de Vazios:  $e_0 = 0.50$

Coefficiente de Poisson:  $u = 0.30$

Massa específica :  $\gamma = 1,9 \text{ T/m}^3$

Para o módulo de distorção,  $G(z)$ , assumiu-se uma variação com a tensão vertical efectiva,  $s'_v(z)$ , de acordo com a expressão :

$$G(z) = K [s'_v(z)]^{1/2}$$

No caso presente e de acordo com [1] , a melhor estimativa do módulo de distorção foi assumida igual a :

$$G(z) = 220 K_2 \sqrt{\frac{1 + 2K_0}{3} \sigma'_v}$$

em que :

- $K_2$  - coeficiente do tipo de material ( = 205 de acordo com [4] )
- $K_0$  coeficiente de impulso em repouso
- $\sigma'_v$  tensão efectiva vertical



4<sup>as</sup> Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária  
Angra do Heroísmo, 20 e 21 de Outubro de 2005

A incerteza relativa aos parâmetros geo-mecânicos dos materiais constituintes do molhe foi tida em conta considerando-se uma variação do módulo de distorção. Foram assim, adicionalmente, avaliados mais dois perfis de solo definidos por:

- $G_s(z) = \frac{1}{2} G(z)$
- $G_h(z) = 2G(z)$

Nos quadros seguintes apresentam-se alguns dos resultados obtidos. São apresentados, para cada caixotão, os deslocamentos relativos [mm] entre o topo do caixotão à cota (+6,60m)ZH e a sua fundação para os sismos intra e interplaca. É igualmente apresentado o máximo deslocamento relativo [mm] entre caixotões.

A) Deslocamentos relativos máximos entre o topo e a base dos caixotões

Deslocamento transversal [mm]

	C1			C2			C3			C4			C5			C6		
Sismo	$G_s$	G	$G_h$	$G_s$	G	$G_h$	$G_s$	G	$G_h$	$G_s$	G	$G_h$	$G_s$	G	$G_h$	$G_s$	G	$G_h$
I	16	8	4	12	6	4	6	3	2	15	6	4	8	3	2	7	4	2
II	24	10	5	18	10	4	11	4	1	24	9	5	12	5	2	11	5	2

Deslocamento longitudinal [mm]

	C3			C4			C5			C5			C6		
Sismo	$G_s$	G	$G_h$	$G_s$	G	$G_h$	$G_s$	G	$G_h$	$G_s$	G	$G_h$	$G_s$	G	$G_h$
I	4	2	1	17	10	5	15	9	7	9	5	3	3	2	1
II	5	3	1	24	12	5	22	13	7	12	7	3	4	2	1

B) Deslocamentos relativos máximos entre os caixotões e o coroamento do molhe

Entre caixotão C3 (Nível +12.60m) e coroamento do molhe

Deslocamento transversal [mm]

Sismo	$G_s$	G	$G_h$
Intraplaca	9	4	2
Interplaca	18	7	2



4<sup>as</sup> Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária  
Angra do Heroísmo, 20 e 21 de Outubro de 2005

C) Deslocamentos relativos máximos entre caixotões

Entre os caixotões C3 e C2 (Nível+12.60m)

Deslocamento transversal [mm]

Sismo	G <sub>s</sub>	G	G <sub>h</sub>
Intraplaca	13	7	2
Interplaca	30	10	3

Entre os caixotões C3 e C2 (Nível+6,60m)

Deslocamento transversal [mm]

Sismo	G <sub>s</sub>	G	G <sub>h</sub>
Intraplaca	11	6	2
Interplaca	26	8	2

Entre os caixotões C1 e C4 (Nível+6,60m)

Deslocamento transversal [mm]

Sismo	G <sub>s</sub>	G	G <sub>h</sub>
Intraplaca	20	14	8
Interplaca	52	21	7

Entre os caixotões C1A/C1B, C1B/C2, C2/C1C, C1C/C1D (Nível +6.60m)

Deslocamento longitudinal [mm]

Sismo	C1A / C1B			C1B / C2			C2 / C1C			C1C / C1D		
	G <sub>s</sub>	G	G <sub>h</sub>	G <sub>s</sub>	G	G <sub>h</sub>	G <sub>s</sub>	G	G <sub>h</sub>	G <sub>s</sub>	G	G <sub>h</sub>
I	6	5	3	29	18	10	28	17	10	2	1	1
II	5	6	4	54	23	11	49	22	11	2	2	1



4<sup>a</sup>s Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária  
Angra do Heroísmo, 20 e 21 de Outubro de 2005

Entre os caixotões C3/C4 , C4/C5C , C5C/C5D , C5D/C6 (Nível +6.60m)

Deslocamento longitudinal [mm]

	C3 / C4		C4 / C5C			C5C / C5D			C5D / C6			
	G <sub>s</sub>	G	G <sub>h</sub>	G <sub>s</sub>	G	G <sub>h</sub>	G <sub>s</sub>	G	G <sub>h</sub>	G <sub>s</sub>	G	G <sub>h</sub>
I	24	13	9	6	4	7	11	6	4	8	5	3
II	29	17	8	7	7	6	12	14	8	9	6	3

Referências

- [ 1 ] 82704/764/PTS/904 – Earthquake Safety Design Requirements
- [ 2 ] QUAKE / W – “Finite Element Dynamic Earthquake Analysis “ – Version 5  
GEO-SLOPE International Ltd. , Calgary , Alberta , Canada
- [ 3 ] 82704/731/TN/109 – Rev.1 – Jetty/Breakwater–Foundation Parameters
- [ 4 ] Gabinete da Área de Sines – Port of Sines – Dynamic Behavior of Breakwater  
Sections under Seismic Loading , March 1984