

## AREDIS - ADAPTAÇÕES PARA REFORÇAR A ESTABILIDADE DE EMISSÁRIOS SUBMARINOS EM TERRENOS LODOSOS

Cristina Afonso<sup>1</sup>, Maria Graça Neves<sup>2</sup>, Maria Teresa Reis<sup>2</sup>, José Morim Oliveira<sup>1</sup>

<sup>1</sup>WW – Consultores de Hidráulica e Obras Marítimas SA, Rotunda Nuno Rodrigues dos Santos, 1-B - 10º,  
2685-223 Portela – Lisboa, Portugal. [cafonso@wwsa.pt](mailto:cafonso@wwsa.pt), [morim@wwsa.pt](mailto:morim@wwsa.pt)

<sup>2</sup>LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Av. do Brasil, 101, 1700-066 Lisboa, Portugal.  
[gneves@lnec.pt](mailto:gneves@lnec.pt), [treis@lnec.pt](mailto:treis@lnec.pt)

### RESUMO

A experiência de estruturas marítimas do tipo Quebra-mares e Emissários Submarinos construídas sobre terrenos lodosos apresenta ainda uma grande incerteza na resolução dos problemas de assentamentos, erosão e liquefação. O projeto de investigação AREDIS (Adaptações para Reforçar a Estabilidade de Emissários Submarinos em Terrenos Lodosos) tem como objetivo central o desenvolvimento de soluções para melhorar a construção destas estruturas fundadas em solos sujeitos a liquefação, tendo por base trabalho experimental. Na presente comunicação descreve-se o desenvolvimento do estudo no que diz respeito aos emissários submarinos. O programa de ensaios bidimensionais para o estudo do emissário, simulado através de um tubo circular, consiste em ensaios com diferentes condições de agitação, alturas e períodos da onda, e com duas situações de colocação da estrutura: emissário apoiado no solo e enterrado no mesmo.

Nesta comunicação faz-se algumas considerações sobre o estado de arte, descreve-se o programa de ensaios proposto e as principais conclusões obtidas sobre a definição do material que constitui o solo a colocar no fundo do canal de ensaios. Na presente data estão a decorrer os ensaios preliminares do solo com diferentes misturas de caulinite e de areia e só areia para determinar o seu comportamento e definir as características do solo que será utilizado no modelo.

### 1. INTRODUÇÃO

As boas condições de funcionamento de um emissário submarino são de extrema importância para o ambiente, para o bem-estar das populações e para a economia local. A estrutura deverá ser segura e fiável ao longo do seu período de vida útil. No dimensionamento dos emissários submarinos é muito importante a determinação das variações da força e do comportamento do solo devido à ação direta das ondas.

Embora nas últimas décadas se tenha aprofundado o conhecimento do escoamento e da erosão em redor de estruturas marítimas, pouco se conhece sobre o impacto da liquefação nestas estruturas (Sumer, 2006). No âmbito do projeto europeu LIMAS (Liquefaction around Marine Structures) foram dados passos importantes no estudo dos modos de falha de diferentes estruturas marítimas devido à liquefação do solo induzida pela agitação, incluindo condutas submarinas. Para tal, foram realizados ensaios em modelo físico e estudos teóricos, focados nos processos que ocorrem durante a liquefação do solo.

Para aprofundar o conhecimento do impacto da liquefação em emissários submarinos, iniciou-se, recentemente, o projeto designado por “AREDIS - Adaptações para Reforçar a Estabilidade de Emissários Submarinos em Terrenos Lodosos”, que está inserido num projeto IBEROEKA de Cooperação Tecnológica e Empresarial com a América Latina, entre entidades espanholas (UGR-Universidade de Granada e PROES-Consultores, S.A.) e mexicanas (UNAM-Universidad Autónoma Nacional de México e ALEPH-Ingenieros Consultores, S.A.) e que tem por título “Diseño de Adecuaciones para Rebotucen la Estabilidad de Diques en Suelos Fangosos”. O projeto AREDIS centra-se na resolução dos problemas do movimento da conduta, flutuações da pressão e impulsão, resultantes da erosão e da liquefação do solo.

Os objetivos gerais do projeto AREDIS Portugal são: i) analisar a interação solo-emissário-onda, especificamente nos temas de infraescavação, liquefação e perda de resistência do solo; e ii) aplicar o conhecimento adquirido para solucionar os problemas típicos da construção e exploração de emissários submarinos sobre terrenos lodosos. Este projeto complementa os objetivos do projeto AREDIS Espanha e México, que é aplicado a outro tipo de estruturas marítimas, os quebra-mares.

Para a concretização dos objetivos está a decorrer atualmente um programa experimental no Instituto de Engenharia da UNAM. O programa experimental da estrutura do emissário submarino, simulado através de uma conduta circular com 0.03 m de diâmetro, consiste em ensaios bidimensionais (2D) com diferentes condições de agitação com alturas de onda variáveis entre 0.04 m e 0.10 m, períodos de onda variáveis entre 1.05 s e 3.00 s e para duas situações: emissário apoiado no solo e enterrado no mesmo.

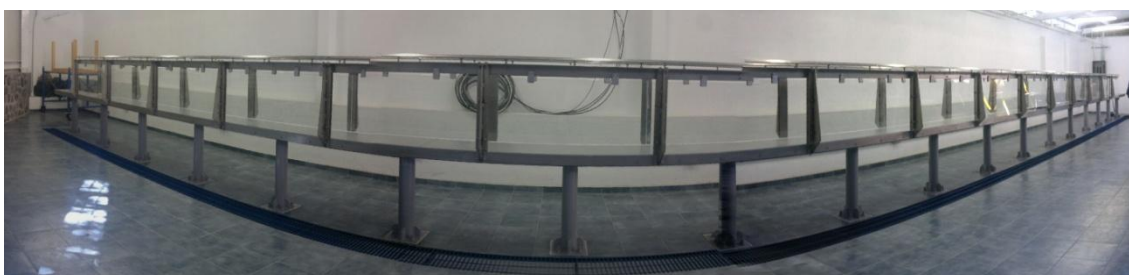
Nesta comunicação apresenta-se o resultado do início dos ensaios do solo de areia e sem estrutura e o programa de ensaios a realizar sem e com conduta.

## 2. MODELO FÍSICO

### 2.1. CARACTERÍSTICAS DO MODELO

Os ensaios estão a ser realizados no canal de ondas da UNAM, construído especificamente para este projeto, Figura 1. O canal tem 22.0 m de comprimento, 0.4 m de largura e 0.6 m de profundidade. O fundo do canal é de aço, com janelas de vidro, de tal modo que é possível a inspeção visual dos ensaios, assim como o uso de câmaras de vídeo de alta velocidade.

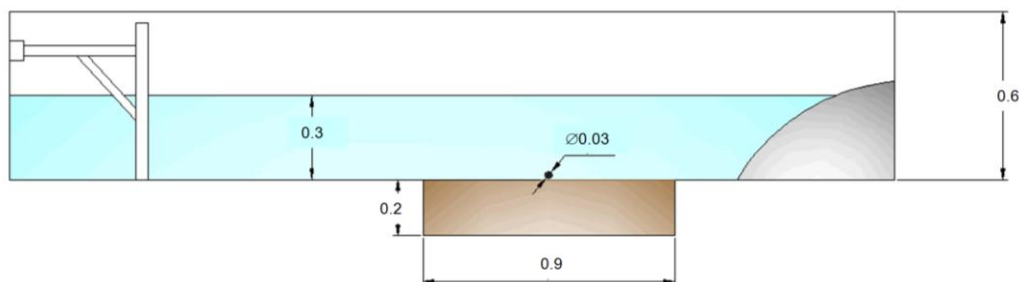
O canal está dotado de um batedor do tipo pistão com um curso de 1.2 m e que permite a geração de agitação regular e irregular com absorção ativa da reflexão.



**Figura 1. Vista do canal onde estão a ser realizados os ensaios.**

O modelo do emissário foi construído de forma a ter uma escala com ordem de grandeza de 1:35, de acordo com a lei de semelhança de Froude, relativamente às dimensões usuais dos emissários usados em descargas urbanas a estudar. Assim, o emissário é modelado por um tubo de PVC com 0.03 m de diâmetro exterior e 0.28 m de comprimento, nas seguintes situações de colocação da estrutura: apoiado no solo e totalmente enterrado no mesmo. Prevê-se ainda a realização de ensaios com soluções alternativas, tal como a tubagem assente e envolvida num prisma de brita.

O canal de ondas tem uma bandeja com 0.2 m de altura, 0.307 m de largura e 0.9 m de comprimento, que será preenchida com três tipos de solo e onde será colocado o emissário. Os ensaios serão realizados com 0.3 m de água (Figura 2).



**Figura 2. Secção longitudinal do canal com o tubo apoiado sobre o solo colocado na bandeja.**

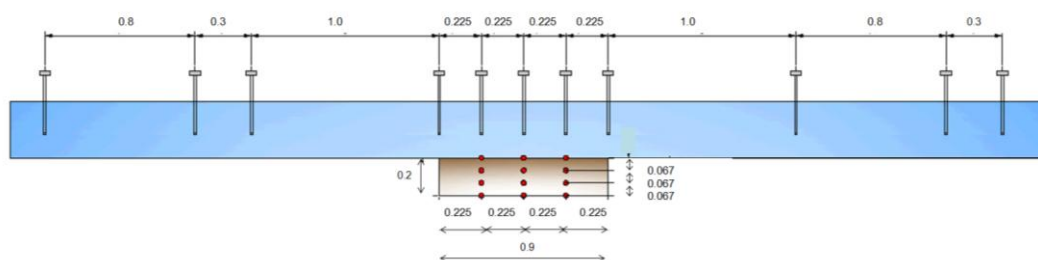
O solo a utilizar nos ensaios está a ser atualmente objeto de estudo e estão a ser ensaiadas várias misturas de caulinite com areia, sendo um destes solos constituído só por areia (M1) e os outros dois por areia e caulinite (M2 e M3).

## 2.2. INSTRUMENTOS DE MEDIÇÃO

As variáveis que serão medidas nos ensaios com o emissário deverão tornar possível avaliar a velocidade das partículas na água e nas camadas do solo, a correspondente pressão dinâmica e os perfis de tensão tangencial. Para tal, está previsto utilizarem-se nos ensaios os seguintes instrumentos de medição:

- 11 sensores de nível a colocar: três antes da bandeja, dispostos a distâncias adequadas para se poder separar corretamente a onda incidente da refletida; um no ponto de início da bandeja; três sobre a bandeja (à distância de 0.225, 0.45 e 0.675 m); um no final da bandeja; e três atrás da mesma, de novo separados por distâncias adequadas para a aplicação de métodos de separação de onda incidente e refletida;
- 12+4 sensores de pressão a colocar: três a 0.225, 0.450 e 0.675 m do início da bandeja, alinhados com o eixo central da mesma. Em cada um destes pontos serão colocados 4 sensores a diferentes profundidades: na base da bandeja, a 0.067 m, a 0.134 m e na superfície superior do solo. Para os ensaios com o tubo serão colocados mais 4 sensores numa secção transversal da tubagem, distando 90° entre si;
- 2 ADVs (*acoustic doppler velocimeter*) a colocar: um antes da bandeja e o outro no eixo do tubo.

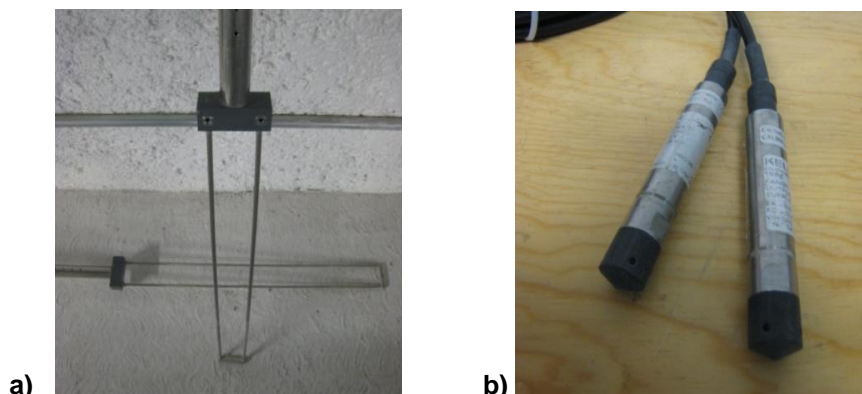
A Figura 3 mostra um esquema com a posição dos sensores no canal de ondas.



**Figura 3. Esquema da posição dos sensores no canal (cotas em m).**

Os instrumentos de medição do laboratório da UNAM têm as seguintes características:

- Sensores de nível: do tipo condutivo, com uma gama de medição compatível com o seu comprimento, de 600 mm, e com uma precisão de 0.01 mm (Figura 4 a));
- Sensores de pressão: com capacidade de resposta rápida, que permite medir variações de pressão geradas pela agitação (Figura 4b));
- ADVs: para medição da velocidade em três direções.



**Figura 4. a) Sensores de nível e b) Sensores de pressão.**

O estudo será complementado com a realização de fotografias e vídeos durante a execução dos ensaios.

### 2.3. CONDIÇÕES DE ENSAIO

No âmbito deste estudo, está prevista a realização de ensaios com diferentes condições de agitação (regular e irregular), para 3 tipos de solo (um só de areia (M1) e os outros dois constituídos por areia e caulinite (M2 e M3), com as percentagens que estão a ser definidas durante os ensaios preliminares) e para duas situações de colocação do emissário: apoiado e enterrado no solo.

As condições de agitação regular e irregular terão alturas de onda variáveis entre 0.04 m e 0.10 m e os períodos de onda compreendidos entre 1.05 s e 3.0 s. A profundidade da água no canal será mantida constante em todos os ensaios e igual a 0.3 m, sendo os ensaios realizados em profundidades intermédias.

Para a agitação regular e irregular a duração dos ensaios será a necessária para obter um mínimo de 50 e 200 ondas, respectivamente. As condições de agitação irregular são geradas considerando-se um espectro do tipo JONSWAP.

Antes destes ensaios serão realizados ensaios preliminares para um período da onda constante de 1.2 s.

No Quadro 1 e no Quadro 2 apresentam-se as características da agitação a ensaiar.

**Quadro 1. Condições de ensaio com agitação regular.**

T (s)	H (m)	Duração (mm:ss)
1.05	0.04	01:15
	0.08	
1.25	0.04	01:15
	0.08	
1.50	0.04	01:30
	0.08	
1.75	0.04	01:45
	0.08	
2.00	0.04	02:00
	0.08	
2.25	0.04	02:00
	0.08	
2.50	0.04	02:15
	0.08	
2.75	0.04	02:30
	0.08	
3.00	0.04	02:45
	0.08	

**Quadro 2. Condições de ensaio com agitação irregular.**

Tp (s)	Hs (m)	Duração (mm:ss)
1.05	0.04	03:30
	0.10	
1.25	0.04	04:20
	0.10	
1.50	0.04	05:10
	0.10	
1.75	0.04	06:00
	0.10	
2.00	0.04	06:50
	0.10	
2.25	0.04	07:30
	0.10	
2.50	0.04	08:30
	0.10	
2.75	0.04	09:10
	0.10	
3.00	0.04	10:10
	0.10	

Prevê-se igualmente a realização de ensaios adicionais, com a tubagem assente no fundo, com valores de alturas de onda e de períodos semelhantes aos utilizados em ensaios realizados pelos autores no âmbito do projeto HYDRALAB IV (Neves et al., 2013). O objetivo destes ensaios é poder comparar os resultados dos ensaios do tubo assente em fundo impermeável e em fundo de areia. As características da agitação a ensaiar são as que se apresentam no Quadro 3.

**Quadro 3. Condições de ensaio com agitação nos ensaios adicionais.**

Agitação	H e Hs (m)	T e Tp (s)	Duração (mm:ss)
Regular	0.04	1.35	1:30
	0.06		
	0.09		
	0.11		
Irregular	0.06	1.35	04:30
Bimodal	0.06	1.35+1.01	04:30

#### 2.4. ENSAIOS A REALIZAR

Como referido anteriormente, o projeto AREDIS (Portugal, Espanha e México) engloba, na totalidade, ensaios de agitação sem estrutura e com dois tipos de estrutura: quebra-mar e emissário submarino. Assim, os ensaios que se pretendem realizar no canal de ondas da UNAM incluem:

- E1: Ensaios de agitação com solo;
- E2: Ensaios de agitação de um quebra-mar assente no solo;
- E3: Ensaios de agitação de um emissário submarino assente e enterrado no solo.

Cada um dos três tipos de ensaios (E1 a E3) será realizado com três tipos diferentes de solo (M1 a M3). No Quadro 4 apresenta-se o plano de ensaios a realizar para os ensaios E1 e E3, que são as estruturas alvo deste trabalho (AREDIS Portugal).

**Quadro 4. Plano de ensaios a realizar.**

Nº de ensaio	Material	Tipo de ensaio	Tipo de estrutura
1	M1	E1	-
2	M2	E1	-
3	M3	E1	-
4	M1	E3	Emissário apoiado
5	M1	E3	Emissário enterrado
6	M1	E3	Emissário enterrado envolvido em brita
7	M2	E3	Emissário apoiado
8	M2	E3	Emissário enterrado
9	M2	E3	Emissário enterrado envolvido em brita
10	M3	E3	Emissário apoiado
11	M3	E3	Emissário enterrado
12	M3	E3	Emissário enterrado envolvido em brita

## 2.5. METODOLOGIA DO TRABALHO

A metodologia de trabalho que se está a seguir consiste na realização de um conjunto de ensaios preliminares com o fim de compreender o comportamento do solo no canal de ondas e determinar as características do solo a utilizar no modelo. Uma vez realizados estes ensaios preliminares, segue-se o programa de ensaios planeado e apresentado no Quadro 4.

Na presente data estão a ser realizados os ensaios do solo, sem estrutura, apenas com a bandeja preenchida com cada um dos três materiais referidos (M1, M2 e M3).

Os ensaios têm início com períodos e alturas de onda que permitem a comparação dos resultados com trabalhos existentes na literatura. Assim, seguindo o trabalho de Lindenberg et al. (1989), a metodologia de trabalho é a seguinte:

1. Colocar o solo na bandeja e deixar consolidar durante 3 dias;
2. Encher o canal com 30 cm de água com uma velocidade baixa;
3. Com o período de ensaio fixo ( $T=1.2$  s), gerar ondas de altura constante durante 3 horas;
4. Aumentar a altura de onda e mantê-la durante outras 3 horas;
5. Deixar consolidar o solo durante 24 horas;
6. Uma vez o solo consolidado, repetir as condições de agitação.

As alturas de onda ensaiadas são as que constam no Quadro 5.

**Quadro 5. Condições de agitação dos ensaios.**

T (s)	H (m)	Tempo de ensaio (mm:ss)
1.2	0.08	04:30
1.2	0.10	04:30

Na Figura 5 pode-se observar o resultado final do ensaio com um solo composto a 100% por areia, para  $H=0.08$  m e  $T=1.2$  s.



**Figura 5. Aspecto do modelo no fim do ensaio com solo 100% areia e para  $H=0.08$  m e  $T=1.2$  s.**

Os ensaios planeados no Quadro 4 irão seguir a seguinte metodologia de trabalho:

1. Colocar o solo e construir o modelo para cada tipo de estrutura;
2. Deixar consolidar durante 3 dias para os materiais M2 e M3;
3. Fazer uma fotografia de perfil e de planta do modelo uma vez construído;
4. Encher o canal a baixa velocidade;
5. Executar os ensaios com as condições de agitação previstas e a instrumentação planeada em cada caso;
6. Após a atuação de cada condição de agitação (altura de onda e período) gerada, fotografar em planta e em perfil o modelo;
7. Ao finalizar todos os ensaios com agitação regular e irregular, reconstruir completamente o modelo a fim de evitar consolidações provenientes de ensaios anteriores.

### **3. COMPARAÇÃO ENTRE OS ENSAIOS PLANEADOS E A LITERATURA**

No que se refere a ensaios de emissários submarinos com solos sujeitos a liquefação, foram encontrados na literatura diferentes estudos experimentais, quer em canais de ondas, quer em canais de corrente ou outros, onde se estudou o efeito da presença da estrutura no comportamento do solo e o efeito do comportamento do solo na estrutura.


Nos Quadros 6 a 9 apresenta-se um resumo das características dos ensaios disponíveis na literatura e dos ensaios a realizar no âmbito do projeto AREDIS: no Quadro 6 resumem-se as características do solo e da caixa onde é colocado o solo, onde  $d_{50}$  representa o diâmetro médio dos sedimentos; no Quadro 7 apresentam-se as características da conduta ensaiada e a sua posição na caixa, onde  $D$  é o diâmetro da conduta e  $e$  é a distância da geratriz inferior da conduta à interface solo-água; no Quadro 8 apresentam-se as características do canal, da agitação e a profundidade; e no Quadro 9 as medições efetuadas e o equipamento utilizado.

Como se pode observar, embora os ensaios planeados tenham valores de alguns parâmetros numa gama diferente da dos valores dos ensaios já realizados, quando se comparam os valores dos parâmetros adimensionais (Quadro 10), verifica-se que os valores dos ensaios que estão a ser executados já se encontram dentro da gama dos valores dos ensaios da literatura, o que permite comparar resultados e validar comportamentos do solo e da estrutura. A exceção é o parâmetro  $d_{50}/L$ , onde os valores dos ensaios da UNAM são ligeiramente superiores aos da literatura.

**Quadro 6. Características do solo e da caixa onde é colocado o solo nos ensaios da literatura vs ensaios canal UNAM.**

	Solo			Caixa onde o solo é colocado	
	Tipo de solo	Peso específico (kN/m <sup>3</sup> )	d <sub>50</sub> (mm)	distância à fronteira de entrada (m)	Dimensão (m) largura x altura x comprimento
<b>Literatura</b>	silte, areia e brita	variável	0.03 - 2.51	6 a 12	0.356 a 2.44 x 0.17 a 1.0 x 0.6 a 1.6
<b>Canal UNAM</b>	areia, areia+caulinite	*	*	*	0.31x0.20x0.90

**Quadro 7. Características da conduta nos ensaios da literatura vs ensaios canal UNAM.**

	Conduta 		
	Diâmetro da conduta, D (m)	Comprimento da conduta, L (m)	Posição da conduta em relação ao fundo, e/D
<b>Literatura</b>	0.02-0.2	0.28 a 2.44	0 a 7.25
<b>Canal UNAM</b>	0.03	0.28	0 e 1.75

**Quadro 8. Características do canal, profundidade e características da agitação nos ensaios da literatura vs ensaios canal UNAM.**

	Canal		h (m)	Agitação			
	Dimensão (m) largura x altura x comprimento	Tipo de canal		Ondas regulares		Ondas irregulares	
				H (cm)	T (s)	H <sub>s</sub> (cm)	T <sub>p</sub> (s)
<b>Literatura</b>	0.60 a 2.44 x 0.60 a 1.52 x 10 a 54.9	Ondas ou corrente	0.05-0.61	0.05-40	1.25-2.9	11.3	2.3
<b>Canal UNAM</b>	0.4 x 0.6 x 22	Ondas	0.1-0.4	4-17	1.01-3.0	8-17	1.01-3.0

**Quadro 9. Medições e equipamento utilizado nos ensaios da literatura vs ensaios canal UNAM.**

	Medições			Equipamento
	Pressão no solo	Elevação da superfície	Outras	
<b>Literatura</b>	desde z=0 até ao fundo da caixa	SIM	pressão na conduta, deslocamento vertical da conduta	transdutores de pressão, sondas de medição das características da agitação, transformadores diferenciais, ADV, câmara vídeo
<b>Canal UNAM</b>	0, 0.133, 0.066 e 0.2	SIM		transdutores de pressão, sondas, ADV, câmara vídeo



**Quadro 10. Valores dos parâmetros adimensionais nos ensaios da literatura vs ensaios canal UNAM.**

Parâmetros adimensionais	Literatura		Canal UNAM
	min	max	
Re	1.08E+04	6.52E+06	1.06E+04
KC	2.41E+00	3.69E+03	1.59E+01
h/L	9.05E-02	2.12E-01	1.46E-01
H/L	2.36E-02	5.89E+00	5.35E-02
d <sub>50</sub> /L	1.56E-05	4.45E-05	3.16E-04
H/D	6.67E-01	8.50E+02	3.67E+00
d/L	5.89E-02	1.41E-01	9.72E-02

#### 4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Apresenta-se nesta comunicação a descrição dos objectivos e do trabalho efectuado até ao momento no âmbito do projecto AREDIS (Adaptações para Reforçar a Estabilidade de Emissários Submarinos em Terrenos Lodosos), desenvolvido pelo consórcio WW/LNEC. Este trabalho tem por base um plano de ensaios que pretende complementar o deficiente conhecimento existente sobre o comportamento das estruturas marítimas fundadas em terrenos lodosos e permitirá desenvolver recomendações para o projeto destas obras, nomeadamente os quebra-mares e os emissários submarinos.

Os ensaios preliminares realizados até à presente data visam definir as características dos solos a ensaiar na fase seguinte de ensaios, isto é, com estrutura.

Com o desenvolvimento deste estudo pretende-se obter soluções práticas para o dimensionamento dos emissários submarinos sobre solos sujeitos a liquefação, especificamente focadas na fundação, na forma de assentamento da estrutura e, caso a investigação assim o indique, no desenvolvimento de soluções para a fundação, afundamento e estabilização do emissário.

#### 5. REFERÊNCIAS

- Lindenberg, J., van Rijn, L.C. & Winterwerp, J.C. (1989). Some experiments on wave-induced liquefaction on soft cohesive soils. *Journal of Coastal Research*. Special Issue N<sup>o</sup>. 5, pp. 127-137.
- Neves, M.G., Figueira, P., Afonso, M.C., Mendonça, A., Solis, M.V., Didier, E., Reis, M.T., Clavero, M., Ortega-Sánchez, M. & Losada, M.A. (2013). Estudo experimental de forças sobre um emissário submarino: influência da direcção da agitação incidente, da presença dos anéis de estabilização e da distância da conduta ao fundo. 8<sup>as</sup> Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária, Lisboa, 10 a 11 de Outubro de 2013, PIANC Portugal.
- Sumer, B.M. (2006). Special Issue on Liquefaction around Marine Structures. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 132, SPECIAL ISSUE: Liquefaction Around Marine Structures. Processes and Benchmark Cases, pp. 225–226. doi: 10.1061/(ASCE)0733-950X(2006)132:4(225).

### **AGRADECIMENTOS**

Os autores agradecem o financiamento obtido para a realização do presente estudo no âmbito do co-financiamento comunitário do Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional, do QREN – Quadro de Referência Estratégico Nacional (Portugal 2007-2013) e do Programa Operacional Regional PORLISBOA.



Os autores agradecem igualmente às entidades espanholas UGR - Universidade de Granada e PROES - Consultores S.A e às entidades mexicanas UNAM - Universidad Autónoma Nacional de México e ALEPH - Ingenieros Consultores, S.A. o convite para participarem no projecto IBEROEKA de Cooperação Tecnológica e Empresarial entre países da América Latina.