



ADAPTAÇÕES PARA REFORÇAR A ESTABILIDADE DE EMISSÁRIOS SUBMARINOS EM TERRENOS LODOSOS

Projeto nº 2012/023027 - AREDIS

Relatório Técnico-Científico Intercalar



Mai de 2013

ÍNDICE DE TEXTO

| | |
|---|----|
| 1 INTRODUÇÃO..... | 1 |
| 2 SUMÁRIO EXECUTIVO DAS ATIVIDADES DE PROJETO..... | 2 |
| 2.1 Objetivos do Projeto..... | 2 |
| 2.2 Trabalho Realizado..... | 4 |
| 3 EVOLUÇÃO DO TRABALHO PREVISTO..... | 6 |
| 4 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS..... | 8 |
| 4.1 Estado de Arte..... | 8 |
| 4.1.1 Considerações gerais..... | 8 |
| 4.1.2 Solos com pouca resistência..... | 9 |
| 4.1.3 Parâmetros de caracterização dos solos..... | 11 |
| 4.1.4 Modos de falha de emissários submarinos..... | 13 |
| 4.1.5 Processos construtivos..... | 18 |
| 4.1.6 Ensaios com emissários em fundos sujeitos a liquefação..... | 22 |
| 4.2 Considerações Preliminares Sobre o Caso Português..... | 28 |
| 4.2.1 Legislação Portuguesa..... | 28 |
| 4.2.2 Caracterização de solos existentes no estuário do Tejo..... | 30 |
| 4.2.3 Casos de estudo de estruturas marítimas fundadas no estuário do Tejo..... | 33 |
| 5 PLANO DE ENSAIOS A REALIZAR NO ÂMBITO DO PROJETO AREDIS..... | 36 |
| 5.1 Ensaios a Realizar..... | 36 |
| 5.2 Material..... | 37 |
| 5.3 Emissário..... | 40 |
| 5.4 Canal de Ondas da UNAM..... | 41 |
| 5.5 Instrumentação..... | 42 |
| 5.6 Condições de Agitação a Ensaiar..... | 44 |
| 5.7 Metodologia de Trabalho..... | 46 |
| 5.7.1 Ensaios preliminares..... | 46 |
| 5.7.2 Ensaios planeados..... | 47 |
| 5.8 Comparação entre os Ensaios Planeados e os Referidos na Literatura..... | 48 |
| 6 RELEVÂNCIA DO PROJETO..... | 50 |
| 7 BIBLIOGRAFIA..... | 52 |



ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1 - Diagrama comparativo do trabalho previsto com o realizado..... | 1 |
| Figura 2 - Técnicas de tratamento função das características do solo..... | 18 |
| Figura 3 - Exemplo da construção de colunas de brita..... | 19 |
| Figura 4 - Exemplo da construção de colunas de <i>jet grouting</i> | 20 |
| Figura 5 - Exemplo de aplicação de drenos verticais..... | 20 |
| Figura 6 - Canal experimental utilizado por Feng (1992)..... | 23 |
| Figura 7 - Canal experimental utilizado por Soltampour <i>et al.</i> (2010)..... | 23 |
| Figura 8 - Composições granulométricas (esq.) e relação do IP com a percentagem de finos (dir.), Correia (2004)..... | 30 |
| Figura 9 - Ensaio CPT5+S22A. a) Coeficientes de segurança e lc b) Classificação do horizonte entre os 25 e os 30 m de profundidade, Correia (2004)..... | 31 |
| Figura 10 - Ensaio CPT8+S32A. a) Coeficientes de segurança e lc b) Classificação do horizonte entre os 4 e os 7 m de profundidade, Correia (2004)..... | 32 |
| Figura 11 - Zonamento do potencial de liquefacção, Correia (2004)..... | 32 |
| Figura 12 - Colunas de brita - Perfil tipo..... | 34 |
| Figura 13 - Drenos verticais - Perfil tipo..... | 34 |
| Figura 14 - Colunas de <i>jet-grouting</i> - Perfil tipo..... | 35 |
| Figura 15 - Limite líquido do solo com mistura de areia e caulinite..... | 37 |
| Figura 16 - Limite plástico do solo com mistura de areia e caulinite..... | 38 |
| Figura 17 - Índice plástico do solo com mistura de areia e caulinite..... | 38 |
| Figura 18 - Seção tipo da bandeja para os ensaios E1..... | 39 |
| Figura 19 - Seção tipo para os ensaios E3..... | 40 |
| Figura 20 - Canal de ondas da UNAM..... | 41 |



| | |
|--|----|
| Figura 21 - Colocação dos sensores nos ensaios | 42 |
| Figura 22 - Posição dos sensores no canal (cotas em metros)..... | 42 |
| Figura 23 - Fotografia dos sensores de nível da UNAM..... | 43 |
| Figura 24 - Fotografia dos sensores de pressão da UNAM..... | 43 |

ÍNDICE DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 1 - Trabalho realizado por atividades / tarefas..... | 5 |
| Tabela 2 - Características do solo e da caixa onde é colocado o solo lodoso nos ensaios com emissários..... | 24 |
| Tabela 3 - Características da conduta ensaiada e a sua colocação na caixa nos ensaios com emissários. | 25 |
| Tabela 4 - Características da agitação, a profundidade e a duração dos ensaios e a frequência de aquisição de dados nos ensaios com emissários. | 25 |
| Tabela 5 - Medições efetuadas e o equipamento utilizado nos ensaios com emissários..... | 26 |
| Tabela 6 - Gama de valores dos parâmetros adimensionais nos ensaios com emissários..... | 26 |
| Tabela 7 - Classificação do material segundo o grau de contaminação: metais (mg/kg), composto orgânico (ug/kg)..... | 28 |
| Tabela 8 - Plano de ensaios a realizar. | 36 |
| Tabela 9 - Características do solo com mistura de areia e caulinite..... | 37 |
| Tabela 10 - Estados de mar para agitação regular..... | 44 |
| Tabela 11 - Estados de mar para agitação irregular..... | 45 |
| Tabela 12 - Estados de mar para agitação nos ensaios adicionais com tubagem. | 45 |
| Tabela 13 - Condições de agitação dos ensaios das Fases 1 e 2..... | 46 |
| Tabela 14 - Características do solo, da caixa onde é colocado o solo lodoso e da conduta nos ensaios com emissários e nos novos ensaios a realizar..... | 48 |



| | |
|--|----|
| Tabela 15 - Características do canal, profundidade características da agitação nos ensaios com emissários e nos novos ensaios a realizar. | 48 |
| Tabela 16 - Medições e equipamento utilizado nos ensaios com emissários e nos novos ensaios a realizar. | 48 |
| Tabela 17 - Valores dos parâmetros adimensionais nos ensaios com emissários e nos novos ensaios a realizar. | 49 |

ANEXO

Carta do Instituto de Engenharia, UNAM



1 INTRODUÇÃO

No âmbito do QREN - Quadro de Referência Estratégico Nacional, a equipa WW – Consultores de Hidráulica e Obras Marítimas, S.A. e o LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil, I.P. candidataram-se a um projeto SI I&DT de empresas em co-promoção que visa o Contrato de Concessão de Incentivos Financeiros no Âmbito do Sistema de Incentivos à Investigação e Desenvolvimento Tecnológico (Aviso 13/SI/2011).

O projeto designado por **AREDIS – Adaptações para Reforçar a Estabilidade de Quebra-mares em Terrenos Lodosos** (nº 2012/023027) foi aprovado em fevereiro de 2012 por ser um projeto com mérito científico e tecnológico.

Este projeto está inserido num projeto IBEROEKA entre as entidades espanholas (PROES – Consultores S.A. e Universidade de Granada, UGR) e mexicanas (ALEPH – Ingenieros Consultores, S.A. e Universidad Autónoma Nacional de México, UNAM) e que tem por título “Diseño de Adecuaciones para Rebotucer la Estabilidad de Diques en Suelos Fangosos”.

Na sequência da aprovação do projeto AREDIS Portugal, a equipa técnica do projeto AREDIS Espanha e México que já se encontra em atividade na data da aprovação, solicitou o alargamento dos objetivos específicos do projeto no sentido de complementar os objetivos do projeto AREDIS Espanha e México, noutro tipo de infra-estruturas marítimas. Ou seja, pretendeu-se alargar o conhecimento para solucionar problemas típicos da construção e da exploração dos emissários submarinos assentes em terrenos lodosos, seguindo exatamente a mesma metodologia.

O pedido do alargamento dos objetivos do projeto teve a aprovação da equipa de avaliação, sendo que a data de início do **AREDIS – Adaptações para Reforçar a Estabilidade de Emissários Submarinos em Terrenos Lodosos** foi 2 de novembro de 2012.

O presente documento descreve a evolução do projeto, tendo em conta as atividades e as tarefas desenvolvidas no primeiro semestre de trabalho. No capítulo 2 é apresentado um sumário executivo das atividades do projeto e dos resultados alcançados, no capítulo 3 apresenta-se um diagrama comparando o trabalho previsto na candidatura com o realizado, no capítulo 4 faz-se o enquadramento do tema, com uma abordagem ao estado da arte e no capítulo 5 descrevem-se algumas características da instalação e do equipamento de ensaio, do modelo, das condições de agitação a ensaiar e da metodologia de trabalho. No último capítulo, descreve-se a relevância do projeto para as empresas que integram o consórcio.



2 SUMÁRIO EXECUTIVO DAS ATIVIDADES DE PROJETO

2.1 Objetivos do Projeto

O projeto AREDIS Portugal procurará desenvolver técnicas para fazer face à problemática da construção dos emissários submarinos em regiões com solo que pode ser catalogado como de baixa qualidade ou pouca resistência, por ser formado por material fino (areias, argilas e lodos). Apesar da experiência de estruturas construídas sobre terrenos lodosos, os problemas de assentamentos, erosão e liquefação ainda apresentam grande incerteza.

Assim, os principais objetivos do projeto são:

- OP.1. Analisar a interação solo-estrutura-onda, especificamente nos temas de infraescavação, liquefação e perda de resistência do solo.
- OP.2. Aplicar o conhecimento adquirido para solucionar os problemas típicos da construção e exploração de emissários submarinos sobre terrenos lodosos.

Para a consecução dos dois objetivos gerais, está a decorrer um programa experimental na UNAM, orientado para a compreensão dos processos de infraescavação e liquefação que constituem causas de assentamentos e falhas dos emissários submarinos.

Os objetivos específicos a cumprir durante o projeto pelos diferentes membros do IBEROEKA são:

- OE.1. Análise dos resultados de ensaios em canal a realizar pelos parceiros estrangeiros no âmbito do projeto IBEROEKA. Para tal, a UNAM recebeu financiamento para a construção e operacionalização de um canal de ondas de 22 m de comprimento, 40 cm de largura e 60 cm de profundidade com as laterais e o fundo em aço. Esta instalação é necessária para a realização do programa de ensaios.
- OE.2. Caracterização da interação entre a estrutura marítima (quebra-mar e emissário submarino) em terrenos lodosos e a agitação, revisão das implicações na deformação do perfil da estrutura, na reflexão e no escoamento em redor da estrutura. Estudo da evolução temporal da infraescavação nas imediações da estrutura com indício de uma possível falha.
- OE.3. Geração de um campo de forças no solo que origine a liquefação do material coesivo e a avaliação do impacto deste fenómeno na estabilidade da estrutura. Investigação da possibilidade de reproduzir as condições em que ocorre um assentamento da estrutura marítima (quebra-mar e emissário submarino) de magnitude tal que seja possível considerar-se falha.



- OE.4. Análise dos dados registados e produção de recomendações de projeto e de construção de quebra-mares e de emissários submarinos sobre solo sujeito a liquefação. Revisão das condições de falha dos fundos e do impacto gerado nos parâmetros hidrodinâmicos e morfológicos com o objetivo de definir ajustes ao projeto e/ou definir peças para garantir a estabilidade das estruturas em estudo.

Objetivos OE.1. - OE.2.

O resultado do trabalho experimental será um grupo de registos de comportamento das estruturas marítimas em estudo (quebra-mar e emissário submarino) e dos fundos para diferentes condições de agitação, como sejam, a resposta da forma do perfil e a variação de parâmetros tais como a reflexão; em relação ao solo, medir-se-á a evolução da infraescavação para se estabelecer a sua relação com o comportamento da estrutura.

Se for possível gerar, na instalação experimental, um campo de forças que resulte em liquefação, podem obter-se registos da deformação associada da estrutura e dos parâmetros hidrodinâmicos, para, com eles, avaliar a interdependência entre a estabilidade das estruturas em estudo e a perda de resistência do solo.

Objetivos OE.3. - OE.4.

No que diz respeito ao projeto de ajustes ao perfil das estruturas marítimas em estudo (quebra-mar e emissário submarino) ou de peças com geometria específica ao tipo de solo, pretendem-se encontrar formas que minimizem ou sejam capazes de assimilar o possível assentamento da estrutura, sem comprometer a estabilidade.

Que seja do conhecimento do grupo de trabalho não existem, na literatura, relatórios de experiências semelhantes às que foram propostas no presente documento. É possível encontrar estudos sobre a resposta e perturbações dos solos coesivos à ação da agitação, bem como alguns sobre infraescavação local. No entanto, não existem estudos que abordem soluções construtivas considerando a interação solo-estrutura-onda.

O trabalho experimental é a base do projeto de investigação, uma vez que será a partir do conhecimento nele gerado que serão desenvolvidas as soluções para melhorar a construção de quebra-mares e emissários submarinos em solo sujeito a liquefação. O programa de ensaios planeado será levado a cabo no canal de alta precisão, que foi construído especificamente para este projeto, pelo Instituto de Engenharia da UNAM, no âmbito do projeto IBEROEKA.

A metodologia experimental consiste na colocação do material fino (areia e caulinite) no fundo do canal, com espessura suficiente para garantir que os processos de infraescavação e liquefação não atingirão o fundo do canal. Sobre essa massa de solo será construído um quebra-mar e um emissário submarino, em duas fases.



O solo e a estrutura constituem o modelo de ensaios, que será submetido a condições de agitação que permitam observar os seguintes aspetos:

1. Infraescavação junto da estrutura, com e sem falha da mesma;
2. Falha do perfil por razões hidráulicas, com independência da resposta do solo;
3. Liquefação do solo, com independência da resposta da estrutura.

O tipo de ensaios que se pretende realizar requer um acompanhamento minucioso das variáveis envolvidas, pelo que, no que diz respeito à agitação prevê-se a colocação de sensores de nível; os deslocamentos e as forças serão medidos com sensores de pressão e a deformação da estrutura e a variação temporal da infraescavação e da profundidade de liquefação serão seguidas através da aquisição de imagens de vídeo de alta velocidade.

Deste trabalho experimental pretende-se obter soluções práticas para o dimensionamento dos emissários submarinos sobre solos sujeitos a liquefação, especificamente focadas na fundação, na forma de assentamento das estruturas e, caso a investigação assim o indique, no desenvolvimento de soluções para colocar na fundação e/ou peças para o afundamento e para a estabilização do emissário, a fim de melhorar a sua estabilidade, assimilando a potencial penetração da estrutura no solo.

Com este estudo pretende-se ainda redigir uma série de recomendações para uso na engenharia aplicada.

2.2 Trabalho Realizado

De acordo com o plano de atividades e tarefas previsto na candidatura o estado sobre os trabalhos realizados desde o início do projeto consta da Tabela 1.



Tabela 1 - Trabalho realizado por atividades / tarefas

| Atividade / Tarefa | Resultados |
|---|-------------------|
| Atividade 1 - Programa Experimental e Análise de Dados | |
| <ul style="list-style-type: none"> ◆ Estado de arte atualizado. Tarefa 1.1 – Recompilação da bibliografia sobre o tema em estudo | ◆ |
| <ul style="list-style-type: none"> ◆ Resultados dos ensaios e conclusões relativas às condicionantes da estabilidade registadas nos ensaios. Tarefa 1.2 – Acompanhamento dos ensaios e análise de resultados | ♣ |
| Atividade 2 – Ajuste ao projeto das peças e preparação de recomendações | |
| <ul style="list-style-type: none"> ◆ Caracterização do comportamento do solo em termos de profundidade de falha do leito devido à ação conjunta da agitação, carga e deformação da estrutura. Tarefa 2.1 - Revisão do comportamento do solo | ♠ |
| <ul style="list-style-type: none"> ◆ Projeto de peças e/ou ajustes ao projeto para aumentar a estabilidade de estruturas marítimas em terrenos lodosos. Tarefa 2.2 – Proposta e avaliação dos ajustes ao projeto e de novas peças | ♠ |
| <ul style="list-style-type: none"> ◆ Compêndio de recomendações revisto e avaliado por todo o consórcio. Tarefa 2.3 - Preparação de recomendações | ♠ |

Legenda:

◆ Milestones

Resultados: ♣ previstos atingir (em curso); ◆ atingidos; ♠ a atingir

Na Figura 1 do capítulo seguinte apresenta-se o diagrama comparativo do plano de atividades e tarefas previsto na candidatura e o estado atual dos trabalhos realizados.



3 EVOLUÇÃO DO TRABALHO PREVISTO

Desde o início do projeto até à presente data o consórcio fez uma recompilação da bibliografia sobre o tema da estabilidade dos emissários submarinos em terrenos lodosos, bem como dos assuntos relacionados com esta temática, nomeadamente o comportamento deste tipo de solos, com a interação solo-estrutura-onda. Na presente data, considera-se concluída a tarefa “1.1 - Recompilação da bibliografia sobre o tema em estudo”, correspondente à “Milestone” - Estado de arte actualizado.

Durante o período de desenvolvimento deste trabalho fez-se igualmente uma pesquisa do enquadramento do tema no caso português, com uma abordagem ao estado de arte e definiu-se a metodologia de trabalho e as condições de agitação a ensaiar. Os ensaios de comportamento do solo, da responsabilidade da UNAM e a realizar no México, tal como descrito na proposta da candidatura, tiveram início no presente mês, embora a data prevista de início fosse Novembro de 2012. Assim, admite-se um atraso de cerca de 5 meses no início da tarefa “1.2 - Acompanhamento dos ensaios e análise de resultados” correspondente à “Milestone” - Resultados dos ensaios e conclusões relativas às condicionantes da estabilidade registadas nos ensaios. Na presente data decorreu 28,6% do tempo estabelecido para esta tarefa. Note-se que, apesar dos ensaios ainda não terem começado, a tarefa do acompanhamento de ensaios e análise de resultados iniciou-se na altura prevista com o trabalho realizado para o planeamento dos ensaios.

Em anexo, apresenta-se uma cópia da carta da UNAM, de 11 de abril de 2013, a informar sobre o tempo de atraso no início da tarefa 1.2 e sobre a data de junho de 2013 prevista para a primeira reunião de trabalho.

A Figura 1 seguinte apresenta-se o diagrama comparativo do trabalho previsto na candidatura com o realizado, durante os primeiros 6 meses de execução do trabalho.



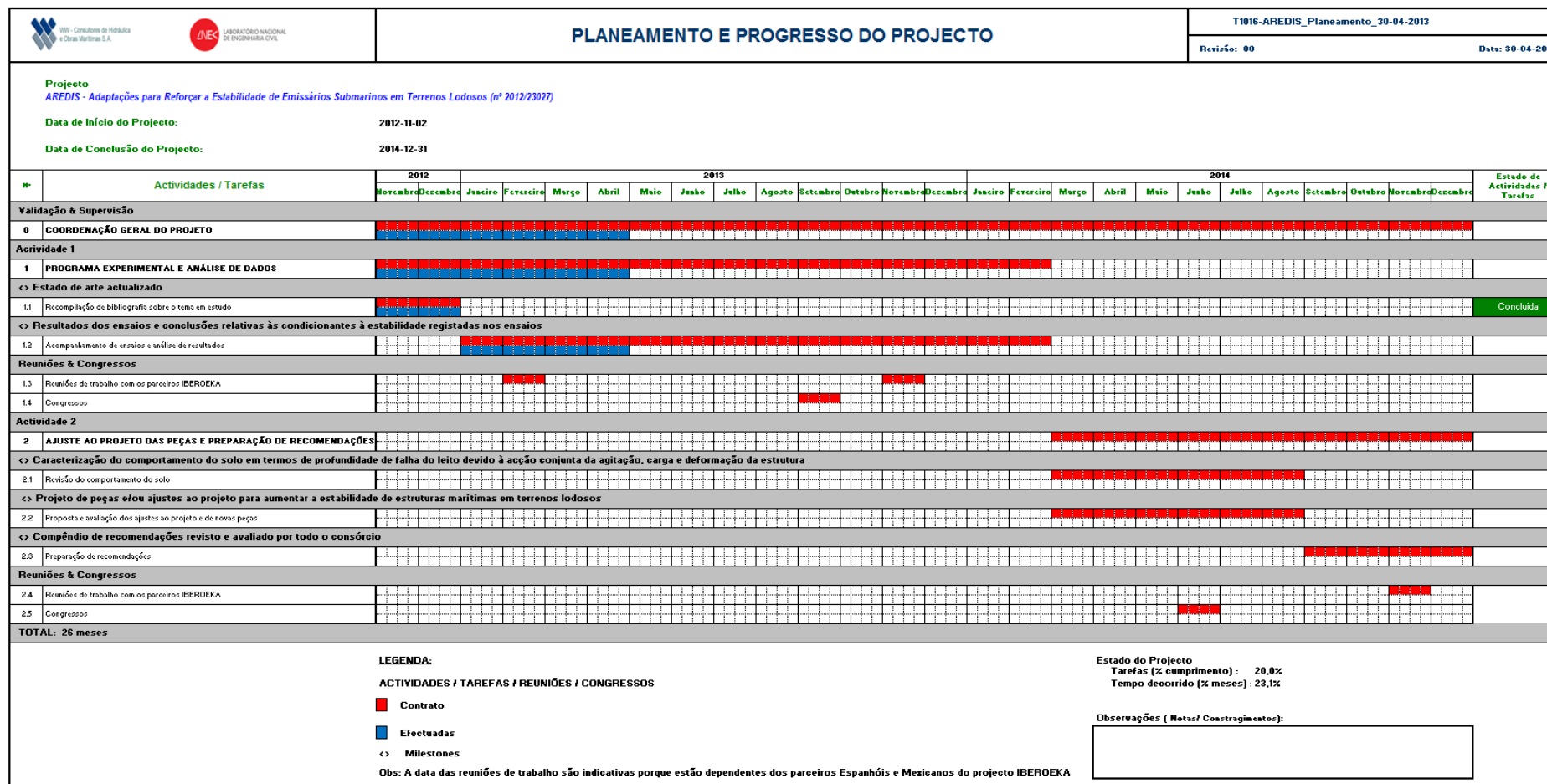


Figura 1 - Diagrama comparativo do trabalho previsto com o realizado.



4 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

4.1 Estado de Arte

4.1.1 Considerações gerais

Tal como foi referido anteriormente, este projeto faz parte integrante de um projeto mais amplo no âmbito do programa IBEROEKA. Como tal, a equipa alargada do projeto, que inclui os membros espanhóis e mexicanos, encontra-se a compilar o estado de arte no que se refere a estudos de interação solo-estrutura-onda. Desta forma, apresenta-se neste relatório o estado de arte que foi assignado aos membros portugueses e que consta de:

- Pesquisa bibliográfica dos temas relacionados com ensaios em modelo físico e estudos teóricos da interação do solo sujeito a liquefação num emissário submarino sob a ação da agitação marítima;
- Identificação da legislação portuguesa aplicável a processos construtivos utilizados numa obra marítima fundada num solo com pouca resistência;
- Identificação dos parâmetros utilizados na caracterização dos solos com pouca resistência;
- Caracterização preliminar de solos com pouca resistência existentes em Portugal, neste caso, no estuário do Tejo;
- Apresentação dos processos construtivos utilizados hoje em dia em Portugal numa obra marítima fundada num solo lodoso;
- Levantamento dos casos de estudo que ilustram a experiência portuguesa no projeto de obras marítimas fundadas em solos com problemas de resistência e deformabilidade.

Incluem-se ainda algumas considerações gerais sobre solos com pouca resistência e modos de falha de emissários submarinos, que é a estrutura marítima a estudar pela equipa portuguesa no âmbito deste projeto.



4.1.2 Solos com pouca resistência

O último estado de decomposição devido à intempérie de muitos tipos de rocha é a formação de argilas, as quais constituem a maior parte do material encontrado em deltas, estuários e algumas costas específicas (por exemplo, o golfo do México). Estas argilas depositam-se no fundo e consolidam-se sobre assentamentos prévios, o que se traduz em estratos muito pouco permeáveis e coesivos; uma das suas principais características é a anisotropia, pelo que a sua permeabilidade horizontal é maior que a vertical. Em virtude de serem formados por depósitos acumulados em diferentes instantes temporais, os solos lodosos muitas vezes contêm bolsas de material granular entre os diferentes estratos e, pela mesma razão, é comum encontrar uma grande quantidade de material orgânico. O comportamento geral das argilas é determinado pela forma das suas partículas, pela sua composição mineralógica e pela quantidade de água que contêm. Os solos genericamente chamados de lodos são compostos por material fino, altamente plástico e de deposição recente. Estas características, especificamente no caso marinho, fazem com que a resistência do solo diminua em várias ordens de grandeza, o que representa um grave problema para a construção de estruturas marítimas.

As argilas, inicialmente, tendem a formar taludes muito verticais, uma vez que a sua flutuação é menor que a do ar. No entanto, com o tempo, a estrutura do solo debilita-se e, ao alcançar a fadiga, falha formando o típico plano curvo. A longo prazo, os taludes estáveis dos solos lodosos variam desde 1(H):1(V) até 1(H):5(V). Estes taludes podem ser menos inclinados se ocorrer alguma sobrecarga, como, por exemplo, um depósito de material (natural ou artificial) ou um incremento no estado de esforços exercido pela agitação.

Os solos lodosos são muito sensíveis à vibração resultante de impacto (por exemplo, a gerada pela cravação de estacas) e podem falhar se não se trabalha com o cuidado necessário.

Pela sua parte, a agitação induz um estado de esforços cíclico, de maneira que a persistência altamente energética da agitação facilmente inicia no solo um processo de histerese que pode diminuir a resistência do solo até cerca de 25%.

Uma intervenção comum nos terrenos lodosos é a colocação de estacas com o intuito de aumentar a capacidade resistente do solo, intervenção esta relativamente simples uma vez que, em princípio, a coesão do solo com a estaca é baixa. Esta capacidade dos solos coesivos de assimilarem corpos e de os integrarem no corpo do solo, fazendo-os participar na sua resistência como um bloco, é de vital importância na construção de estruturas de proteção.

As propriedades dos solos coesivos são também problemáticas para as dragagens. No caso da dragagem hidráulica, a acumulação de material de formas irregulares pode tornar muito lenta a operação, podendo até não permitir o trabalho. A dragagem dos solos coesivos com equipamento do tipo escavadora tem um rendimento inferior à dragagem dos solos arenosos. Por outro lado, uma vez que as argilas se encontram em suspensão, o seu comportamento é do tipo coloidal, o que leva a que a sua descarga tenha turbidez muito alta.



Uma das características mais importantes dos solos coesivos relativamente à construção de estruturas marítimas é que qualquer elemento que se coloque sobre eles apresentará um certo grau de penetração. A resistência dos solos coesivos à penetração é uma combinação entre a falha sujeita a uma carga pontual e o esforço cortante na superfície lateral do elemento que penetra.

Outra característica dos solos coesivos de interesse para a construção das estruturas marítimas é o facto de a sua resistência poder ser fortemente melhorada quando se reduz o seu conteúdo em água, já que se favorece a consolidação e se aumenta a resistência ao corte. Uma das maneiras mais simples de diminuir o conteúdo em água de um solo é aplicar-lhe uma sobrecarga, o que, para estruturas de grande dimensão, é benéfico já que leva a uma melhoria gradual da fundação no tempo.

Dadas as características acima citadas, é prática comum em engenharia melhorar os solos lodosos a fim de contar com uma fundação de melhor qualidade para as estruturas. Entre as ações que favorecem os bons resultados encontram-se as colunas de brita para aumentar a resistência e prevenir a liquefação. A colocação das colunas faz-se com um perfurador que injeta ar e deposita brita no espaço de onde sai o lodo. Outros meios de consolidação dos solos coesivos são: por vibração, por drenagem direta e por meios químicos.

É de notar que ainda não existe uma série de práticas de uso comum e recomendações relativas à construção de estruturas em solos coesivos e encontra-se muito pouco trabalho científico a este respeito. Embora existam alguns trabalhos relativos à ação da agitação sobre fundos coesivos (Maa & Mehta, 1987, de Wit & Kranenburg, 1997, Zhao *et al.*, 2006), existem poucos trabalhos de laboratório focados na determinação das condições de operação, falha, infraescavação e interação solo-estrutura-onda. Este tema tem, no entanto, um forte impacto no projeto e no serviço das estruturas construídas sobre terrenos lodosos, dada a incerteza que prevalece neste assunto.



4.1.3 Parâmetros de caracterização dos solos

No que se refere aos parâmetros utilizados para caracterizarem os solos com pouca resistência, destacam-se os relacionados com o transporte sedimentar e os relacionados com as condições geológico-geotécnicas.

Dentro das propriedades relacionadas com o transporte sedimentar, os parâmetros utilizados são:

- Distribuição granulométrica (por difração laser ou sedimentação);
- Composição mineralógica (por difração de raio-X);
- Conteúdo de matéria orgânica;
- Massa volúmica aparente seca (o conteúdo de água);
- Tensões críticas de erosão e de deposição (estudadas em ensaios em canal).

No que se refere à caracterização das condições geológico-geotécnicas, os parâmetros utilizados são:

- Perfis de sondagem;
- Ensaio SPT “*in situ*”;
- Ensaio CPT;
- Limites de consistência de Atterberg (LL e LP);
- Ensaio triaxiais;
- Ensaio de consolidação endométrica.

No que se refere a ensaios, podem-se destacar os ensaios para definição estratigráfica dos perfis de solo (modelo geométrico) e da história de tensões no terreno, os ensaios para identificação do solo e os ensaios para caracterização estática e dinâmica do solo.

Os ensaios utilizados para definição estratigráfica dos perfis de solo (modelo geométrico) e da história de tensões no terreno são:

- Sondagens;
- Prospeção geofísica;
- Prospeção mecânica;
- Determinação do estado de tensão “*in situ*” e grau de sobreconsolidação (OCR).

Os ensaios utilizados para identificação do solo são:

- Ensaio de identificação correntes;
- Limites de Atterberg (destaque para o índice de plasticidade IP);



- Granulometrias;
- Análises mineralógicas.

Finalmente, os ensaios para a caracterização estática e dinâmica do solo são:

- Ensaios endométricos – parâmetros de consolidação e de compressibilidade;
- Ensaios estáticos de corte triaxial com diferentes taxas de deformação – parâmetros de compressibilidade elástica e plástica e sua evolução com o nível de deformação e com parâmetros de resistência, para diferentes taxas de deformação;
- Ensaios de corte triaxial cíclico – evolução dos parâmetros de rigidez e de amortecimento e da resistência com o nível de deformação e com o número de ciclos imposto pela ação dinâmica.



4.1.4 Modos de falha de emissários submarinos

Modo de falha é uma forma ou mecanismo, geométrico, físico, mecânico, químico ou biológico, pelo qual a obra, ou algum dos seus elementos, fica fora de serviço por causas estruturais. Quando um modo de falha ocorre, é necessário proceder a reparações ou à sua reconstrução de modo a restabelecer o nível apropriado de segurança e operacionalidade da estrutura.

No caso das obras marítimas em geral, e dos emissários submarinos em particular, as boas condições de funcionamento 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.

Para a falha de um emissário submarino, isto é, a perda de resistência da estrutura (perda de segurança), perda da capacidade funcional (perda de serviço) e/ou capacidade operacional (perda de exploração), podem contribuir diversos fatores. Este processo pode ocorrer súbita ou gradualmente, de forma temporária ou permanentemente, parcial ou totalmente. Um dos principais objetivos do projeto é assegurar que a estrutura proposta seja fiável em termos de segurança, funcional em termos de serviço e operacional relativamente ao uso e exploração. Assim, os critérios de projeto no que diz respeito à fiabilidade, funcionalidade e operacionalidade devem ser especificados previamente. A construção e manutenção da estrutura, assim como o seu uso e exploração, dependerão de todos estes elementos durante a sua vida útil.

Para diferentes tipos de falha estão associados estados limites diferentes, que se podem dividir em estados limites últimos (ELU), de serviço (ELS) e de utilização (ELO).

Quando o modo de falha é uma patologia ou é produzido pela ação de um ou mais agentes durante um período de tempo muito inferior à vida útil da estrutura, deve ser considerado estado limite **último**. Estados limites últimos são estados que produzem o colapso da estrutura devido a rutura ou danos estruturais. São estados que provocam a perda da capacidade estrutural ou resistência.

Quando o modo de falha pode reduzir a vida útil e a fiabilidade da estrutura e poderia ser prevenido ou adiado através de uma estratégia adequada de manutenção da estrutura e dos seus elementos (Puertos del Estado), deve ser considerado estado limite de **serviço**. Estados limites de serviço são estados que induzem uma perda de funcionalidade na estrutura e paragem operativa. São estados que produzem uma perda de serviço e funcionalidade, reversível ou irreversível, devido a uma falha estrutural, estética ou ambiental, ou devido a uma limitação legal.

Nos estados limites de **utilização** o uso e exploração da estrutura são reduzidos ou temporariamente interrompidos devido a causas externas à estrutura e seus elementos, sem dano estrutural.

Os principais modos de falha e os estados limites correspondentes para cada secção do emissário submarino encontram-se apresentados em Mendonça *et al.* (2011) e são:



Para a conduta submersa:

1 - Colapso progressivo (ELU), causado por:

- a) variações de forças devido a: ação direta das ondas, vibrações no sistema, e.g. devido à formação de esteiras de vórtices (correntes, ondas, vento ou reboque); movimentos na estrutura de apoio da conduta; flutuações da pressão e impulsão devido a liquefação das areias;
- b) instabilidade vertical devido à variação das forças de sustentação resultantes da pequena distância entre o tubo e o fundo;

2 - Rotura (ELU/ELS) causada por impactos associados a atividades de terceiros: âncoras de barcos, operações de pesca, redes de pesca, queda de objetos;

3 - Fadiga (ELS) associada às ações naturais (ventos, ondas, correntes, sismos, etc.);

4 - Obstrução (ELS), consequência de velocidades baixas do efluente, sedimentação e bolsas de ar devidas a curvaturas na conduta;

5 - Corrosão interna (ELS/ELO): abrasão, ação de bactérias, velocidades insuficientes para autolimpeza.

Para o difusor:

1 - Rotura (ELU) causada por impactos associados a atividades externas: âncoras de navios, operações relacionadas com a pesca, redes de pesca, impacto de objetos em queda;

2 - Obstrução (ELS): crescimento marinho, intrusão de água do mar, entrada de sólidos em ciclos de pouco caudal, objetos presos;

3 - Corrosão (ELS/ELO) por intrusão salina.

Para o cachimbo:

1 - Rotura (ELU): impacto de objetos, ações naturais, deslocamento ou assentamento da conduta;

2 - Obstrução (ELS): crescimento marinho, intrusão de água do mar, entrada de sólidos durante ciclos com menor caudal, objetos presos;

3 - Corrosão (ELS/ELO) por intrusão salina.

Para os anéis de afundamento e juntas da conduta:

1 - Fratura (ELS): deslocamento da conduta, pressões em excesso, liquefação do solo, instabilidade vertical, corrosão das partes metálicas.



O projeto de emissários submarinos é muito complexo, dispendioso e estão-lhe associadas inúmeras incertezas relacionadas, por exemplo, com o carácter aleatório das solicitações atuantes (e.g. ondas, correntes), os modelos utilizados para representar a realidade (e.g. modelos físicos/numéricos), etc.

No dimensionamento dos emissários submarinos são normalmente calculadas as dimensões da conduta de forma a resistirem às variações de forças devido à ação direta das ondas. Este projeto centra-se nos modos de falha da conduta devido à liquefação do solo, podendo levar a movimentos na estrutura de apoio da conduta, flutuações da pressão e impulsão.

Embora nas últimas décadas se tenha aprofundado no 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 aquando da liquefação e em casos de referência.

No âmbito do projeto LIMAS de Groot *et al.* (2006) alertaram para a importância para a boa prática da engenharia da compreensão dos processos que ocorrem aquando da liquefação de solos arenosos em redor de estruturas marítimas. Estes autores referem os vários tipos de liquefação que podem ocorrer e descrevem resumidamente os fenómenos físicos correspondentes. Apresentam ainda um levantamento de casos típicos de liquefação em redor de estruturas marítimas, tais como condutas submarinas e quebra-mares, apresentando uma discussão dos fenómenos relevantes.

No que se refere a condutas submarinas, no âmbito do projeto LIMAS foram realizados ensaios onde se produziu a liquefação do solo induzida pelas ondas e foram estudadas as pressões no solo na proximidade da conduta e longe da mesma, de forma a inferir sobre a influência da presença da conduta no aumento da pressão no solo e na resultante liquefação (Sumer *et al.*, 2006 a) e sobre a flutuação da conduta num solo liquefeito e sobre a densidade do solo liquefeito (Sumer *et al.*, 2006 b). Com base nos resultados dos ensaios, foi ainda revista a metodologia clássica de cálculo da estabilidade de condutas submersas para o caso de ocorrer liquefação do solo e foi proposto um modelo analítico para prever a profundidade de afundamento de uma conduta. No entanto, os autores recomendam a realização de mais ensaios de forma a poder confirmar e generalizar as conclusões obtidas (Teh *et al.*, 2006).

Também no âmbito do projeto LIMAS, Foray *et al.* (2006) estudaram o excesso de pressão em redor de estruturas submetidas à ação das ondas em fundos arenosos, utilizando modelação física. Nestes casos, o solo e a estrutura estão simultaneamente submetidos à ação das ondas. A areia em torno da estrutura está, assim, sujeita à ação das ondas de duas formas diferentes: diretamente e indiretamente através da estrutura. De Groot *et al.* (2006) considera que, na maioria dos casos, a ação indireta domina sobre a ação direta em redor da estrutura, o que permite um “*setup*” laboratorial em que a onda não é modelada e, como tal, não é necessária a utilização de um canal de ondas, desde que a ação na estrutura seja bem simulada. Foray *et al.* (2006) usaram um modelo físico deste tipo, à escala 1:1, para estudar a interação fluido-solo-estrutura, com ênfase especial



sobre as condições que levaram à liquefação em torno da conduta instrumentada com sensores de pressão intersticial. Os ensaios evidenciaram que a liquefação ocorria numa camada de solo na vizinhança da estrutura ocorrendo penetração da estrutura que podia estar relacionada com o fenómeno da liquefação.

Em Sumer (2008) é referido ainda um trabalho efetuado nesse ano para verificar a efetividade da colocação de enrocamento sob uma conduta submarina para a sua estabilização, no caso de liquefação do solo. Os ensaios realizados verificam que dependendo da densidade de colocação do enrocamento e da quantidade de blocos colocados pode ou não ocorrer liquefação do solo. No entanto, quando se dá a liquefação do solo, os blocos afundam no solo.

Outro estudo experimental de relevo é o realizado por Foda et al. (1988). Estes autores efetuaram ensaios com o objetivo de aprofundar o conhecimento da relação entre solo-conduta-ondas focando-se nos processos físicos que levam a que condutas semienterradas se “desprendam” do solo e flutuem (breakout). Este estudo foi o primeiro a considerar condutas semienterradas e em analisar a relação do solo com a conduta sujeita a ação das ondas. É por isso um importante ponto de partida para este estudo.

No que diz respeito à modelação numérica da liquefação induzida pelas ondas, que se iniciou no início dos anos 70, esta tem-se tornado mais sofisticada à medida que a compreensão dos processos físicos que ocorrem aquando da liquefação tem aumentado. Dunn *et al.* (2006) apresentam resultados de um estudo numérico bidimensional de liquefação induzida pelas ondas em redor de uma conduta enterrada. Neste estudo realizado no âmbito do projeto LIMAS, o modelo de elementos finitos, DIANA-SWANDYNE II (Chan, 1995), foi primeiro validado com soluções analíticas e dados laboratoriais e mostrou-se capaz de reproduzir o comportamento observado das variações de pressão intersticial. Ao contrário de modelos numéricos mais antigos, que investigavam ou a liquefação instantânea ou a residual, DIANA-SWANDYNE II inclui um modelo constitutivo que pode prever as duas formas de liquefação. A modelação numérica focou-se em algumas das questões que foram levantadas nos estudos de modelação física de Teh *et al.* (2003) e Sumer *et al.* (2006 a). Em particular, a influência do diâmetro da conduta, condições de fronteira em torno da conduta, profundidade da vala, etc., foram avaliadas e os resultados estão, em geral, de acordo com as conclusões experimentais.

Damgaard *et al.* (2006) desenvolveram recomendações práticas de dimensionamento da estabilidade de condutas em solos não coesivos, com base essencialmente nos resultados da modelação física e numérica levada a cabo no âmbito do projeto LIMAS, mas também com base em resultados de investigação prévia. Apresentam um sumário dos estudos/resultados da modelação física e numérica, bem como uma visão geral das normas e regulamentos relevantes existentes atualmente. Segundo os autores, as recomendações não são exaustivas, pois alguns aspetos relevantes ainda requerem investigação adicional, mas têm como principal objetivo guiar o projetista na direção correta, constituindo uma base sensata para definir a análise adicional necessária para um determinado projeto de condutas submersas. A comparação entre as novas recomendações e os métodos tradicionais recomendados nas normas e regulamentos existentes atualmente permitiu concluir que para condições de baixa ação das ondas os métodos tradicionais podem levar ao subdimensionamento, enquanto que para graves condições da ação das ondas podem levar ao sobredimensionamento. A determinação



do índice de vazios críticos de solo liquefeito é importante para o dimensionamento da conduta relativamente à estabilidade. No entanto, ainda não existem métodos práticos para proceder a essa determinação.

Resumindo, embora já tenham sido realizadas algumas simulações numéricas e levados a cabo alguns ensaios que permitem inferir sobre a estabilidade de um emissário submarino quando ocorre liquefação induzida pelas ondas, a informação existente não é suficiente para retirar conclusões generalizáveis e não existe ainda nenhuma solução estrutural que permita evitar os modos de falha de emissários devido à liquefação do solo.



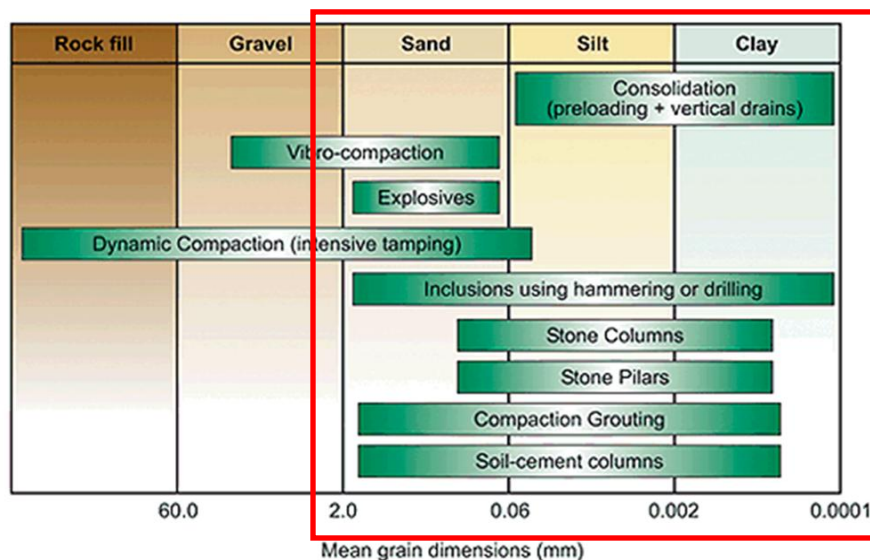
4.1.5 Processos construtivos

Apresenta-se neste sub-capítulo os principais processos construtivos utilizados hoje em dia na construção de uma obra marítima fundada num solo com pouca resistência, incluindo o seu custo, rendimento de execução e equipamento necessário. Estes dados são importantes para poder comparar as soluções que se venham a preconizar no âmbito deste projeto com as soluções disponíveis atualmente, quer em termos de custo, quer de rendimento e equipamento necessário, de forma a aprofundar as suas vantagens económicas e técnicas, assim como as suas limitações.

Os processos construtivos utilizados atualmente na construção de uma obra marítima fundada num solo lodoso ou num solo composto por areia e lodo, com o objetivo de aumentar a resistência da capacidade de carga do solo de fundação, são:

- Tratamento de solos lodosos ou de solos compostos por areia e lodo em ambiente marítimo:
 - Colunas de brita (*vibroreplacement*);
 - Colunas de *jet-grouting*;
 - Aplicação de drenos verticais;
 - Colunas de solo e cimento (*soil mixing*).
- Dragagem e substituição do solo (quando a legislação o permite).

Na Figura 2 apresentam-se as técnicas de tratamento de solos marítimos e terrestres de acordo com as características do solo.



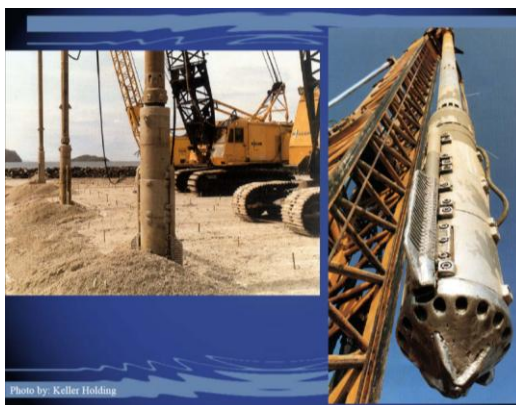
Fonte: http://www.bachy-soletanche.com/SBF/sitev4_uk.nsf/technique/soil-improvement.

Figura 2 - Técnicas de tratamento função das características do solo.



As estimativas de custos e os rendimentos de cada tipo de tratamento têm os seguintes valores:

- **Colunas de brita** (ver Figura 3)
 - Custo para colunas com um diâmetro de 1,0 m: 30 € a 50 € por metro linear (ml) + custo do aterro de pré-carga (26 € a 30 € por m³)¹;
 - Rendimento de execução: 80 ml/dia/equipamento;
 - Equipamento de construção: grua.

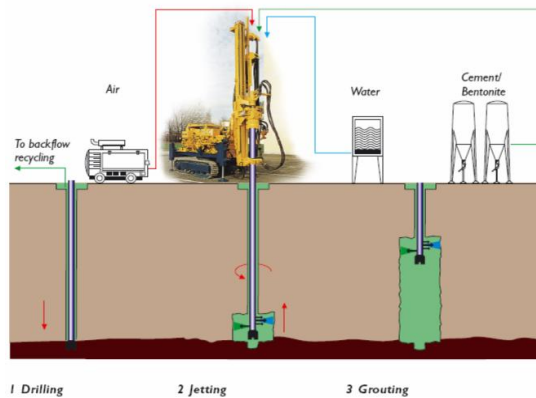


Fonte: *Earthwork and Ground Technology Site Improvement. Presentation slide by College of Engineering, University of Washington.*

Figura 3 - Exemplo da construção de colunas de brita.

- **Colunas de *jet-grouting*** (ver Figura 4)
 - Custo para colunas com um diâmetro de 1,2 m: 120 € a 200 € por metro linear (ml);
 - Rendimento de execução: 60 ml/dia/equipamento;
 - Equipamento de construção: equipamento próprio para construção de estacas, silos de cimento, central de betão e bomba.

¹ Inclui o custo da construção e do material em caso de existir material disponível próximo da zona da obra.



Fonte: *Earthwork and Ground Technology Site Improvement. Presentation slide by College of Engineering, University of Washington.*

Figura 4 - Exemplo da construção de colunas de jet grouting.

- **Aplicação de drenos verticais** (ver Figura 5)

- Custo: 1 € a 2.5 € por metro linear (ml) + custo do aterro de pré-carga (26 € a 30 € por m³) ¹;
- Rendimento de execução: 200 ml/dia/equipamento;
- Equipamento de construção: grua.



Fonte: *Earthwork and Ground Technology Site Improvement. Presentation slide by College of Engineering, University of Washington.*

Figura 5 - Exemplo de aplicação de drenos verticais.

¹ Inclui o custo da construção e do material em caso de existir material disponível próximo da zona da obra.

- **Dragagens**

- Solos coesivos moles:
 - Custo: $\approx 7 \text{ €/m}^3$ para profundidades inferiores à cota -6,0 m(ZH) e para uma distância de descarga de 6 milhas da costa;
 - Rendimento: 3600 m³/dia considerando uma draga e três guas de baldes;
 - Equipamento: draga e grua de baldes.
- Solos coesivos duros:
 - Custo: $\approx 10 \text{ €/m}^3$ para profundidades inferiores à cota -6,0 m(ZH) e para uma distância de descarga de 6 milhas da costa;
 - Rendimento: 1200 m³/dia considerando uma plataforma de patas e uma escavadora;
 - Equipamento: plataforma de patas e escavadora.

Segundo a legislação portuguesa:

- A extração de inertes em águas públicas está sujeita à obtenção de licença, a qual só é permitida quando: está prevista no plano específico de gestão das águas; como medida de conservação e reabilitação da rede hidrográfica, zonas ribeirinhas ou zonas costeiras e de transição; como medida necessária à criação ou manutenção de condições de navegação em segurança e da operacionalidade do porto.
- É problemática a autorização de dragagens de solos nos estuários, atendendo ao grau de contaminação que frequentemente apresentam, pelo que prevalece o tratamento do solo em detrimento da realização da dragagem.



4.1.6 Ensaios com emissários em fundos sujeitos a liquefação

Na revisão do estado da arte encontraram-se diversos trabalhos nos quais se descrevem ensaios realizados para estudar a interação onda-lodo.

Maa e Mehta (1987) executaram duas séries de ensaios, a primeira para caracterizar as propriedades do sedimento e a segunda para medir a erosão. Ensaíram dois tipos de lodos: uma caulinite comercial (tamanho médio de partícula, d_{50} , 1mm) e um lodo proveniente do estuário de Cedar Key, Florida ($d_{50}=2 \mu\text{m}$). Os dois tipos de solo estavam em estado floculado. A colocação do lodo no canal de ondas iniciou-se vertendo uma mistura de água e sedimento e deixando-a consolidar durante 2 a 14 dias. Mediram-se alturas de onda com sensores de nível de capacitância, pressões no fundo com sensores de pressão, concentração de sedimento na água com um dispositivo ótico e velocidades orbitais com um correntómetro. Além disso, caracterizaram-se reologicamente os lodos ensaiados. A principal conclusão do estudo foi que a agitação debilita o leito de lodo facilitando a sua erosão e que o leito provoca sobre a agitação uma atenuação da sua energia. Não se estudou o efeito das correntes, embora fosse de esperar que a ação conjunta da agitação e correntes levasse à ressuspensão e transporte do material do leito.

Posteriormente, Lindenberg et al. (1989), analisaram a liquefação do solo lodoso devida à ação da agitação. Para tal, realizaram uma série de ensaios no Delft Hydraulics num canal de ondas com um comprimento de 17 m e uma largura e altura de 0,3 e 0,5 m, respetivamente. No canal foi colocado um fundo falso de 0,05 m de espessura que foi preenchido com lodo nos 10 m centrais do canal e foram colocadas paredes separadoras entre as regiões com e sem lodo. Deixou-se consolidar o solo (caulinite) durante 3 dias. Após esse tempo retiraram-se as paredes separadoras e o canal foi cheio lentamente com água salgada. A profundidade de água foi de 0,25 m em todos os ensaios. Lindenberg *et al.* faziam os ensaios em duas fases: na Fase 1 gerava-se a agitação de altura constante durante 3 horas, aumentando depois a altura de onda até determinado valor. Deixava-se então o sedimento consolidar durante um período de 20 a 40 horas e passava-se à Fase 2, onde se repetiam as condições de agitação da Fase 1. Ensaíram-se três tipos de lodos: 100% caulinite, areia e caulinite e 100% areia.

Feng (1992) realizou um estudo da fluidificação dos solos coesivos pela ação da agitação mediante ensaios em laboratório. Os ensaios foram realizados num canal de ondas de 20 m de comprimento, 0,46 m de largura e 0,45 m de altura, no que se colocou um fundo de lodo de 0,14 m de profundidade e com declive de 1:12 de ambos os lados (Figura 6). Antes de realizar os ensaios com lodo, foi colocado um fundo falso para verificar as condições de agitação dos ensaios. Realizaram-se ensaios com duas profundidades de água (0,15 e 0,20 m) e 4 períodos (0,5, 1,0, 1,5 e 2,0 s). Sob condições de agitação regular, mediram-se dados de superfície livre, velocidade horizontal do escoamento, pressão total e dos poros.



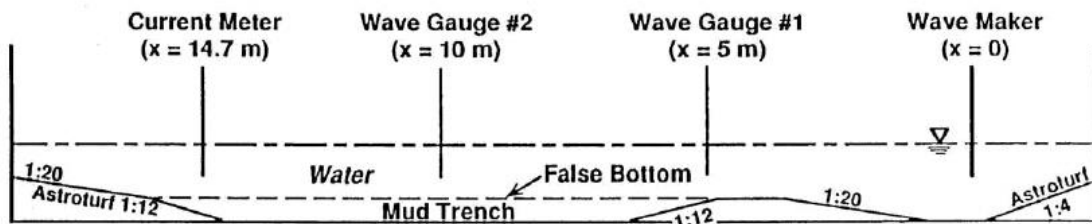


Figura 6 - Canal experimental utilizado por Feng (1992).

No mesmo canal estudou-se ainda a contribuição da camada de lodo na atenuação da agitação (Robillard, 2009). Neste caso colocou-se o lodo numa valeta de 0,12 m de profundidade e de 5 m de comprimento, com declive lateral de 1:12 e encheu-se o canal com água salgada até aos 0,19 m. Foi possível demonstrar que o comportamento do lodo (viscoelástico ou puramente viscoso) depende da profundidade de água no canal.

Soltampour et al. (2010) centraram o estudo na dissipação da agitação causada pela presença de um fundo de lodo. Os ensaios realizaram-se no canal de ondas do Laboratório de Modelos Hidráulicos da Universidade de Tecnologia K. N. Toosi do Teherão (Irão), com 12,5 m de comprimento, 0,30 m de largura e 0,50 m de profundidade. Foi introduzido no canal um fundo falso com um comprimento de 1,5 m e espessura de 0,08 m (Figura 7), onde o material lodoso era colocado. O material era composto por caulinite comercial e água potável. Ensaíram-se períodos de 0,7 a 1,4 s. Os autores concluíram que a diminuição da altura de onda sobre a camada de lodo pode ser aproximada com um ajuste exponencial, em concordância com os resultados obtidos em trabalhos anteriores por outros investigadores. Observou-se também que o rácio de atenuação de altura de onda aumenta debilmente com o aumento de altura de onda.

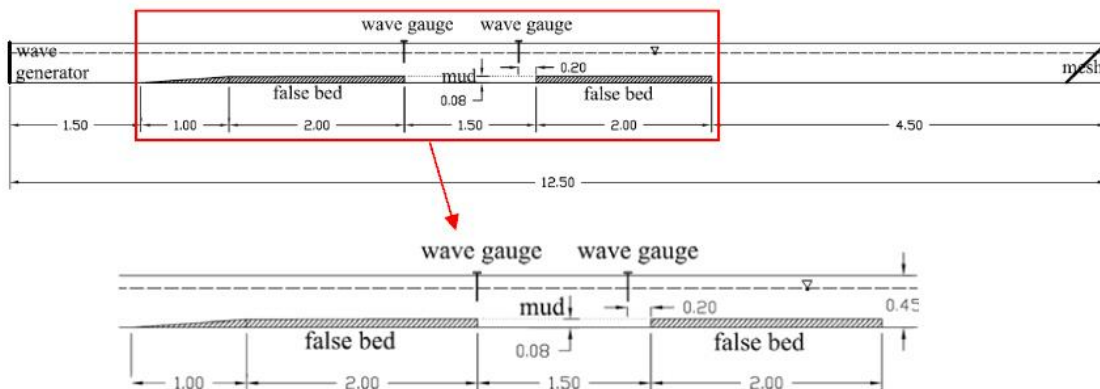


Figura 7 - Canal experimental utilizado por Soltampour et al. (2010).

No que se refere a ensaios de emissários sobre fundo de lodo, 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. Nas Tabelas 2 a 5 apresenta-se um resumo das principais características dos ensaios. Na Tabela 2 resumem-se as características do solo e da caixa onde foi colocado o solo lodoso nos ensaios e onde d_{50} representa o diâmetro



médio dos sedimentos. Na Tabela 3 apresentam-se as características da conduta ensaiada e a sua colocação na caixa, onde D é o diâmetro da conduta e e é a distância da parte inferior da conduta à interface solo-água. Na Tabela 4 apresentam-se as características da agitação, a profundidade, a duração dos ensaios e a frequência de aquisição de dados. Nesta Tabela, h é a profundidade de água no canal, H e T a altura e período da onda no caso de agitação regular, H_s e T_p a altura de onda significativa e o período de pico do espectro no caso de agitação irregular. Na Tabela 5 resumem-se as medições efetuadas e o equipamento utilizado. Em todas as tabelas se apresentam as respetivas referências bibliográficas.

Como se pode verificar, muitas das referências são de 2006, ano em que se publicou um “*special issue*” dedicado aos resultados do projeto LIMAS (ver secção 4.1.4).

Tabela 2 - Características do solo e da caixa onde é colocado o solo lodoso nos ensaios com emissários.

| | Solo | | | Caixa onde o solo é colocado | | Referência bibliográfica |
|---|---|---|---------------------------------|--------------------------------------|---|--|
| | Tipo de solo | Peso específico (kN/m ³) | d ₅₀ (mm) | distância à fronteira de entrada (m) | Dimensão (m) largura x altura x comprimento | |
| 1 | silte | 20,54 | 0,045 | 12 | < 0,60x0,17x0,9 | Sumer <i>et al.</i> (1999) |
| 2 | silte | 20,54 | 0,045 | 12 | 0,59 x 0,17 x 0,9 | Sumer <i>et al.</i> (2006 a) |
| 3 | silte | 18,15-19,91 | 0,078 | 12 | 0,59 x 0,175 x 0,9 | Sumer <i>et al.</i> (2006 b) |
| 4 | - | 26,5 | 0,51; 0,78; 1,84 e 2,51 | 6 | (-) x 0,25 x 1,5 | Hajikandi <i>et al.</i> (2010) |
| 5 | areia | - | 0,3 | 15,24 | 2,44 x 0,61 x 1,37 | Foda <i>et al.</i> (1988) |
| 6 | silte "limestone" | 19,46 e 20,08 (antes e depois do teste) | 0,033 (d ₁₀ =0,01mm) | 14,9 | 1 x 0,3 x 1,6 | Teh <i>et al.</i> (2003) Teh <i>et al.</i> (2006) |
| 7 | areia (caso 1) e brita (caso 2) | 26,49 | 0,25 | - | 0,4 x 1,0 x 0,6 ⁽²⁾ | Magda <i>et al.</i> (2000) |
| 8 | areia (caso 1) e areia+brita+geogrid (Caso 2) | 13,87<areia<17,33 16,5<brita<23,0 | 0,15 | - | 0,356 x 0,355 x 0,71 | Ling <i>et al.</i> (2003) |
| 9 | areia | 26,5 | 0,156 | - | - | Foray <i>et al.</i> (2006) |



Tabela 3 - Características da conduta ensaiada e a sua colocação na caixa nos ensaios com emissários.

| | Conduta | | | Canal | | Referência bibliográfica |
|---|---------------------------------|-------------------------------|---|--|---------------|--|
| | Diâmetro da conduta, D (m) | Comprimento da conduta, L (m) | posição da conduta em relação ao fundo, e/D | Dimensão (m) largura x altura x comprimento | Tipo de canal | |
| 1 | 0,04 | < 0,60 | 0 e 1,75 | 0,6 x 0,8 x 26,5 | Ondas | Sumer <i>et al.</i> (1999) |
| 2 | 0,04 (aluminio), 0,08 (perspex) | - | 1,125-3,75 | 0,6 x 0,8 x 26,5 | Ondas | Sumer <i>et al.</i> (2006 a) |
| 3 | 0,02 | 0,57 | 1,5-7,25 | 0,6 x 0,8 x 26,5 | Ondas | Sumer <i>et al.</i> (2006 b) |
| 4 | 0,03; 0,04; 0,05 e 0,07 | - | < 3,5 e > 3,5 | 0,75 x 0,6 x 10,0 | Ondas | Hajikandi <i>et al.</i> (2010) |
| 5 | 0,203 | 2,44 | 0,5 | 2,44 x 1,52 x 54,9 | Ondas | Foda <i>et al.</i> (1988) |
| 6 | 0,075 | 0,97 | 0 a 1,2 | 1 x 1,2 x 50 | Ondas | Teh <i>et al.</i> (2003) Teh <i>et al.</i> (2006) |
| 7 | 0,1 | 0,38 | 1,25; 1,0 e 0,75 | 0,4 x 0,7 x 1,0 | outro | Magda <i>et al.</i> (2000) |
| 8 | 0,1 | 0,28 | 1,5 e 2,0 | 0,356 x 0,355 x 0,71 | outro | Ling <i>et al.</i> (2003) |
| 9 | 0,2 (1/2 diâmetro) | 0,9 | - | 1 x 1 x 2 | outro | Foray <i>et al.</i> (2006) |

Tabela 4 - Características da agitação, a profundidade e a duração dos ensaios e a frequência de aquisição de dados nos ensaios com emissários.

| | h (m) | Agitação | | | | Duração do ensaio e frequência de aquisição | Referência bibliográfica |
|---|--------------------------------------|-----------------|-------|---------------------|--------------------|---|--|
| | | Ondas regulares | | Ondas irregulares | | | |
| | | H (cm) | T (s) | H _s (cm) | T _p (s) | | |
| 1 | 0,42 | 6,6 - 16,6 | 1,6 | 11,3 | 2,3 | 20 min (+ 30 a 40 min nalguns casos) | Sumer <i>et al.</i> (1999) |
| 2 | 0,42 | 9,1-16,6 | 1,6 | - | - | 20 min, faq=20 Hz | Sumer <i>et al.</i> (2006 a) |
| 3 | 0,42 | 17 | 1,6 | - | - | - | Sumer <i>et al.</i> (2006 b) |
| 4 | 0,105<h<0,245 | - | - | - | - | - | Hajikandi <i>et al.</i> (2010) |
| 5 | 1,22 no batedor (0,61 sobre a caixa) | 15,24 | 2,9 | - | - | - | Foda <i>et al.</i> (1988) |
| 6 | 0,75 no batedor (0,45 sobre a caixa) | 0,05 - 0,22 | 1,25 | - | - | 15 a 30 min, faq=20 Hz | Teh <i>et al.</i> (2003) Teh <i>et al.</i> (2006) |
| 7 | 0,6 | 40 | 1 | - | - | 25 a 53 min | Magda <i>et al.</i> (2000) |
| 8 | 0,3 | - | - | - | - | 60 e 20 s, faq=3 e 5 Hz | Ling <i>et al.</i> (2003) |
| 9 | - | - | - | - | - | - | Foray <i>et al.</i> (2006) |



Tabela 5 - Medições efetuadas e o equipamento utilizado nos ensaios com emissários.

| | Medições | | | Equipamento | Referência bibliográfica |
|---|--|------------------------|---|--|--|
| | Pressão no solo | Elevação da superfície | Outras | | |
| 1 | z= 0; 0,032; 0,052; 0,072; 0,121 e 0,165 m | SIM | deslocamento vertical da conduta (afundamento e flutuação) | transdutores de pressão, potenciometro, lazer doppler e (para medir o movimento do fundo "scouring" utilizam Delft - Hydraulics conductivity type concentration meter CCM) | Sumer <i>et al.</i> (1999) |
| 2 | z= 0,052; 0,072; 0,121 e 0,165 m, na zona da conduta e L/4 da caixa (z=0 na interface solo- | SIM | deslocamento vertical da conduta, pressão no topo superior e inferior da conduta | sensores de pressão, sondas, video | Sumer <i>et al.</i> (2006 a) |
| 3 | z= 0,055; 0,075; 0,125 e 0,17 m (z=0 na interface solo-água) | - | - | sensores de pressão, video | Sumer <i>et al.</i> (2006 b) |
| 4 | - | - | profundidade de erosão (Ds) | - | Hajikandi <i>et al.</i> (2010) |
| 5 | 6 transdutores de pressão colocados num 1/4 da secção do tubo | SIM | pressão da água na conduta e deslocamento vertical e horizontal da conduta | 6 transdutores de pressão, 2 sondas de medição das características da agitação e 2 transformadores diferenciais (LVDT) para medir os deslocamentos verticais e horizontais da conduta | Foda <i>et al.</i> (1988) |
| 6 | z=-0,015;0,045; 0,090; 0,135 e 0,235 m (z=0 na interface solo-água) | SIM | velocidades, deslomoento da conduta | sensores de pressão, video, sondas e ADV | Teh <i>et al.</i> (2003) Teh <i>et al.</i> (2006) |
| 7 | z= 0,025; 0,05 e 0,075m em tubos com diferentes tipos de gravidade Gp= 0,5; 0,7; 0,9; 1,0 e 1,5. | SIM | força de sustentação (Fp) e deslocamento vertical da conduta | - | Magda <i>et al.</i> (2000) |
| 8 | z= 0,025, 0,05; 0,1; 0,15; 0,20 e 0,30 m | SIM | pressão na conduta, deslocamento vertical da conduta | transdutores de pressão, LVDT e acelerómetros | Ling <i>et al.</i> (2003) |
| 9 | - | - | pressão na interface conduta-solo e no solo , deslocamentos horizontais cíclicos e penetração vertical da conduta | 5 transdutores de pressão (colocados dentro da conduta na superfície em contacto com o solo); para alguns testes também foram instalados transdutores de pressão no solo perto da conduta; video | Foray <i>et al.</i> (2006) |

De forma resumida, os ensaios realizados cobriram uma gama de valores de diferentes parâmetros adimensionais, que se apresenta na Tabela 6. Nesta Tabela, L é o comprimento de onda e da altura da caixa onde o solo é colocado.

Tabela 6 - Gama de valores dos parâmetros adimensionais nos ensaios com emissários.

| Parâmetros adimensionais | Sumer <i>et al.</i> (1999) | | Sumer <i>et al.</i> (2006a) | | Sumer <i>et al.</i> (2006b) | Teh <i>et al.</i> (2003, 2006) | Foda <i>et al.</i> (1988) |
|---------------------------|----------------------------|----------|-----------------------------|----------|-----------------------------|--------------------------------|---------------------------|
| | | | | | | | |
| Re | 7,17E+05 | 1,80E+06 | 1,98E+06 | 3,61E+06 | 9,23E+05 | 1,08E+04 | 6,52E+06 |
| nº de Keulengan-Carpenter | 716,9 | 1803,1 | 494,2 | 901,6 | 3693,1 | 2,4 | 458,7 |
| h/L | 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,21 | 0,09 |
| H/L | 2,29 | 5,75 | 3,15 | 5,75 | 5,89 | 0,02 | 2,26 |
| d50/L | 1,56E-05 | 1,56E-05 | 1,56E-05 | 1,56E-05 | 2,70E-05 | 1,56E-05 | 4,45E-05 |
| H/D | 165,0 | 415,0 | 113,8 | 207,5 | 840,0 | 0,7 | 75,1 |
| d/L | 0,06 | 0,06 | 0,06 | 0,06 | 0,06 | 0,14 | 0,09 |



Estes trabalhos centraram-se no estudo da alteração do comportamento do solo sujeito a liquefação devido à agitação e nos mecanismos de liquefação do solo quando existe uma estrutura, neste caso, um cilindro. Nalguns destes trabalhos é estudada a alteração do comportamento da estrutura quando assente ou afundada num solo sujeito a liquefação devida a ondas. Em apenas um dos estudos (Teh *et al.*, 2006) é proposta uma alteração ao método de dimensionamento de emissários para ter em conta a possibilidade de ocorrer liquefação do solo, com base em ensaios com apenas um tipo de solo.

No entanto, não se encontrou na literatura estudos sobre ajustes ao projeto ou novas peças que permitam garantir a estabilidade de emissários submarinos localizados em zonas sujeitas a liquefação de solo.



4.2 Considerações Preliminares Sobre o Caso Português

4.2.1 Legislação Portuguesa

Não existe em Portugal normativa própria relativa a obras marítimas. Assim, no projeto de obras marítimas é normalmente utilizada normativa de outros países, tais como o *Coastal Engineering Manual* da U. S. Army Corps of Engineering (2006), ou as *Recomendaciones de Obras Marítimas* do organismo espanhol Puertos del Estado (2002).

No que se refere a recomendações relativas à construção de estruturas em solos coesivos ou nas atuações no solo de forma a aumentar a sua resistência, também não existe regulamentação específica, exceto no que se refere a dragagens.

A legislação portuguesa atual relacionada com dragagens define as regras que se devem seguir durante e depois da extração de inertes e os requisitos específicos para o depósito do material dragado (Decreto Lei Nº 226-A/2007 de 31 de maio) e detalha a classificação deste material segundo o grau de contaminação, Tabela 7 (Portaria Nº 1450/2007, de 12 de novembro).

Tabela 7 - Classificação do material segundo o grau de contaminação: metais (mg/kg), composto orgânico (ug/kg).

| Parâmetro | Classe 1 | Classe 2 | Classe 3 | Classe 4 | Classe 5 |
|-----------------------------|----------|-------------|---------------|----------------|----------|
| Metais: | | | | | |
| Arsénio | < 20 | 20 – 50 | 50 – 100 | 100 – 500 | > 500 |
| Cádmio | < 1 | 1 – 3 | 3 – 5 | 5 – 10 | > 10 |
| Crómio | < 50 | 50 – 100 | 100 – 400 | 400 – 1 000 | > 1 000 |
| Cobre | < 35 | 35 – 150 | 150 – 300 | 300 – 500 | > 500 |
| Mercurio | < 0,5 | 0,5 – 1,5 | 1,5 – 3,0 | 3,0 – 10 | > 10 |
| Chumbo | < 50 | 50 – 150 | 150 – 500 | 500 – 1 000 | > 1 000 |
| Níquel | < 30 | 30 – 75 | 75 – 125 | 125 – 250 | > 250 |
| Zinco | < 100 | 100 – 600 | 600 – 1 500 | 1 500 – 5 000 | > 5 000 |
| Compostos orgânicos: | | | | | |
| PCB (soma) | < 5 | 5 – 25 | 25 – 100 | 100 – 300 | > 300 |
| PAH (soma) | < 300 | 300 – 2 000 | 2 000 – 6 000 | 6 000 – 20 000 | > 20 000 |
| HCB | < 0,5 | 0,5 – 2,5 | 2,5 – 10 | 10 – 50 | > 50 |

O material dragado classifica-se, segundo o grau de contaminação, em cinco classes, cada uma com requisitos específicos para o seu depósito, definidos no anexo III da portaria do seguinte modo:

- Classe 1: Material dragado limpo – pode ser depositado em meio aquático ou repostado em locais sujeitos a erosão ou utilizado para alimentação das praias sem normas restritivas;
- Classe 2: Material dragado com contaminação vestigiária – pode ser imerso no meio aquático tendo em atenção as características do meio recetor e o uso legítimo do mesmo;
- Classe 3: Material dragado ligeiramente contaminado – pode ser utilizado para terraplenos ou no caso de imersão necessita de estudo aprofundado do local de deposição e monitorização posterior do mesmo;



- Classe 4: Material dragado contaminado – deposição em terra, em local impermeabilizado, com a recomendação de posterior cobertura de solos impermeáveis;
- Classe 5: Material muito contaminado – idealmente não deverá ser dragado e em caso imperativo, deverão os dragados ser encaminhados para tratamento prévio e/ou deposição em aterro de resíduos devidamente autorizado, sendo proibida a sua imersão.

Em Portugal os projetos das obras marítimas, dependendo do tipo do projeto, da localização, da dimensão ou da natureza (Decreto-lei nº 197/2005 de 8 de novembro e Decreto-lei nº 69/2000 de 3 de maio), podem ser, ou não, objeto de estudos de avaliação de impacte ambiental (AIA) e de estudos de impacte ambiental (EIA).

Deste modo, o projeto deve ter em conta o quadro legislativo da gestão de águas superficiais, a Lei da Água (Lei nº58/2005 de 29 de dezembro), a qual assegura a transposição da Diretiva nº2000/60/CE, do Parlamento Europeu e do Conselho, de 23 de outubro. Dever-se-á igualmente ter em consideração a gestão da qualidade das águas balneares, estabelecida na Diretiva nº2006/7/CE, do Parlamento Europeu e do Conselho, de 15 de fevereiro. No Decreto-lei nº103/2010, de 24 de setembro, são estabelecidas as normas de qualidade ambiental para as substâncias prioritárias e para outros poluentes.



4.2.2 Caracterização de solos existentes no estuário do Tejo

Para efetuar uma caracterização preliminar de solos com pouca resistência existentes no estuário do Tejo, procurou-se na bibliografia estudos que tenham sido realizados anteriormente, aquando da execução de obras no estuário. Um estudo interessante é de Correia (2004), onde são apresentados os resultados de um estudo geotécnico realizado para a elaboração do projeto da travessia do rio Tejo, pela auto-estrada A10 ao longo do alinhamento da ponte do Carregado. Apresentam-se em seguida as principais características do solo aí descritas.

Este estudo incluiu um conjunto de 20 ensaios de penetração estática CPT, 1580 ensaios SPT em 49 sondagens, ensaios laboratoriais em 72 amostras. Neste estudo foi analisada a planície aluvionar do Tejo, que assenta sobre formações miocénicas, num traçado com uma extensão de 11650 m.

As possanças aluvionares identificadas atingem espessuras de 40 a 50 m. Na Figura 8 apresentam-se as distribuições granulométricas dos materiais estudados em 3 zonas e a ligação entre os índices de plasticidade (IP) e as percentagens de material passado no peneiro com abertura 0,074 mm.

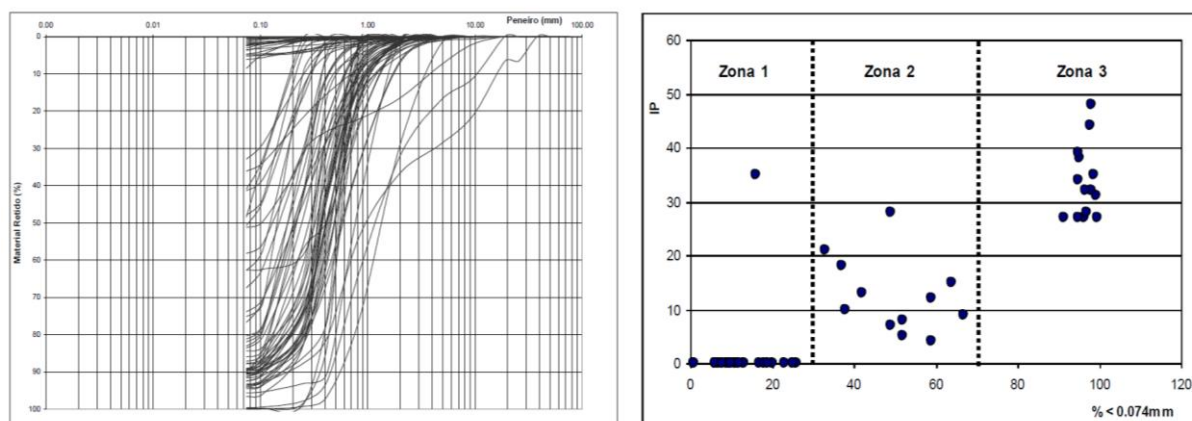


Figura 8 - Composições granulométricas (esq.) e relação do IP com a percentagem de finos (dir.), Correia (2004).

A área de estudo foi dividida em três zonas e a análise da Figura 8, permite concluir o seguinte:

- Zona 1* - Areias e areias cascalhentas, com percentagens de finos até 30%, em que os finos são tipicamente não plásticos;
- Zona 2* - Areias lodosas e siltes areno-lodosos, com percentagens de finos entre 30 e 70%, com índices de plasticidade compreendidos entre 5 e 25%;
- Zona 3* - Lodos, com percentagem de finos e índices de plasticidade elevados.



Na Figura 9 apresentam-se os resultados dos ensaios CPT5A e S22A, num horizonte entre os 25 e os 30 m de profundidade. O solo foi classificado como areia fina lodosa, tendo 20% de finos, com índices de comportamento (I_c) maiores que 2,6, situando-se no domínio das argilas com alguma ingerência na zona de solos orgânicos.

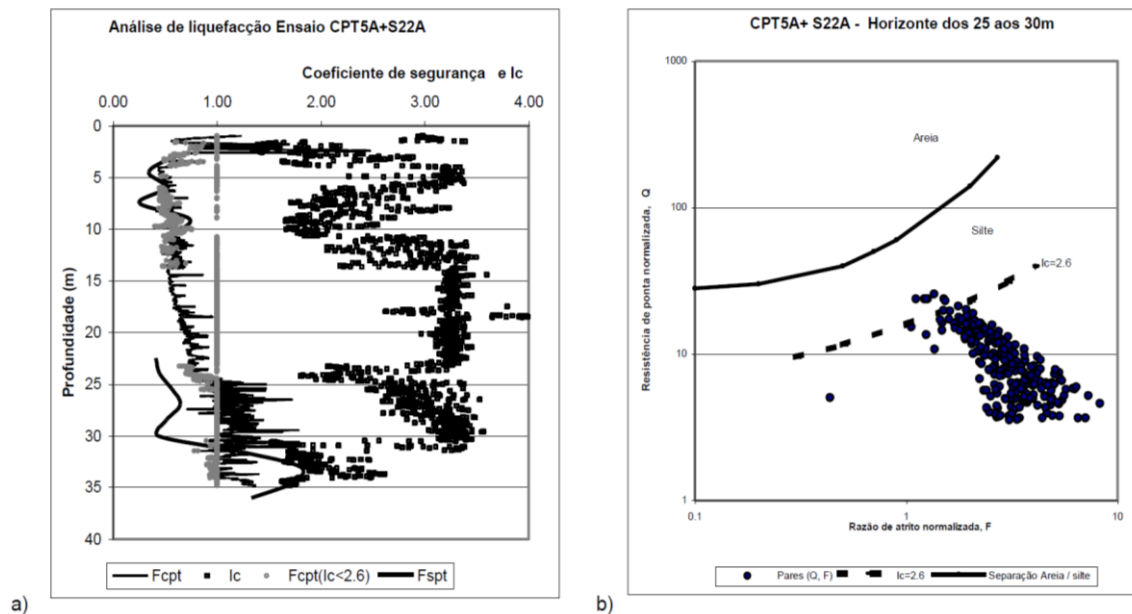


Figura 9 - Ensaio CPT5+S22A. a) Coeficientes de segurança e I_c b) Classificação do horizonte entre os 25 e os 30 m de profundidade, Correia (2004).

Noutro troço do ensaio CPT8 e S32A, num horizonte entre os 4 e os 7 m de profundidade, o solo foi classificado como lodo silto-arenoso, verificando-se a partir do ensaio CPT que se trata de um modo dominante de um horizonte arenoso, tendo apenas alguma expressão as componentes siltosa e argilosa, como se pode observar na Figura 10.

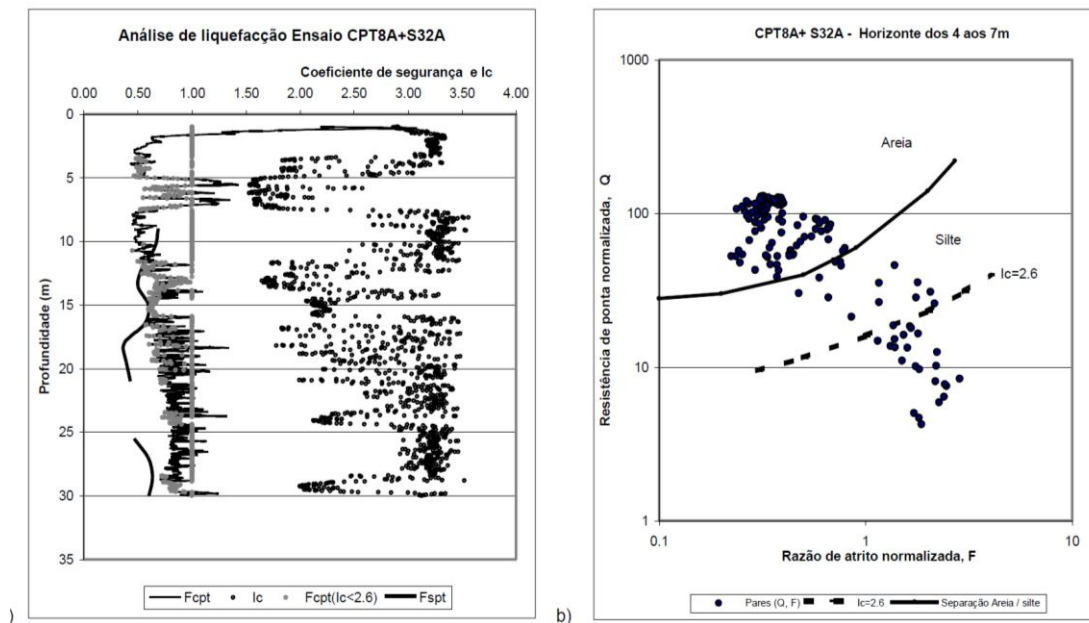


Figura 10 - Ensaio CPT8+S32A. a) Coeficientes de segurança e Ic b) Classificação do horizonte entre os 4 e os 7 m de profundidade, Correia (2004).

A partir do ensaio CPT foi selecionado um sub-trecho com 2500 m (kms 7+500 e 10+000) e foi realizado um zonamento tendo por base 3 zonas distintas em termos de liquefação, como apresentado na Figura 11.

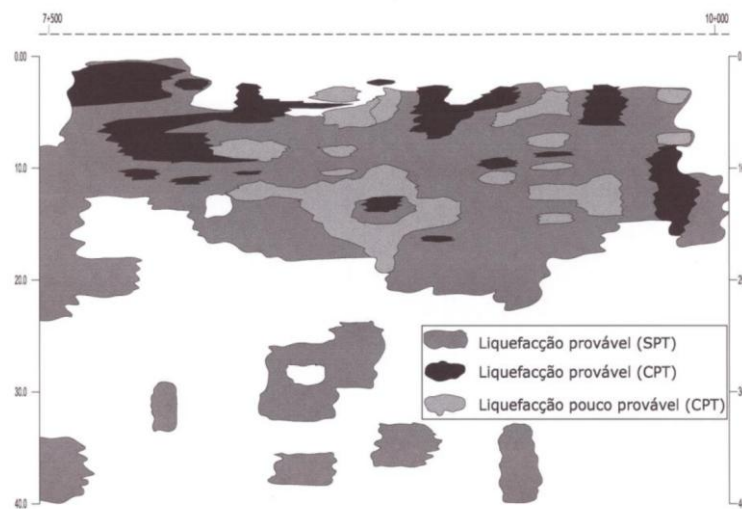


Figura 11 - Zonamento do potencial de liquefação, Correia (2004).

A observação da figura anterior permite concluir que este sub-trecho é problemático do ponto de vista da ocorrência da liquefação.

4.2.3 Casos de estudo de estruturas marítimas fundadas no estuário do Tejo

Para ilustrar a experiência portuguesa no projeto de estruturas marítimas fundadas em solos com pouca resistência, apresentam-se dois casos de estudo de obras localizadas na margem direita do rio Tejo, fundadas em solos compostos por areia e lodo com problemas de resistência e deformabilidade. As duas obras correspondem a plataformas portuárias, mas diferem no tipo de solução adotada para a melhoria da capacidade resistente do solo, ilustrando assim duas diferentes soluções. Para cada uma delas descreve-se o objetivo da obra, o tipo de solo e a solução preconizada.

4.2.3.1 Caso 1: Projeto de uma plataforma portuária utilizando colunas de brita

- **Objetivo:** criar uma plataforma portuária com uma área de aproximadamente 43000 m².
- **Caracterização do solo:**

Através de uma campanha de prospeção geotécnica, a qual apresenta a seguinte caracterização, da unidade mais recente para a mais antiga, do ponto de vista litoestratigráfico:

“Depósitos de aluvionares: O complexo aluvionar é constituído quase exclusivamente por sedimentos finos, silto-argilosos com carácter lodoso, com espessuras que variam sensivelmente entre os 10 m e os 22 m. Os horizontes lodosos correspondem a valores SPT de 0 a 1 pancadas.

Complexo Miocénico: O Miocénico constitui o firme da formação aluvionar. É formado essencialmente por solos arenosos muito finos, compactos a muito compactos.”

Os aterros apresentam uma altura máxima de cerca de 7,7 m e irão assentar nas formações lodosas existentes.

- **Atuação preconizada:**

Para melhorar os parâmetros mecânicos do solo, preconizou-se a execução de duas soluções distintas, definidas em função dos diferentes níveis de exigências operacionais estabelecidos pelo Dono da Obra:

1. Zona com aproximadamente 11000 m², prevê-se uma utilização mais exigente, pelo que se requerem assentamentos reduzidos durante a fase de exploração: tratamento da camada de solo compressível com recurso à realização de **colunas de brita** (Figura 12) com 1,0 m de diâmetro, com alturas variáveis entre 13 e 22 m, executadas segundo uma malha de distribuição com 2,5 m de lado.
2. Restante zona, não são impostos quaisquer condicionalismos no que respeita aos assentamentos, pelo que este não foi um fator condicionante na escolha da solução construtiva a desenvolver. Para acelerar o processo de consolidação da camada de solo compressível, previu-se o tratamento do solo



com drenos verticais (Figura 13). Os geodrenos têm alturas com cerca de 22 m, segundo uma malha de distribuição com 1,5 m.

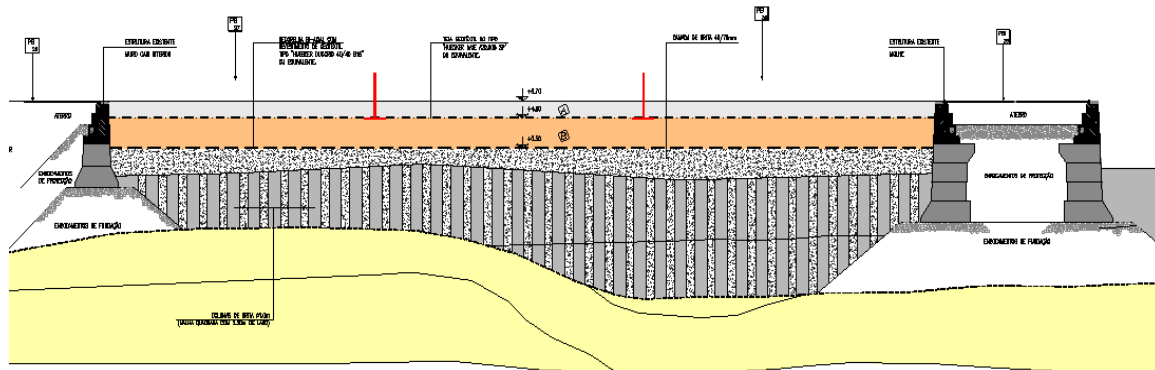


Figura 12 - Colunas de brita - Perfil tipo.

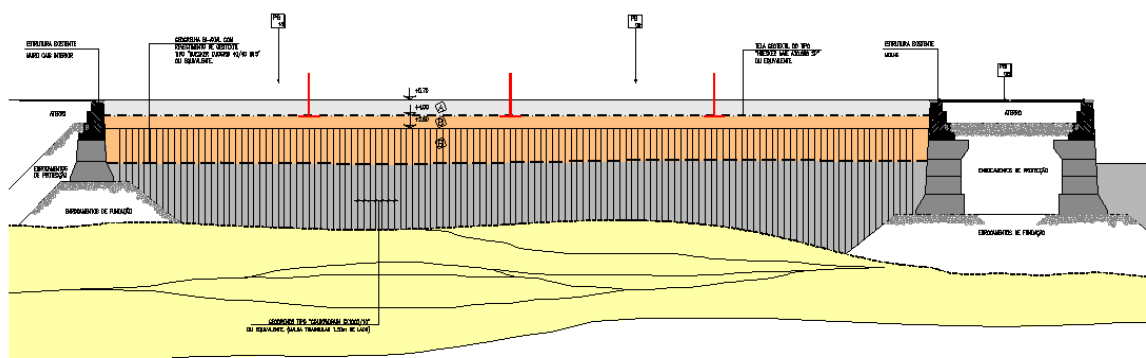


Figura 13 - Drenos verticais - Perfil tipo.

4.2.3.2 Caso 2: Projeto de uma plataforma portuária utilizando *jet-grouting*

- **Objetivo:** criar uma plataforma portuária com uma área de aproximadamente 16000 m².
- **Caracterização do solo:**

Através de uma campanha de prospeção geotécnica, a qual apresenta a seguinte caracterização, da unidade mais recente para a mais antiga, do ponto de vista litoestratigráfico:

“Depósitos de aluvionares: constituídos quase exclusivamente por lodos, apresentando algumas intercalações areno-lodosas, especialmente no interior da doca. A generalidade das sondagens realizadas detetaram, na parte inferior do complexo, uma zona areno-lodosa com conchas, seixos e calhau calcário provenientes da erosão das camadas Miocénicas.



Complexo Miocénico: consiste essencialmente em extratos calcários fossilíferos-gresosos, alternando com camadas argilosas. As bancadas calcárias podem atingir espessuras da ordem dos 4 m. As camadas gresosas (areolas) são constituídas por areias finas, micáceas, argilosas, alternando com camadas de argila, raramente isentas de areias.”

- **Atuação preconizada:**

Execução das colunas de *jet-grouting* com diâmetro de 1,2 e 1,5 m, com alturas entre 6 e 24 m e uma malha de distribuição desfasada de 8,0 x 8,0 m², encastradas ao nível dos materiais aluvionares arenosos, existentes na transição com o substrato Miocénico (Figura 14).

A área da intervenção encontra-se confinada entre os muros cais. No tardo do muro localizam-se, a pequena distância, antigos armazéns portuários, uma conduta de água e um poço de ventilação. A solução construtiva teve em consideração minimizar o impacto no normal funcionamento de todas as estruturas e infraestruturas durante e após a conclusão dos trabalhos.

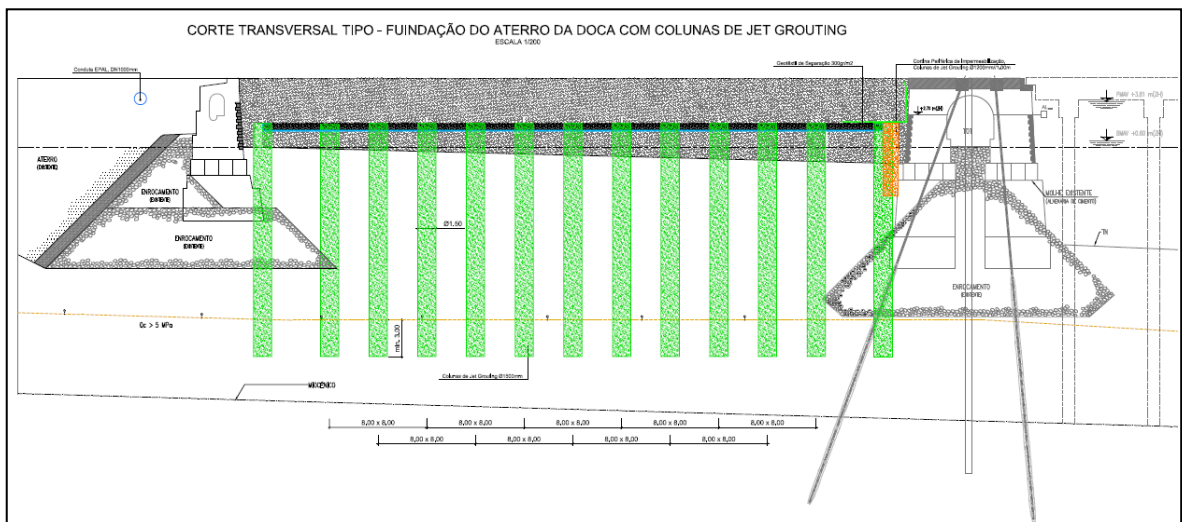


Figura 14 - Colunas de *jet-grouting* - Perfil tipo.

5 PLANO DE ENSAIOS A REALIZAR NO ÂMBITO DO PROJETO AREDIS

5.1 Ensaaios a Realizar

Os ensaios que se pretendem realizar no canal de ondas da UNAM incluem:

- E1: Ensaaios de agitação com solo lodoso;
- E2: Ensaaios de agitação de um quebra-mar assente em solo lodoso;
- E3: Ensaaios de agitação de um emissário submarino em solo lodoso.

Cada um dos três tipos de ensaios (E1 a E3) será realizado com três tipos diferentes de material de fundo (M1 a M3, ver Tabela 8). Os ensaios de quebra-mares contemplam diferentes tipos de estruturas: quebra-mar de talude, quebra-mar misto e quebra-mar misto com berma. No caso de quebra-mar misto serão realizados ensaios com e sem geotextil sobre o solo. Nos ensaios com emissário, contemplam-se emissários apoiados no fundo e emissários enterrados, podendo estes últimos estar ou não envoltos em brita e geotêxtil. Assim, os ensaios a realizar perfazem um total de 24, tal como se apresenta na Tabela 8. Este relatório descreve apenas os ensaios relativos a emissários, que é a estrutura alvo deste projeto.

Tabela 8 - Plano de ensaios a realizar.

| Nº de ensaio | Material | Tipo de ensaio | Tipo de estrutura | Geotextil |
|--------------|----------|----------------|--------------------------------------|-----------|
| 1 | M1 | E1 | - | - |
| 2 | M2 | E1 | - | - |
| 3 | M3 | E1 | - | - |
| 4 | M1 | E2 | Misto | não |
| 5 | M1 | E2 | Misto | sim |
| 6 | M1 | E2 | Misto com berma | - |
| 7 | M1 | E2 | Talude | - |
| 8 | M2 | E2 | Misto | não |
| 9 | M2 | E2 | Misto | sim |
| 10 | M2 | E2 | Misto com berma | - |
| 11 | M2 | E2 | Talude | - |
| 12 | M3 | E2 | Misto | não |
| 13 | M3 | E2 | Misto | sim |
| 14 | M3 | E2 | Misto com berma | - |
| 15 | M3 | E2 | Talude | - |
| 16 | M1 | E3 | Emissário apoiado | - |
| 17 | M1 | E3 | Emissário enterrado | - |
| 18 | M1 | E3 | Emissário enterrado envolto em brita | sim |
| 19 | M2 | E3 | Emissário apoiado | - |
| 20 | M2 | E3 | Emissário enterrado | - |
| 21 | M2 | E3 | Emissário enterrado envolto em brita | sim |
| 22 | M3 | E3 | Emissário apoiado | - |
| 23 | M3 | E3 | Emissário enterrado | - |
| 24 | M3 | E3 | Emissário enterrado envolto em brita | sim |



5.2 Material

Como se referiu no ponto anterior, em primeiro lugar irão ser realizados ensaios para estudar o efeito da agitação no comportamento de solos lodosos.

O material a utilizar foi objeto de estudo realizado pela UNAM, testando várias misturas de betonite e caulinite com areia. Com base nos resultados desse estudo e por razões de carácter geotécnico, optou-se por realizar ensaios com uma mistura de caulinite e areia. Esta mistura mostrou ter boa plasticidade e apresentou valores de alguns parâmetros analisados similares aos das argilas de vários locais em estudo, tais como do México (Tuxpan) e de Espanha (Barcelona).

Na Tabela 9 e nas Figuras 15, 16 e 17 apresentam-se os resultados laboratoriais do solo utilizado para três misturas de caulinite.

Tabela 9 - Características do solo com mistura de areia e caulinite.

| Mistura | Caulinite (%) | Areia (%) | Limite Líquido (%) | Limite Plástico (%) | Índice Plástico (%) | Linha A | Linha U |
|---------|---------------|-----------|--------------------|---------------------|---------------------|---------|---------|
| 1 | 85,0 | 15 | 38,00 | 29,36 | 8,64 | 13,14 | 27,00 |
| 2 | 70,0 | 30 | 32,85 | 21,95 | 10,90 | 9,38 | 22,37 |
| 3 | 60,0 | 40 | 26,00 | 21,29 | 4,71 | 4,38 | 16,20 |

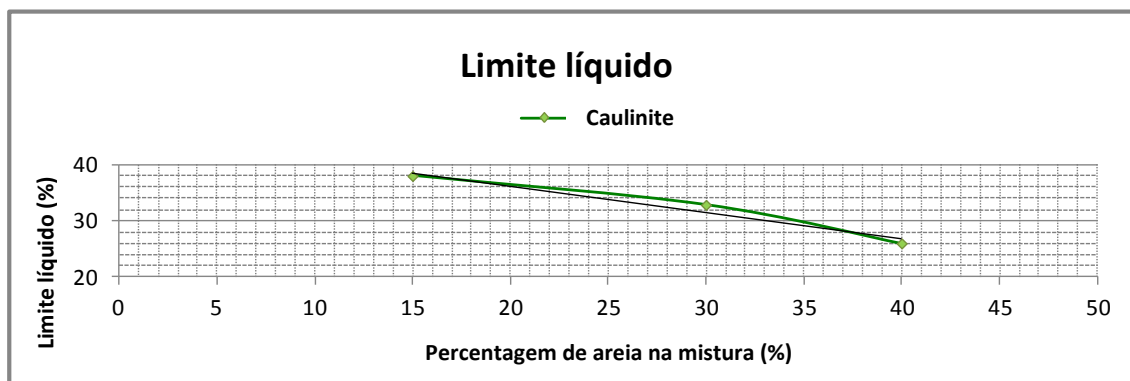


Figura 15 - Limite líquido do solo com mistura de areia e caulinite.



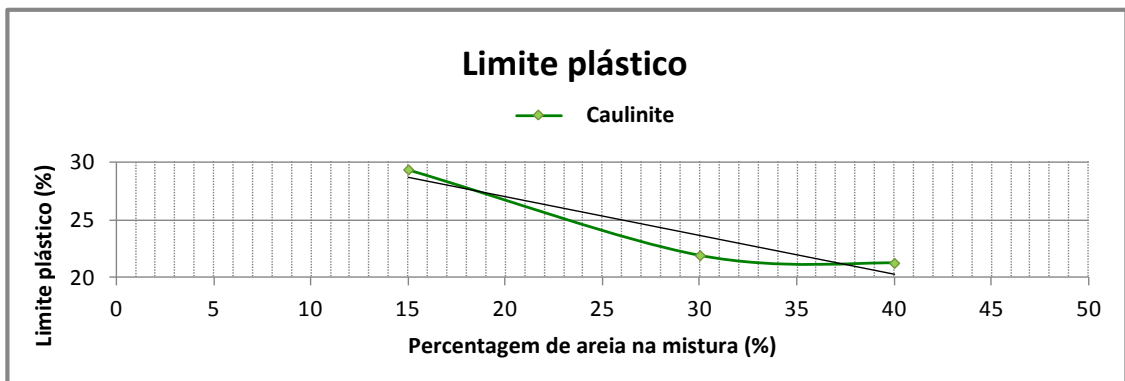


Figura 16 - Limite plástico do solo com mistura de areia e caulinite.

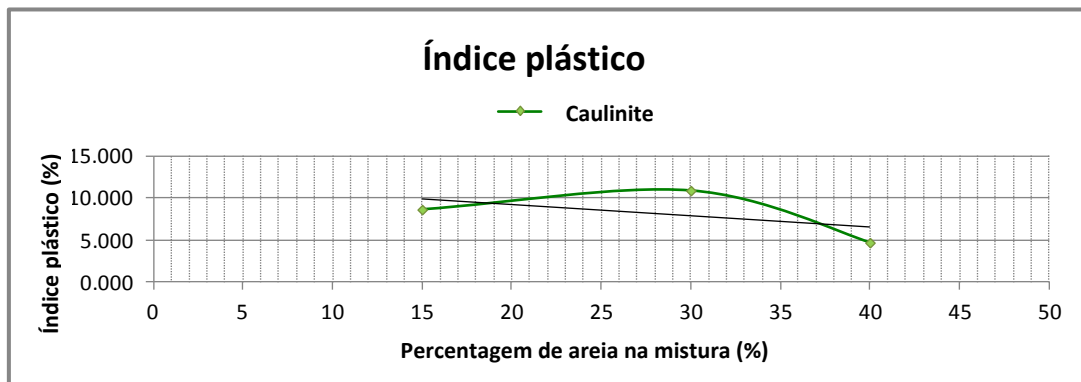


Figura 17 - Índice plástico do solo com mistura de areia e caulinite.

Assim, os três tipos de solo a utilizar nos ensaios correspondem a diferentes proporções de areia e caulinite:

1. M1: Só areia
2. M2: Areia 85% e caulinite 15%
3. M3: Areia 60% e caulinite 40%

Para todos os ensaios, será colocada, no canal de ondas da UNAM, uma bandeja de 20 cm de altura, 30,7 cm de largura e 90 cm de comprimento, que será preenchida com o material correspondente (M1, M2 e M3). Os ensaios serão realizados com 30 cm de água (Figura 18).

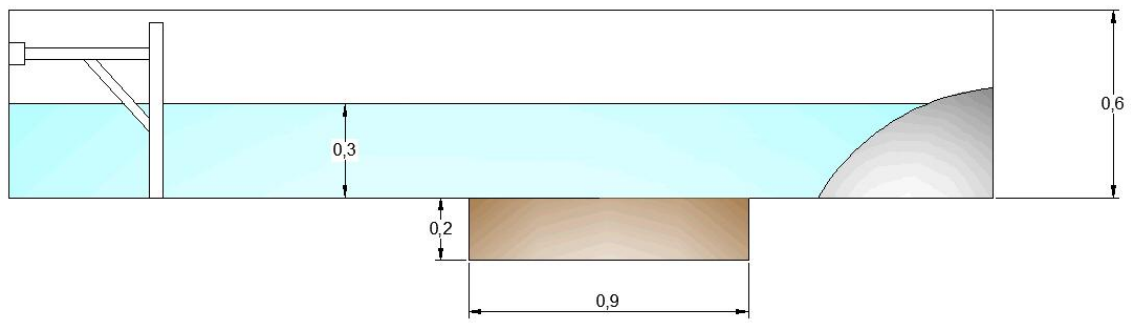


Figura 18 - Seção tipo da bandeja para os ensaios E1.

5.3 Emissário

Os ensaios com emissários serão realizados colocando a estrutura apoiada sobre o solo colocado na bandeja, tal como se apresenta na Figura 19, e com o emissário colocado no interior do solo, ou seja, enterrado. O emissário será representado por uma tubagem de PVC de 30 cm de diâmetro exterior. A tubagem será apenas apoiada e não fixa às paredes para que se possa mover sobre o efeito da agitação e das alterações do solo ao longo dos ensaios. Serão ainda realizados ensaios com a tubagem envolta em brita, que por sua vez é revestida por uma camada de goetextil. Cada uma das soluções será ensaiada com o emissário apoiado no solo e no interior deste (totalmente enterrada). Caso o tempo o permita, serão ainda realizados ensaios com a tubagem apoiada no solo com dois anéis de afundamento (*concrete weight*) (ensaios não contemplados na Tabela 8).

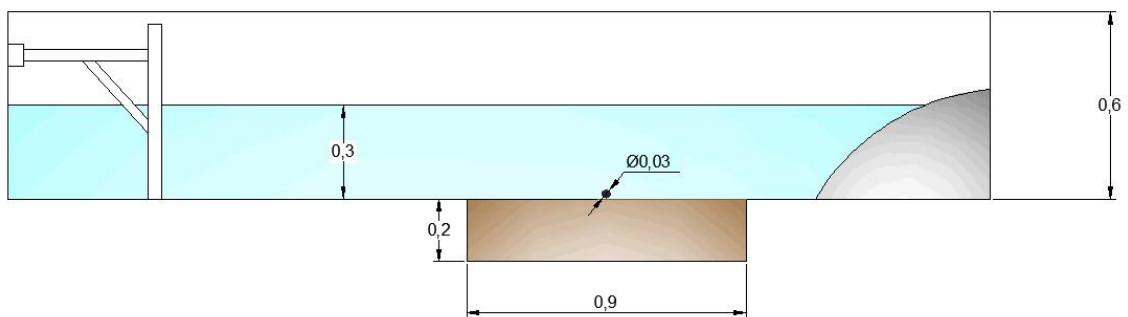


Figura 19 - Seção tipo para os ensaios E3.

5.4 Canal de Ondas da UNAM

Os ensaios serão realizados no novo canal de ondas da UNAM, com 22 metros de comprimento, 0,40 metros de largura e 0,60 metros de altura (Figura 20). 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 ou velocímetros laser.

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 20 - Canal de ondas da UNAM.

5.5 Instrumentação

As variáveis que se pretendem medir nos ensaios a realizar deverão tornar possível avaliar a velocidade das partículas na água e nas camadas de argila, a correspondente pressão dinâmica e os perfis de tensão tangencial. Com base nestes dados, será possível obter ainda o coeficiente de atenuação da agitação.

Para tal, está previsto utilizarem-se os seguintes instrumentos nos ensaios E1 a E3:

- 12 sensores de pressão a colocar: três sensores a 22,5, 45,0 e 67,5 cm do início da bandeja, alinhados no eixo central da mesma. Em cada alinhamento serão colocados 4 sensores a diferentes profundidades: na base da bandeja, a 6,6 cm, a 13,3 cm e na superfície superior da argila. Para os ensaios E3 (tubagem apoiada ou enterrada no solo, como ou sem brita e geotextil) serão colocados 4 sensores numa secção da tubagem distando 90° entre si (na parte superior, inferior, à frente e a trás).
- 11 sensores de nível a colocar: três sensores antes da bandeja, colocados a distâncias adequadas para se poder separar corretamente a onda incidente da refletida, um no ponto de início da bandeja, três sobre a bandeja (em 22,5, 45,0 e 67,5 cm), um no final da bandeja e três atrás da bandeja, de novo separados de uma distância adequada para a aplicação de métodos de separação de onda incidente e refletida.

As Figuras 21 e 22 mostram a posição dos sensores no canal.

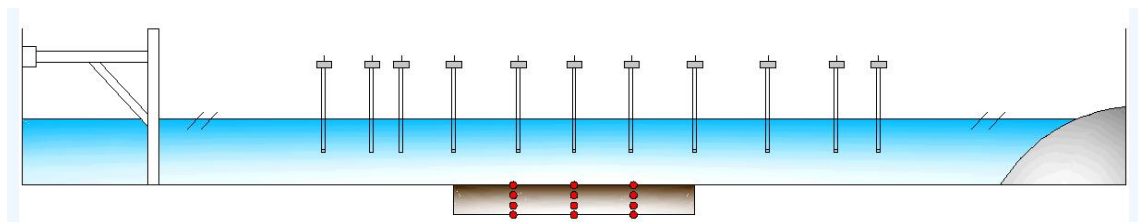


Figura 21 - Colocação dos sensores nos ensaios

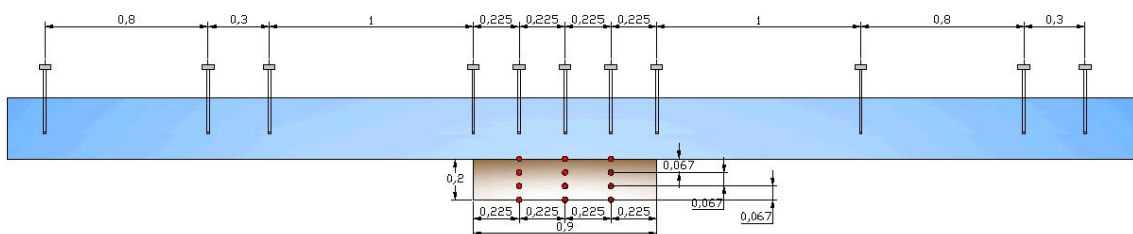


Figura 22 - Posição dos sensores no canal (cotas em metros).

Os instrumentos do laboratório da UNAM têm as seguintes características:

1. Sensores de nível: o laboratório conta com onze 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 23).

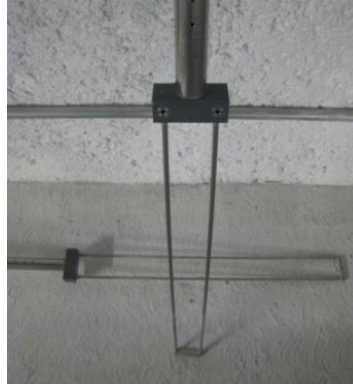


Figura 23 - Fotografia dos sensores de nível da UNAM.

2. Sensores de pressão: o laboratório possui 30 sensores de pressão com uma capacidade de resposta rápida, que permite medir variações de pressão geradas nos perfis provocados pelos impactos da agitação (Figura 24).



Figura 24 - Fotografia dos sensores de pressão da UNAM.

O estudo será complementado com a aquisição de vídeo de alta velocidade e medição de velocidade do escoamento.

No caso da tubagem, seria interessante dispor de medições de força na tubagem. Uma das formas possíveis de medir seria utilizando sensores de força (dinamómetros). No entanto, não foi prevista a utilização deste equipamento.

Os movimentos da tubagem serão obtidos através das imagens de vídeo ou de outra instrumentação que se considere oportuna.



5.6 Condições de Agitação a Ensaiar

O canal de ondas da UNAM, onde se irão realizar os ensaios, tem uma altura de 0,60 metros e a profundidade da argila na bandeja é de 0,20 m (ver Figura 18). A profundidade de água no canal será mantida constante e igual a 0,30 m, sendo os ensaios realizados em condições de profundidades intermédias.

Os ensaios serão realizados para valores de alturas de onda e de períodos semelhantes aos utilizados em ensaios anteriores na Universidade de Granada (UGR), a fim de se poder comparar os resultados dos ensaios com fundo impermeável e com fundo de solo lodoso. As características dos estados de mar a ensaiar são as que se apresentam nas Tabelas 10 (agitação regular) e 11 (agitação irregular). Para agitação regular a duração dos ensaios será a necessária para obter um registro útil de cinquenta ondas. As condições de agitação irregular são geradas considerando-se um espectro do tipo Jonswap, com uma altura de onda significativa, H_s , e um período de pico, T_p . A duração dos ensaios será a necessária para obter um registro útil de duzentas ondas.

Antes destes ensaios serão realizados ensaios preliminares para um valor constante de período da onda de 1,2 s.

Tabela 10 - Estados de mar para 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 | |



Tabela 11 - Estados de mar para agitação irregular.

| T_p (s) | H_s (m) | Duração (mm:ss) |
|-----------|-----------|-----------------|
| 1,05 | 0,08 | 03:30 |
| | 0,10 | |
| 1,25 | 0,08 | 04:20 |
| | 0,10 | |
| 1,50 | 0,08 | 05:10 |
| | 0,10 | |
| 1,75 | 0,08 | 06:00 |
| | 0,10 | |
| 2,00 | 0,08 | 06:50 |
| | 0,10 | |
| 2,25 | 0,08 | 07:30 |
| | 0,10 | |
| 2,50 | 0,08 | 08:30 |
| | 0,10 | |
| 2,75 | 0,08 | 09:10 |
| | 0,10 | |
| 3,00 | 0,08 | 10:10 |
| | 0,10 | |

Caso seja possível, para o estudo de emissários, serão realizados alguns ensaios adicionais com tubagem, com valores de alturas de onda e de períodos semelhantes aos utilizados em ensaios anteriores pela equipa da UGR e LNEC para o caso de tubagem assente no fundo, a fim de se poder comparar os resultados dos ensaios com fundo impermeável e com fundo de solo lodoso. As características dos estados de mar a ensaiar são as que se apresentam na Tabela 12.

Tabela 12 - Estados de mar para agitação nos ensaios adicionais com tubagem.

| Agitação | H/H_s (m) | T/T_p (s) | Duração (mm:ss) |
|-----------|-------------|-------------|-----------------|
| Regular | 0,11 | 1,35 | 1:30 |
| | 0,13 | | |
| | 0,15 | | |
| | 0,17 | | |
| Irregular | 0,11 | 1,35 | 04:30 |
| Bimodal | 0,11 | 1,35+1,01 | 04:30 |



5.7 Metodologia de Trabalho

A metodologia de trabalho que se propõe seguir nos ensaios consiste, em primeiro lugar, na realização de um conjunto de ensaios preliminares com o fim de compreender o comportamento do lodo no canal de ondas e avançar no trabalho experimental com lodo. Uma vez realizados estes ensaios preliminares, segue-se o programa de ensaios planeado e apresentado na Tabela 8.

5.7.1 Ensaios preliminares

Os ensaios preliminares serão realizados sem qualquer estrutura, apenas com a bandeja preparada para o efeito preenchida com cada um dos três materiais referidos, M1, M2 e M3.

Os ensaios iniciar-se-ão com períodos e alturas de onda que permitam a comparação dos resultados com trabalhos anteriormente descritos na literatura. Assim, seguindo o trabalho de Lindenberg *et al.* (1989) (ver secção 4.1.6), propõe-se a seguinte metodologia de trabalho:

1. Colocar o sedimento 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. Aumentar a altura de onda e mantê-la durante outras 3 horas.
4. Finalizada a Fase 1, deixar consolidar 24 horas.
5. Uma vez consolidado, repetir as condições de agitação da Fase 1.

As alturas de onda a reproduzir são as que constam da Tabela 13.

Tabela 13 - Condições de agitação dos ensaios das Fases 1 e 2.

| Período (s) | Altura de onda (m) | Tempo de ensaio (mm:ss) |
|-------------|--------------------|-------------------------|
| 1,2 | 0,04 | 04:30 |
| 1,2 | 0,06 | 04:30 |

Os períodos de consolidação e a Fase 2 só são realizados quando se ensaiar material lodoso (M2 e M3).



5.7.2 Ensaios planeados

Os ensaios planeados (numerados de 1 a 24, ver Tabela 8), seguem a seguinte metodologia de trabalho:

1. Construção do modelo seguindo as seções tipo de cada ensaio.
2. Deixar consolidar durante 3 dias para os materiais M2 e M3.
3. Fazer uma fotografia de perfil e 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 estado de mar (altura de onda e período) gerado, fotografar em planta e em perfil o modelo.
7. Ao finalizar todos os estados de mar regulares e irregulares, reconstruir completamente o modelo a fim de evitar consolidações provenientes de ensaios anteriores.



5.8 Comparação entre os Ensaios Planeados e os Referidos na Literatura

Nas Tabelas 14 a 17 apresenta-se um resumo das características dos ensaios disponíveis na literatura e dos ensaios a realizar no âmbito do projeto AREDIS. Como se pode observar, embora os ensaios planeados tenham valores de alguns parâmetros fora da gama de valores dos ensaios já realizados, quando se comparam os valores dos parâmetros adimensionais, verifica-se que os ensaios planeados se encontram na gama de valores já ensaiados, o que permite comparar resultados e validar comportamentos do solo e da estrutura.

Tabela 14 - Características do solo, da caixa onde é colocado o solo lodoso e da conduta nos ensaios com emissários e nos novos ensaios a realizar.


| | Solo | | | Caixa onde o solo é colocado | | Conduta  | | |
|------------|--|-------------------------|----------------------|--------------------------------------|---|---|-------------------------------|---|
| | Tipo de solo | Peso específico (kN/m³) | d ₅₀ (mm) | distância à fronteira de entrada (m) | Dimensão (m) largura x altura x comprimento | Diâmetro da conduta, D (m) | Comprimento da conduta, L (m) | Posição da conduta em relação ao fundo, e/D |
| Literatura | 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 | 0,02-0,2 | 0,28 a 2,44 | 0 a 7,25 |
| Canal UNAM | areia, areia+caulinite (85%-15% e 60%-40%) | * | * | * | 0,31x0,20x0,90 | 0,03 | 0,28 | 0 e 1,75 |

Tabela 15 - Características do canal, profundidade características da agitação nos ensaios com emissários e nos novos ensaios a realizar.

| | Canal | | h (m) | Agitação | | | |
|------------|---|-------------------|-----------|-----------------|----------|---------------------|--------------------|
| | Dimensão (m) largura x altura x comprimento | Tipo de canal | | Ondas regulares | | Ondas irregulares | |
| | | | | H (cm) | T (s) | H _s (cm) | T _p (s) |
| Literatura | 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 |
| Canal UNAM | 0,4x0,6x22 | Ondas | 0,1-0,4 | 4-17 | 1,01-3,0 | 8-17 | 1,01-3,0 |

Tabela 16 - Medições e equipamento utilizado nos ensaios com emissários e nos novos ensaios a realizar.

| | Medições | | | Equipamento |
|------------|---------------------------------|------------------------|--|---|
| | Pressão no solo | Elevação da superfície | Outras | |
| Literatura | 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 video |
| Canal UNAM | 0; 0,133; 0,066; 0,2 | SIM | - | transdutores de pressão, sondas, ADV, câmara video |



Tabela 17 - Valores dos parâmetros adimensionais nos ensaios com emissários e nos novos ensaios a realizar.

| Parâmetros adimensionais | Sumer <i>et al.</i> (1999) | | Sumer <i>et al.</i> (2006a) | | Sumer <i>et al.</i> (2006b) | Teh <i>et al.</i> (2003, 2006) | Foda <i>et al.</i> (1988) | UNAM |
|--------------------------|----------------------------|----------|-----------------------------|----------|-----------------------------|--------------------------------|---------------------------|----------|
| | Re | 7,17E+05 | 1,80E+06 | 1,98E+06 | 3,61E+06 | 9,23E+05 | 1,08E+04 | 6,52E+06 |
| nº de Keulegan-Carpenter | 716,9 | 1803,1 | 494,2 | 901,6 | 3693,1 | 2,4 | 458,7 | 15,9 |
| h/L | 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,21 | 0,09 | 0,15 |
| H/L | 2,29 | 5,75 | 3,15 | 5,75 | 5,89 | 0,02 | 2,26 | 0,05 |
| d50/L | 1,56E-05 | 1,56E-05 | 1,56E-05 | 1,56E-05 | 2,70E-05 | 1,56E-05 | 4,45E-05 | 3,16E-05 |
| H/D | 165,0 | 415,0 | 113,8 | 207,5 | 840,0 | 0,7 | 75,1 | 3,7 |
| d/L | 0,06 | 0,06 | 0,06 | 0,06 | 0,06 | 0,14 | 0,09 | 0,10 |



6 RELEVÂNCIA DO PROJETO

O consórcio WW / LNEC acredita que a pertinência do projeto terá um elevado impacto na capacidade de sustentação das suas atividades nos mercados internacionais e dos países que integram a Comunidade de Países de Língua Portuguesa (CPLP), significando um incremento de competitividade e uma oportunidade de desenvolvimento do segmento do mercado onde se inserem as suas atividades, nomeadamente a engenharia costeira e portuária.

O mérito do projeto é claro, pela sua relevância, não apenas para a WW e para os parceiros que integram este projeto, mas também de forma mais abrangente, para o sector, que beneficiará com os desenvolvimentos científicos da investigação, para o que contribuirá a participação do Laboratório Nacional de Engenharia Civil, que reforçará a divulgação dos estudos realizados nos meios académicos, científico e empresarial.

A possibilidade de complementar o deficiente conhecimento existente e desenvolver recomendações para o projeto das obras marítimas, nomeadamente dos quebra-mares e dos emissários submarinos fundados em terrenos lodosos, traduz-se indubitavelmente num potencial de aplicação e transferência do conhecimento e técnicas resultantes, cujo impacto se espera significativo na afirmação da WW e do LNEC no seu sector de atividade e tem um evidente valor científico e tecnológico para o país.

A WW e o LNEC têm uma elevada experiência no âmbito da engenharia costeira e portuária e em termos científicos. Os contributos dos restantes parceiros (ALEPH, UNAM, PROES e UGR), irão certamente conferir sustentabilidade aos resultados, na medida em que potenciarão o processo de incorporação de conhecimento.

A grande experiência e qualidade reconhecida da WW, promotor do projeto, no dimensionamento, fiscalização e inspeção de obras marítimas abrangem uma ampla gama de estruturas e de terrenos de fundação. O LNEC tem um vasto “know-how” e larga experiência na área da modelação física e da análise de resultados de ensaios e sua interpretação. Assim, a complementaridade da experiência de cada uma destas instituições, juntamente com os parceiros estrangeiros, conferem ao consórcio as condições adequadas ao bom desenvolvimento do projeto.

Obviamente que a WW e o LNEC pretendem que os resultados se traduzam em aumento de rentabilidade e volume de negócios nos mercados internacionais, potenciado pela estratégia de divulgação de resultados a qual será implementada pelo LNEC, garantindo desta forma a visibilidade dos projetos e a correta disseminação dos resultados.

Resumindo, as vantagens que se preveem com a elaboração do projeto são:

- Aumento global do volume de negócios e da rentabilidade.
- Melhoria do posicionamento no mercado, relativamente aos serviços atualmente prestados, pelo esforço estruturado e contínuo na aquisição de conhecimento.



- Incremento das competências técnicas e do conhecimento científico gerado internamente.
- Aquisição de conhecimentos determinantes no segmento de mercado em que atuam.
- Capacidade de resposta mais célere às exigências e oportunidades do mercado, permitindo aproveitar novas oportunidades que sejam detetadas.



7 BIBLIOGRAFIA

Chan, A.H.C. (1995). *User Manual for DIANA-SWANDYNE II*. Department of Civil Engineering, University of Birmingham, UK.

Correia, Jorge (2004). O Ensaio CPT na Avaliação do Potencial de Liquefacção. O Caso da Nova Ponte Sobre o Tejo na A10, Proc. do 9º Congresso de Goetecnia, 20-23 Abril 2004, Aveiro, 10 páginas.

Damgaard, J.S., Sumer, B.M., Teh, T.C., Palmer, A.C., Foray, P. & Osorio, D. (2006). Guidelines for Pipeline On-Bottom Stability on Liquefied Noncohesive Seabeds. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 132, SPECIAL ISSUE: Liquefaction Around Marine Structures. Processes and Benchmark Cases, pp. 300–309. doi: 10.1061/(ASCE)0733-950X(2006)132:4(300).

de Groot, M.B., Bolton, M.D., Foray, P., Meijers, P., Palmer, A.C., Sandven, R., Sawicki, A. & The, T.C. (2006). Physics of Liquefaction Phenomena around Marine Structures. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 132, SPECIAL ISSUE: Liquefaction Around Marine Structures. Processes and Benchmark Cases, pp. 227–243. doi: 10.1061/(ASCE)0733-950X(2006)132:4(227).

de Wit, P.J. & Kranenburg, C. (1997). The Wave-Induced Liquefaction of Cohesive Sediment Beds. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 45, pp. 261-271.

Dunn, S.L., Vun, P.L., Chan, A.H.C. & Damgaard, J.S. (2006). Numerical Modeling of Wave-Induced Liquefaction around Pipelines. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 132, SPECIAL ISSUE: Liquefaction Around Marine Structures. Processes and Benchmark Cases, pp. 276–288. doi: 10.1061/(ASCE)0733-950X(2006)132:4(276).

Feng, J. (1992). Laboratory experiments on cohesive soil bed fluidization by water waves. PhD Thesis. University of Florida.

Foda, M. A., Law, A. W-K. & Chang, J. Y-H (1988) Wave-induced breakout of half-buried marine pipes. Proc. Of the International Twenty-first Coastal Engineering Conference, June 20-25, Malaga, Spain, pp- 1464-1481.

Foray, P., Bonjean, D., Michallet, H. & Mory, M. (2006). Fluid-Soil-Structure Interaction in Liquefaction around a Cyclically Moving Cylinder. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 132, SPECIAL ISSUE: Liquefaction Around Marine Structures. Processes and Benchmark Cases, pp. 289–299. doi: 10.1061/(ASCE)0733-950X(2006)132:4(289).

Hajikandi, H., Alami, N. & Behzadnia, I. (2010). Experimental modeling clear water scour at submarine pipelines in different uniformly graded sediments, Proceedings on the third international conference on the application of physical modelling to port and coastal protection, COASTLAB 2010.



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 Nº. 5, pp. 127-137.

Ling, H. I., Mohri, Y., Kawabata, T., Liu, H., Burke, C. & Sun, L. (2003). Centrifugal Modeling of Seismic Behavior of Large-Diameter Pipe in Liquefiable Soil. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 129, No. 12, December 1, 2003.

Maa, P.-Y. & Mehta, A.J. (1987). Mud Erosion by Waves: A Laboratory Study. *Continental Shelf Research*, 7, pp. 1269-1284.

Magda, W., Maeno, S. & Nago, H. (2000). Floatation of Buried Submarine Pipeline under Cyclic Loading of Water Pressure -Numerical and Experimental Studies-. *Journal of the Faculty of Environmental Science and Technology, Okayama University*, Vol 5, No.1. pp. 8198.

Mendonça, A., Losada, M.A., Reis, M.T., Neves, M.G., Figueira, P. & Afonso, C. (2011). Incorporação da Avaliação Probabilística de Riscos e de Métodos de Optimização no Projecto de Emissários Submarinos. *Proc. 7ªs Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária*, Porto, 6 a 7 de outubro de 2011, Delegação Portuguesa da PIANC.

Puertos del Estado (2002). ROM 0.0. *General Procedure and Requirements in the Design of Harbor and Maritime Structures. Part I: Recommendations for Maritime Structures*. Ministerio de Fomento, Puertos del Estado, Spain.

Robillard, D. J. (2009). A laboratory investigation of mud seabed thickness contributing to wave attenuation. PhD Thesis. University of Florida

Soltanpour, M., Samsami, F. & Sorourian, S. (2010). Wave-flume experiments of dissipating wave on soft mud. *Proceedings of the 32nd International Conference on Coastal Engineering*. Shanghai, China.

Sumer, B. M., Fredsoe, J., Christensen, S. & Lind, M. T. (1999). Sinking/floatation of pipelines and other objects in liquefied soil under waves, *Coastal Engineering* 38, 53-90.

Sumer, B.M. (2008). Coastal and Offshore Scour/Erosion Issues – Recent Advances. *Proc. 4th International Conference on Scour and Erosion*, November 5-7, Tokyo, Japan, pp. 85-94.

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).

Sumer, B., Truelsen, C. & Fredsøe, J. (2006 a). Liquefaction around Pipelines under Waves. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 132, SPECIAL ISSUE: Liquefaction Around Marine Structures. Processes and Benchmark Cases, pp. 266–275. doi: 10.1061/(ASCE)0733-950X(2006)132:4(266).



Sumer, B., Hatipoglu, F., Fredsøe, J. & Hansen, N. (2006 b). Critical Flotation Density of Pipelines in Soils Liquefied by Waves and Density of Liquefied Soils. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 132, SPECIAL ISSUE: Liquefaction Around Marine Structures. Processes and Benchmark Cases, pp. 252–265. doi: 10.1061/(ASCE)0733-950X(2006)132:4(252).

Teh, T., Palmer, A., Bolton, M. & Damgaard, J. (2006). Stability of Submarine Pipelines on Liquefied Seabeds. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 132, SPECIAL ISSUE: Liquefaction Around Marine Structures. Processes and Benchmark Cases, pp. 244–251. doi: 10.1061/(ASCE)0733-950X(2006)132:4(244).

Teh, T.C., Palmer, A.C. & Damgaard, J.S. (2003). Experimental Study of Marine Pipelines on Unstable and Liquefied Seabed. *Coastal Engineering*, 50(1-2), pp. 1–17.

U. S. ARMY CORPS OF ENGINEERS (2006). *Coastal Engineering Manual*. Research Center. Department of the Army. Waterways Experiment Station, Corps of Engineers (6 volumes).

Zhao, Z.-D., Lian, J.-J. & Shi, J.Z. (2006). Interactions among Waves, Current and Mud: Numerical and Laboratory Studies. *Advances in Water Resources*, 29(11), pp. 1731-1744.



ANEXO





**INSTITUTO
DE INGENIERÍA
UNAM**

Ciudad Universitaria a 11 de abril de 2013

Dra. M. Graça Neves

Por este medio deseo informarle que, debido a diversas fallas en el sistema de generación de oleaje de las instalaciones de la Universidad Nacional Autónoma de México, atribuibles exclusivamente al fabricante del equipo, el inicio de los ensayos con suelo fangosos programados dentro del marco del proyecto AREDIS ha sufrido un retraso de casi 5 meses.

Afortunadamente el problema con el equipo ha sido resuelto y el canal de oleaje se encuentra en fase de verificación, a su vez, el modelo de suelo fino está en sus últimas fases de construcción, por lo que en breve estaremos en capacidad de arrancar formalmente las pruebas experimentales.

Por lo antes expuesto, la reunión de trabajo que se tenía contemplado llevar a cabo en el mes de febrero del presente ha tenido que ser pospuesta y la fecha tentativa para realizarla ahora es el mes de junio de 2013.

Lamentamos los inconvenientes que esto le pueda provocar y aunque la falla estuvo del todo fuera de nuestras manos, estamos comprometidos a recuperar lo más posible el tiempo y las actividades que han sufrido afectación.

Esperamos sinceramente contar con su presencia en la nueva fecha programada para la reunión en la UNAM.

Reciba un cordial saludo

Atentamente,

Dr. Edgar G. Mendoza Baldwin

Responsable del Laboratorio de Costas y Puertos

Circuito Escolar, Ciudad Universitaria
Delegación Coyoacán, México 04510 D.F.
www.ii.unam.mx

