

ADAPTAÇÕES PARA REFORÇAR A ESTABILIDADE DE EMISSÁRIOS SUBMARINOS EM TERRENOS LODOSOS

Projeto nº 23027 - AREDIS

Relatório 1 - Estado da Arte

ÍNDICE DE TEXTO

1 APRESENTAÇÃO GERAL DO PROJETO.....	1
2 OBJETIVOS E METODOLOGIA DO TRABALHO.....	3
3 ESTADO DA ARTE.....	5
3.1 Considerações gerais.....	5
3.2 Solos com pouca resistência.....	6
3.3 Parâmetros de caracterização dos solos.....	8
3.4 Modos de falha de emissários submarinos.....	10
3.5 Processos construtivos.....	15
4 CONSIDERAÇÕES PRELIMINARES SOBRE O CASO PORTUGUÊS.....	19
4.1 Legislação portuguesa.....	19
4.2 Caracterização de solos existentes no estuário do Tejo.....	21
4.3 Casos de estudo de estruturas marítimas fundadas no estuário do Tejo.....	24
4.3.1 Caso 1: Projeto de uma plataforma portuária utilizando colunas de brita.....	24
4.3.2 Caso 2: Projeto de uma plataforma portuária utilizando “jet-grouting”.....	25
5 BIBLIOGRAFIA.....	27



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 – Técnicas de tratamento função das características do solo	16
Figura 2 – Exemplo da construção de colunas de brita	16
Figura 3 – Exemplo da construção de colunas de “Jet grouting”	17
Figura 4 – Exemplo de aplicação de drenos verticais.....	17
Figura 5 – Composições granulométricas (esq.) e relação do IP com a percentagem de finos (dir.), Correia (2004).....	21
Figura 6 – Ensaio CPT5+S22A. a) Coeficientes de segurança e Ic b) Classificação do horizonte entre os 25 e os 30 m de profundidade, Correia (2004)	22
Figura 7 – Ensaio CPT8+S32A. a) Coeficientes de segurança e Ic b) Classificação do horizonte entre os 4 e os 7 m de profundidade, Correia (2004)	23
Figura 8 – Zonamento do potencial de liquefação, Correia (2004)	23
Figura 9 – Colunas de brita - Perfil tipo	25
Figura 10 – Drenos verticais - Perfil tipo.....	25
Figura 11 – Colunas de “jet-grouting” - Perfil tipo.....	26

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Classificação do material segundo o grau de contaminação: metais (mg/kg), composto orgânico (ug/kg).....	19
--	----



1 APRESENTAÇÃO GERAL DO PROJETO

No âmbito do QREN - Quadro de Referência Estratégico Nacional, a equipa WW – Consultores de Hidráulica e Obras Marítimas, S.A. e 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 Emissários Submarinos 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 que já se encontra em desenvolvimento no âmbito do projeto IBEROEKA entre entidades espanholas (PROES – Consultores S.A. e Universidade de Granada) e mexicanas (ALEPH – Ingenieros Consultores, S.A. e Universidad Autónoma Nacional de México, UNAM) e que tem por título “Diseño de Adecuaciones para Rebotstucer la Estabilidad de Diques en Suelos Fangosos”.

O objetivo do presente estudo é alargar o conhecimento do projeto AREDIS Espanha e México no sentido de complementar esse estudo noutro tipo de infraestruturas marítimas: os emissários submarinos.

Em síntese, o projeto AREDIS Portugal procurará desenvolver técnicas para fazer face à problemática da construção de 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, propõe-se um programa experimental orientado para a compreensão dos processos de infraescavação e liquefação que podem constituir causas de assentamentos e falhas dos emissários submarinos, a ser realizado na UNAM.

Deste trabalho experimental pretende-se obter soluções práticas para o dimensionamento dos emissários submarinos sobre terrenos lodosos, especificamente focadas na fundação, na forma de assentamento das estruturas e, caso a investigação assim o indique, no desenvolvimento de tipos especiais de peças para colocar



na fundação e nas peças que servem 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.

Versão Preliminar



2 OBJETIVOS E METODOLOGIA DO TRABALHO

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

- OE.1. Analisar os 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 20 m de comprimento, 30 cm de largura e 60 cm de profundidade com as laterais e o fundo em vidro. Esta instalação é necessária para a realização do programa de ensaios.
- OE.2. Caracterização da interação entre uma 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 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 a respeito do projeto e construção de quebra-mares e emissários submarinos sobre fundos coesivos. 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 completamente novas 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 nenhuns que abordem a interação solo-estrutura-onda. Daí a pouca literatura disponível e a grande incerteza que existe relativamente a este respeito.

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

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

O fundo lodoso 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 e
- 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 dois grupos de sensores de nível; a deformação da estrutura será registada com equipamento topográfico de alta precisão; a variação temporal da infraescavação e da profundidade de liquefação serão seguidas através de equipamento acústico; e as velocidades da água em diferentes pontos ao longo de cada ensaio serão medidas com equipamento laser.



3 ESTADO DA ARTE

3.1 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 da arte no que se refere a estudos de interação solo-estrutura-onda. Desta forma, apresenta-se neste relatório a parte do estado da arte que foi assignada aos membros portugueses e que consta de:

- Legislação portuguesa aplicável a processos construtivos utilizados na construção de uma obra marítima fundada num solo com pouca resistência;
- 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;
- Processos construtivos utilizados hoje em dia em Portugal na construção de uma obra marítima fundada num solo lodoso;
- Casos de estudo que ilustram a experiência portuguesa no projeto de obras marítimas fundadas em solos compostos por areia e lodo 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.

Prevê-se que o estado da arte completo, onde consta a contribuição de todos os membros do projeto IBEROEKA, esteja finalizado até ao final do primeiro semestre de 2013, quando será enviado à Adi.



3.2 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 costeiras.

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 argilosos variam desde 1:1 até 1:5. 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 argilosos 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 o cravamento 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 costeiras 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 costeiras 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 costeira 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 tema.



3.3 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;
- Ensaios SPT *in situ*;
- Ensaios CPT;
- Limites de consistência de Atterberg (LL e LP);
- Ensaios triaxiais;
- Ensaios 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:

- Ensaios 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:

- Ensaio endométrico – parâmetros de consolidação e de compressibilidade;
- Ensaio estático de corte triaxial a diferentes taxas de deformação – parâmetros de compressibilidade elástica e plástica e sua evolução com o nível de deformação e parâmetros de resistência, para diferentes taxas de deformação;
- Ensaio 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.

Versão Preliminar



3.4 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 estrutural (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 (ROM 0.0, 2002) 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, queda de objetos, redes de pesca;
- 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, impacto de objetos em queda, redes de pesca;
- 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) alertam 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 no 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.

Versão Preliminar



3.5 Processos construtivos

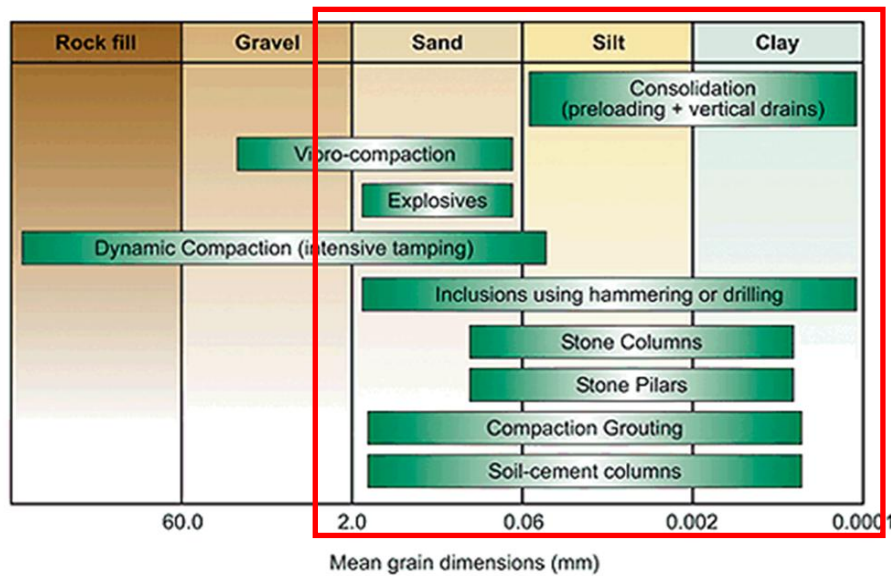
Apresenta-se neste sub-capítulo os principais processos construtivos utilizados hoje em dia na construção de uma obra marítima fundada num solo com pouca resistência, incluindo o seu custo, rendimento de execução e equipamento necessário. Estes dados são importantes para poder comparar as soluções que se venham a preconizar no âmbito deste projeto com as soluções disponíveis atualmente, quer em termos de custo, como 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 1 apresentam-se as técnicas de tratamento de solos marítimos e terrestres de acordo com as características do solo.



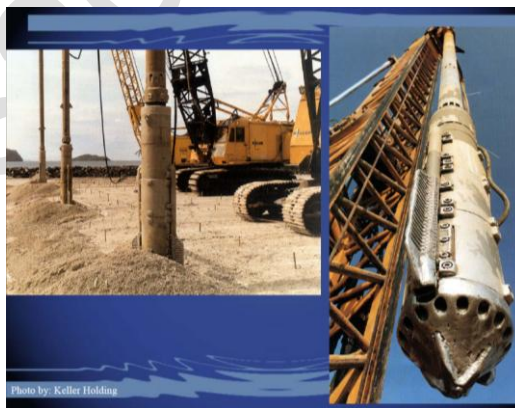


Fonte: http://www.bachy-soletanche.com/SBF/sitev4_uk.nsf/technique/soil-improvement.

Figura 1 – 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 2)
 - 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.

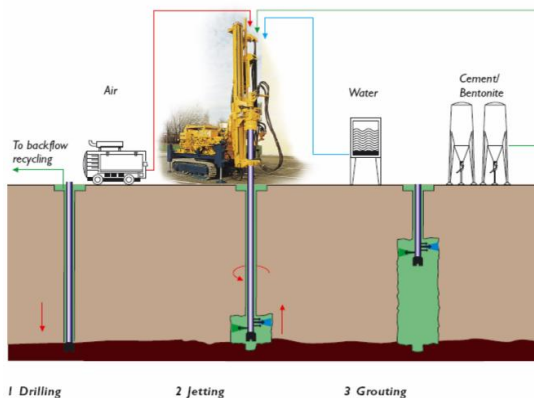


Fonte: Earthwork and Ground Technology Site Improvement. Presentation slide by College of Engineering, University of Washington.

Figura 2 – Exemplo da construção de colunas de brita.

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

- **Colunas de “jet-grouting”** (ver Figura 3)
 - 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.



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

Figura 3 – Exemplo da construção de colunas de “Jet grouting”.

- **Aplicação de drenos verticais** (ver Figura 4)
 - 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 4 – Exemplo de aplicação de drenos verticais.

- **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 CONSIDERAÇÕES PRELIMINARES SOBRE O CASO PORTUGUÊS

4.1 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 1 (Portaria Nº 1450/2007, de 12 de novembro).

Tabela 1 - 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	6000 – 20000	> 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 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 o 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. Descreve-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 5 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.

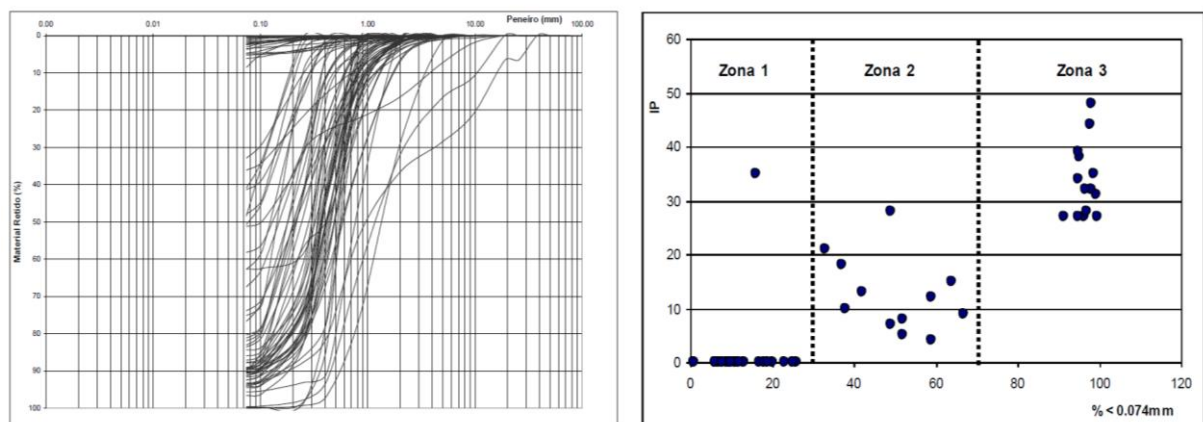


Figura 5 – Composições granulométricas (esq.) e relação do IP com a percentagem de finos (dir.), Correia (2004).

A área de estudo foi dividida em três zonas e a análise da Figura 1, 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 6 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.

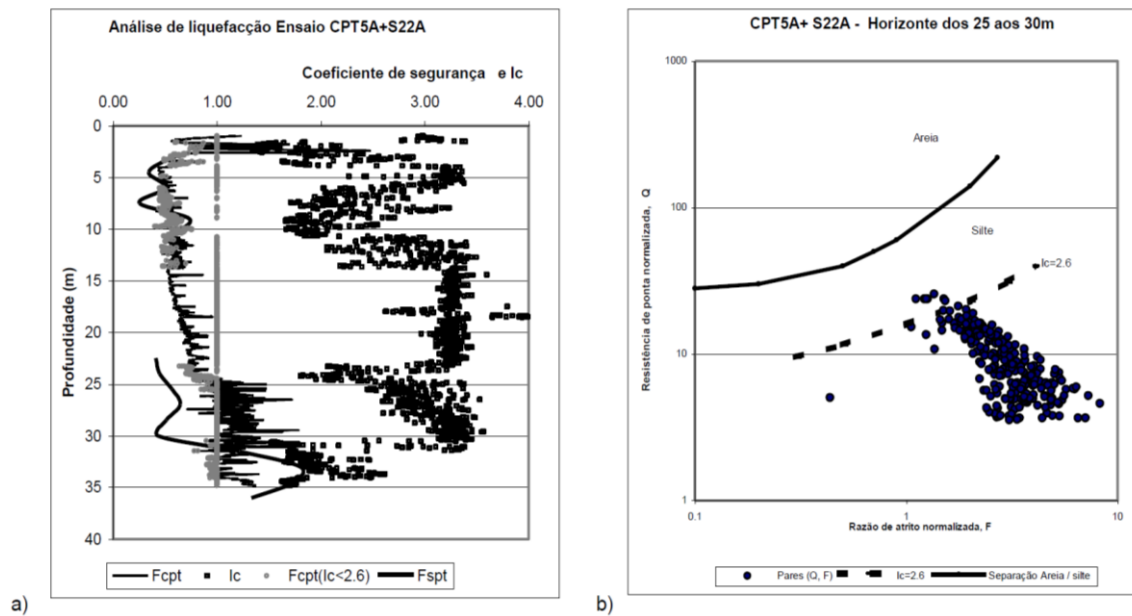


Figura 6 – Ensaio CPT5+S22A. a) Coeficientes de segurança e I_c b) Classificação do horizonte entre os 25 e os 30 m de profundidade, Correia (2004).

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 7.

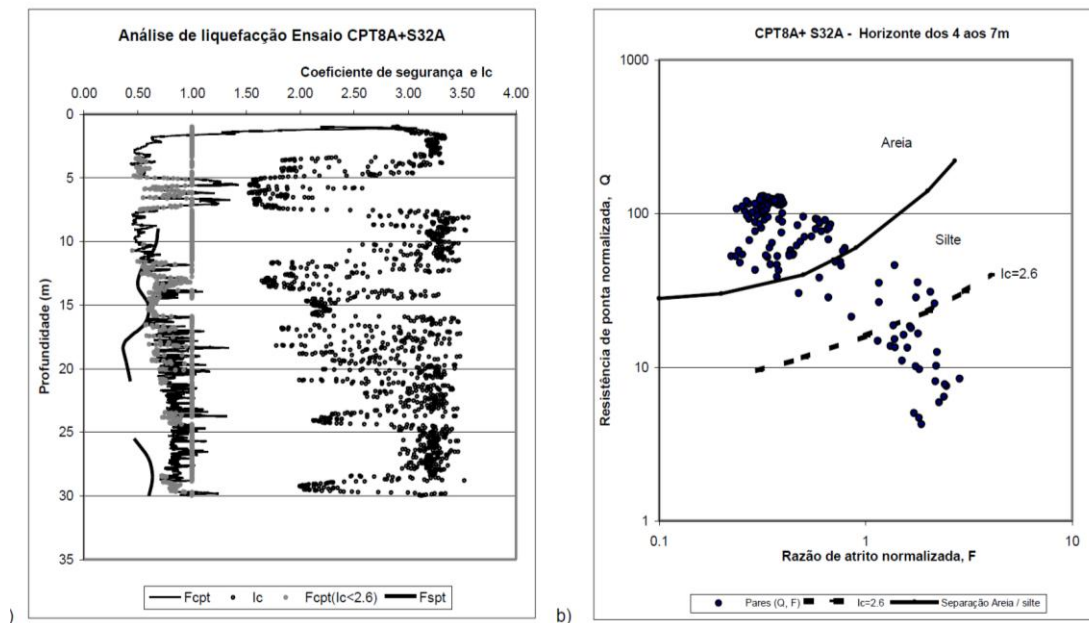


Figura 7 – Ensaio CPT8+S32A. a) Coeficientes de segurança e I_c b) Classificação do horizonte entre os 4 e os 7 m de profundidade, Correia (2004).

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 8.

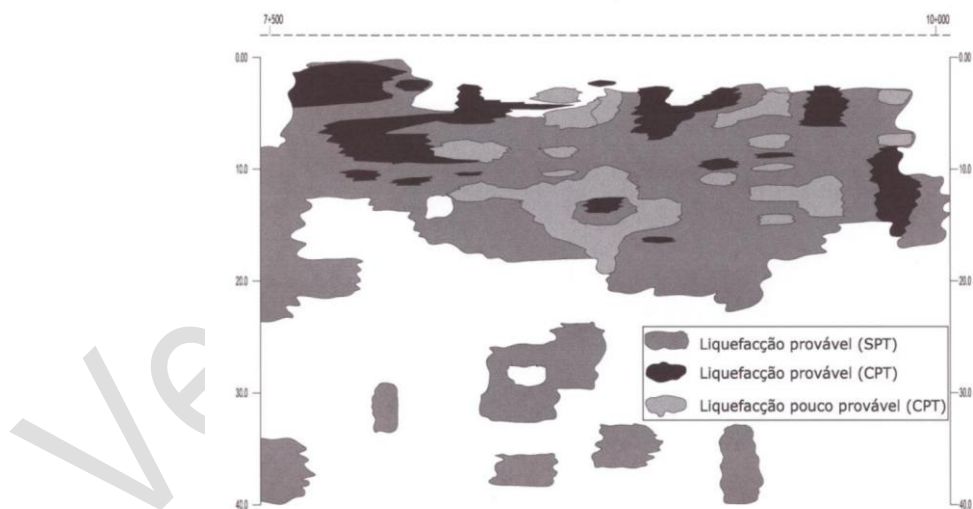


Figura 8 – Zonamento do potencial de liquefação, Correia (2004).

A observação da Figura 8 permite concluir que este sub-trecho é problemático do ponto de vista da ocorrência da liquefação.

4.3 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.

4.3.1 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 9) 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 10). Os geodrenos têm alturas com cerca de 22 m, segundo uma malha de distribuição com 1.5 m.

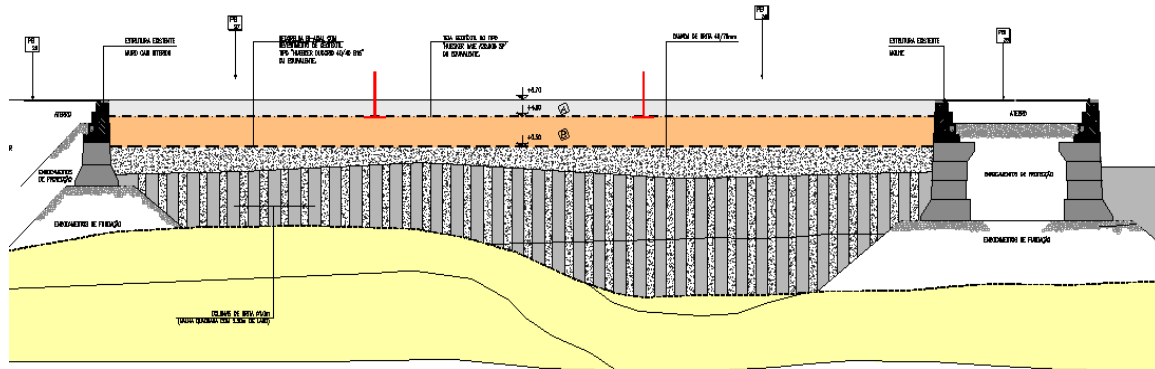


Figura 9 – Colunas de brita - Perfil tipo.

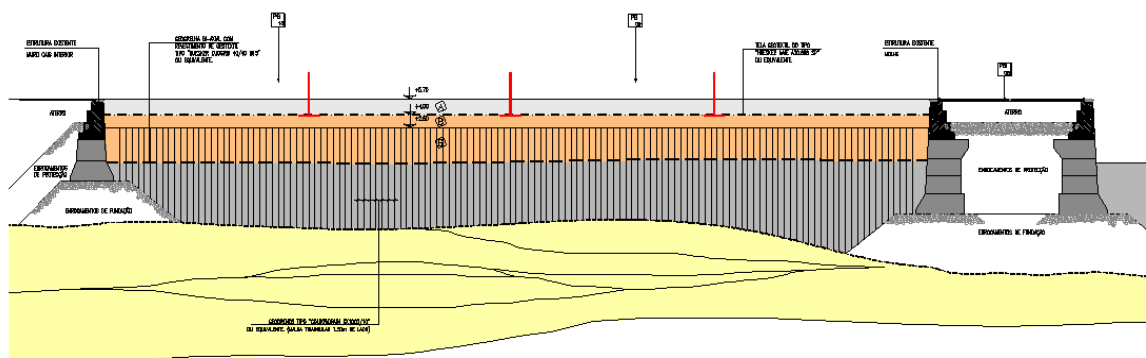


Figura 10 – Drenos verticais - Perfil tipo.

4.3.2 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 11).

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.

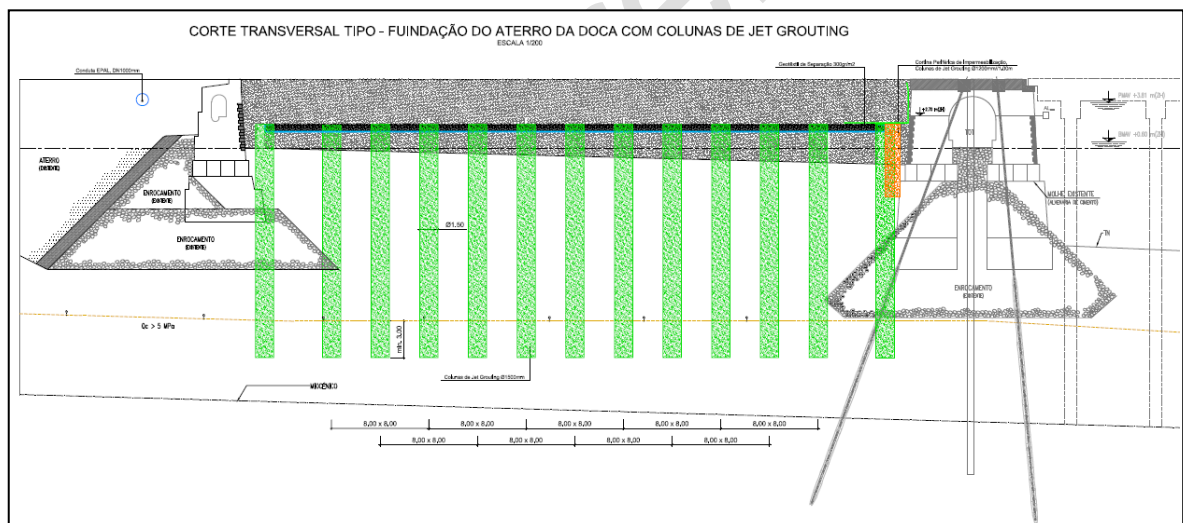


Figura 11 – Colunas de “*jet-grouting*” - Perfil tipo.

5 BIBLIOGRAFIA

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

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.

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

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)

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)

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



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. 7^{as} 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.

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.

