

# OBRAS DE MELHORAMENTO E REFORÇO DE SOLOS

## Soil Improvement and Reinforcement Works

Paulo José Gil Natário\*

**RESUMO** – O artigo descreve os princípios do melhoramento dos solos, enquadrando o seu desenvolvimento inicial, a evolução e as inovações das técnicas ao longo dos tempos e os problemas que tipicamente são resolvidos pela aplicação das mesmas. Aborda os princípios da consolidação, da compactação e faz referência a técnicas de reforço complementares descrevendo ainda algumas tecnologias bem como o seu alcance e os seus diversos campos de aplicação. Apresenta três casos de obra que representam sucessos na aplicação de algumas das técnicas postas em evidência e detalha as fases de concepção, de acompanhamento e de validação da solução encontrada. Finalmente aponta algumas recomendações fundamentais a considerar durante a implementação e o acompanhamento de qualquer processo de concepção e execução de técnicas de melhoramento de solos.

**SYNOPSIS** – The paper describes the principles of soil improvement and presents an overview on the initial development of soil improvement techniques, their evolution and innovation during time as well as the typical problems that are addressed through their application. The paper briefly covers the consolidation and compaction principles and makes reference to complementary soil reinforcement techniques, their range and widespread application. The paper presents three projects that were successful in applying some of the highlighted techniques and details their design, monitoring and solution validation stages. Finally, key recommendations that need to be considered during the implementation and monitoring of any design and execution process on soil improvement techniques are presented.

**Palavras Chave** – Técnicas e tecnologias. Melhoramento dos solos. Implementação e acompanhamento de processos de melhoramento dos solos.

**Keywords** – Techniques and technologies. Soil Improvement. Implementation and assessment of soil improvement processes.

### 1 – INTRODUÇÃO – A EVOLUÇÃO DAS TÉCNICAS DE MELHORAMENTO OU DE REFORÇO DE SOLOS

Desde os primórdios do mundo dito civilizado que é reconhecida como primordial a necessidade de fundar capazmente para assegurar a longevidade e o bom funcionamento das estruturas construídas pelo Homem. Por isso, já na antiga Babilónia, de uma forma bastante rudimentar, se utilizava madeira, bambu ou palha para reforçar o solo de fundação.

Com o aumento do conhecimento dos solos e das suas propriedades mecânicas, para o qual fortemente contribuiu o desenvolvimento dos ensaios laboratoriais e dos ensaios *in situ*, o tratamento dos solos tem experimentado avanços significativos, existindo, hoje em dia, técnicas disponíveis que possibilitam a execução de estruturas em condições geológicas e geotécnicas particularmente adversas.

De entre os pioneiros das técnicas modernas de melhoramento ou reforço dos solos, referência merece o nome de Louis Ménard. Para além da invenção do pressiómetro em 1960, que permite,

---

\* Engenheiro Civil, MBA, Dura Soletanche Bachy. E-mail: paulo.natario@soletanche-bachy.com

desde então, uma melhor e mais rápida caracterização do comportamento mecânico dos solos, ele foi responsável por inúmeros avanços tecnológicos nesta área tais como: i) a compactação dinâmica de solos arenosos em 1965 e o seu posterior desenvolvimento entre 1969 e 1973, levando ao seu emprego em diversas obras de grande envergadura, como, é exemplo, a construção do aeroporto de Nice em 1976, onde foi feita a compactação do maciço a 27 m de profundidade, lançando uma massa de 170 toneladas de uma altura de 25 m; ii) as estacas de brita em solos argilosos em 1969; iii) a instalação dos primeiros drenos verticais a 40 metros de profundidade no aeroporto de Singapura em 1977, pouco antes de ter falecido subitamente no ano seguinte.

O trabalho que desenvolveu e o seu espírito inovador, conjuntamente com a vontade de pôr em prática as suas ideias, levaram-no a constituir a Sociedade “Les Pressiomètres Louis Ménard S.A.” em 1960. Após o seu desaparecimento, técnicas inovadoras foram ainda desenvolvidas pela sociedade por ele constituída, tais como a aplicação de consolidação por vácuo e a introdução de colunas de módulo controlado, ambas realizadas pela primeira vez em França em 1980 e 1988, respetivamente.

## **2 – AS NECESSIDADES DOS PROJECTOS E OS PROBLEMAS TÍPICOS**

A variabilidade dos solos de fundação, a sua génese, as suas propriedades mecânicas, a possança dos estratos, as particularidades das estruturas a fundar e o binómio técnico-económico são algumas das variáveis a ter em conta quando se opta entre fundações indiretas ou diretas. Estas últimas, mesmo quando utilizadas em maciços menos resistentes e mais deformáveis, podem resultar no aligeiramento da solução estrutural e em benefício da vertente técnico-económica, desde que associadas a técnicas de melhoramento ou reforço de solos.

Sendo um facto irrefutável que cada projeto tem as suas particularidades, com diversos desafios que se apresentam com maior ou menor complexidade de resolução, as soluções a adotar terão de variar de acordo com as mesmas. Assim, a técnica de melhoramento ou reforço de solos a empregar em cada caso deverá ser dependente, entre outros fatores, dos objetivos do tratamento, isto é das propriedades do solo que se pretende melhorar.

No tratamento dos solos de fundação são três os objetivos que se podem pretender atingir. Os dois primeiros relacionam-se com o aumento da capacidade resistente do solo para que determinada estrutura possa ser fundada e com o controle dos assentamentos, imediatos ou diferidos no tempo, induzidos por essa mesma estrutura. Usualmente, a complexidade envolvida na prossecução deste segundo objetivo, nomeadamente quando se pretende solucionar e controlar os assentamentos diferenciais, é maior do que a envolvida na garantia da capacidade resistente.

Um terceiro objetivo que, frequentemente, se pretende atingir no tratamento dos solos de fundação, particularmente de areias submersas, tem a ver com a diminuição do risco da ocorrência do fenómeno da liquefação na presença de ações sísmicas, que ao ocorrer pode induzir assentamentos muito elevados ou, mesmo, levar ao colapso das estruturas fundadas.

## **3 – OS PRINCÍPIOS DA CONSOLIDAÇÃO E DA COMPACTAÇÃO**

Sendo a maioria das técnicas de melhoramento aplicadas quando se pretende consolidar ou compactar um solo, apresenta-se conveniente que os princípios da consolidação e da compactação sejam pelo menos sintetizados no seu fundamental.

A consolidação ocorre em solos com granulometria fina e de baixa permeabilidade, como argilas e siltes, e que se encontrem saturados. Quando um estrato destes solos é carregado, o incremento da tensão total acarreta um incremento da pressão de água nos poros, passando a existir um gradiente hidráulico, de que resulta um escoamento transitório com a água sendo sucessivamente expulsa do estrato, o reajuste das partículas e a conseqüente redução de índice de vazios a longo prazo. A velocidade com que o fenómeno se processa depende, para além da

permeabilidade do solo, do percurso que a água tem que percorrer, ou seja da espessura e das condições de drenagem das fronteiras do estrato.

A compactação é promovida de forma praticamente imediata através de um processo mecânico de rápida e repetitiva aplicação de carga ao solo. É aplicável a solos grossos e com alta permeabilidade, solos ditos arenosos, sendo importante conhecer o estado de organização das partículas e o índice de vazios inicial. Com a compactação promove-se o reajuste das partículas essencialmente por expulsão de ar, obtendo-se como consequência um menor índice de vazios, sem alteração significativa do teor em água e do volume de partículas sólidas.

#### 4 – AS TÉCNICAS, O SEU ALCANCE E APLICAÇÕES

Face à extensa variedade de técnicas de melhoramento ou reforço de solos, hoje em dia, existentes é conveniente concentrarmo-nos naquelas que tiveram desenvolvimentos ou inovações recentes e que estão diretamente relacionadas com os casos de obra que no final do artigo se apresentam.

Como se pretende ilustrar na Figura 1, numa primeira abordagem as técnicas de melhoramento podem-se dividir em dois grupos de acordo com a finalidade a que se destinam: consolidar ou compactar o solo. Caso se pretenda consolidar solos de granulometria fina (coluna esquerda da Figura 1), as técnicas a aplicar serão primordialmente os drenos verticais, normalmente associados a pré-carga, ou a consolidação por vácuo, variante da primeira, que mais adiante será alvo de uma descrição mais pormenorizada. Caso se pretenda compactar solos de granulometria grossa (coluna direita da mesma Figura 1), as técnicas a promover devem ser a compactação dinâmica ou a vibro compactação, bem como algumas variantes complementares das mesmas.

Na coluna central da Figura 1 incluem-se as técnicas de reforço, em princípio aplicáveis a qualquer tipo de solo. O jet-grouting, a substituição dinâmica, as colunas de brita ou as colunas de módulo controlado são técnicas que através da adição de materiais e/ou mistura de ligantes com os solos melhoram as suas propriedades mecânicas ou criam zonas de maior rigidez.

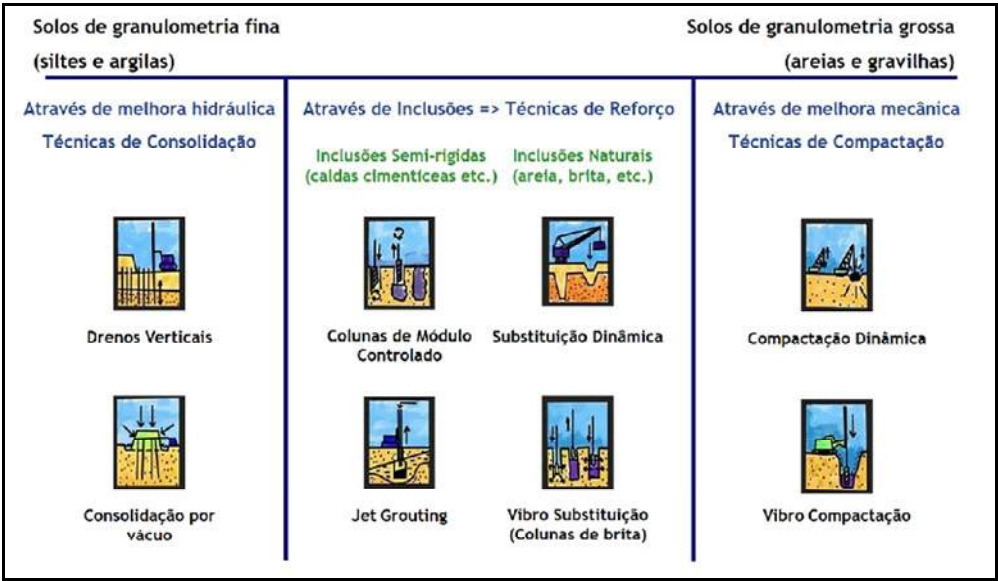
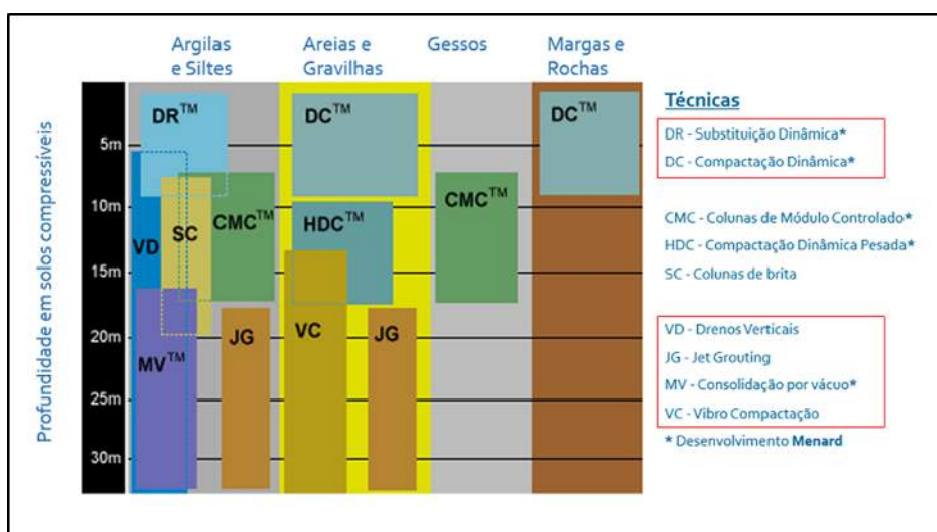


Fig. 1 – Técnicas de melhoramento de solos (Menard).



**Fig. 2** – Alcance das técnicas de melhoria ou reforço de solos (Menard).

A Figura 2 ilustra de forma compreensiva o posicionamento das técnicas de melhoria ou reforço de solos em relação ao tipo de solos, à sua aplicabilidade e ao seu alcance. A legenda da Figura 2 engloba as duas técnicas de aplicação superficial na primeira caixa, as três técnicas indicadas para profundidades intermédias ao centro e as quatro técnicas a adotar a maiores profundidades na caixa inferior. Em conjunto, as Figuras 1 e 2 podem, numa fase preliminar, ajudar na seleção da técnica a adotar, bem como na definição e adequabilidade da mesma.

A evolução das técnicas de melhoria ou reforço de solos, assim como as inovações que entretanto surgiram, permitiram o aumento da sua fiabilidade e a generalização da sua aplicação. Estas técnicas são atualmente utilizadas em todos os tipos de projeto, desde edifícios a unidades industriais e áreas logísticas, vias de comunicação viárias ou ferroviárias, portos e aeroportos.

#### 4.1 – Técnicas de Consolidação

As técnicas de consolidação visam promover a expulsão da água contida nos poros dos solos de baixa permeabilidade e granulometria fina, com a consequente redução do índice de vazios. A técnica atualmente mais usualmente utilizada é a instalação de drenos de “fita” verticais, os quais, conjuntamente com uma sobrecarga, promovem a aceleração da consolidação, contrastando com a anterior aplicação única de sobrecarga.

Mais recentemente, esta técnica de consolidação foi adaptada, fazendo uso dos mesmos princípios, mas com diferente abordagem, evoluindo para consolidação por vácuo (Menard Vacuum - técnica desenvolvida pela Menard).

A técnica faz uso da pressão atmosférica para promover e instalar a pré-carga no maciço. Compreende a instalação de um sistema de drenos verticais e horizontais ligados entre si, sob uma membrana impermeável, selada por valas periféricas cheias com água mantida a nível constante de maneira a garantir a saturação dos solos e a evitar o rebaixamento do nível freático na zona do tratamento.

O sistema, representado na Figura 3, é complementado por bombas de ar e de água colocadas no exterior da instalação, as quais geram sub-pressões que podem atingir 60 a 80 kPa. Este inovador processo simula o efeito da sobrecarga e promove uma consolidação isotrópica acelerada, eliminando a necessidade da materialização física da sobrecarga, limitando os assentamentos residuais no longo prazo e resultando por isso mais económico.

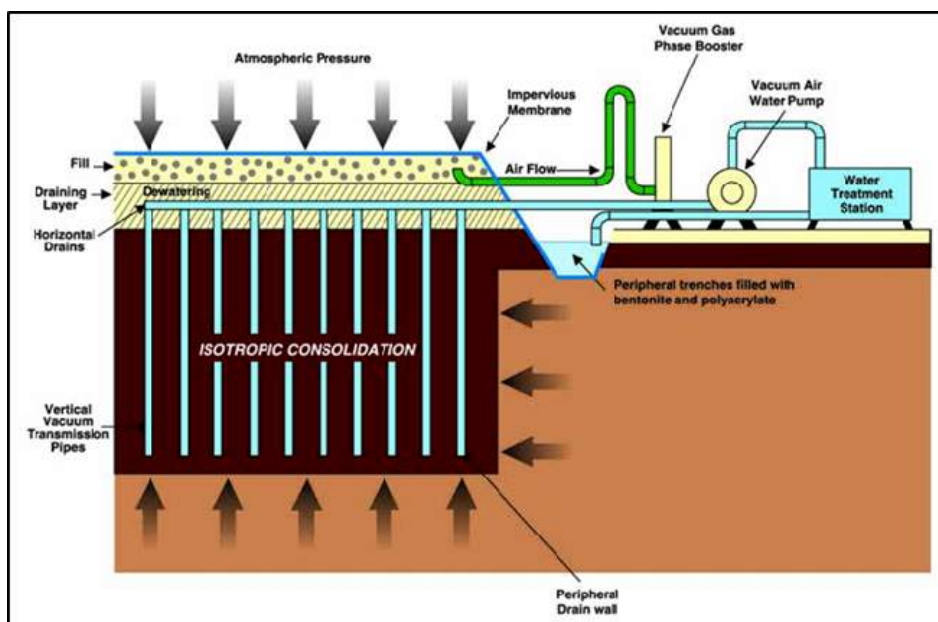


Fig. 3 – Esquema típico do sistema de consolidação por vácuo (Menard).

## 4.2 – Técnicas de Compactação

### 4.2.1 – Compactação Dinâmica

O princípio básico da técnica de compactação dinâmica consiste na transmissão de ondas de alta energia através de qualquer tipo de solo granular de maneira a melhorar as suas características mecânicas em profundidade, sendo comprovadamente aplicável também em solos saturados.

Esta técnica, como a maioria das outras, está normalmente associada a campanhas intensivas de ensaios realizados *in situ* para comprovar a sua efetividade. A execução é precedida pela calibração em zona experimental dos parâmetros definidos para o tratamento.

As ondas de alta energia são geradas por um processo de impactos sucessivos de massas com peso variável, largadas de diferentes alturas em queda livre ou semilivre. A disposição dos pontos de impacto e os restantes parâmetros que definem o tratamento, tais como a energia, o número de impactos por posição e o faseamento, dependem das características dos solos e do grau de melhoramento requerido para garantir o assentamento admissível e a capacidade de carga necessária.

A este procedimento em solos granulares pode associar-se os seguintes efeitos:

- Compactação imediata, que resulta da reorganização instantânea das partículas e redução do índice de vazios originada pelo impacto e que é quantificável pelo assentamento após o mesmo;
- Compactação diferida, que ocorre em alguns tipos de solos saturados e que resulta do aumento súbito da pressão da água existente nos poros, que pode causar a liquefação momentânea dos solos e promover a reorganização das partículas com uma compactidade maior à medida que se verifica a sua dissipação.

Naturalmente, que quanto maior for a profundidade dos solos a compactar, maior será a energia a aplicar. A compactação de solos entre 10 a 15 m de profundidade, utilizando a técnica de



**Fig. 4 – Sistema MARS / Compactação Dinâmica de Alta Energia (Menard).**

compactação dinâmica, consegue-se através da aplicação de uma energia normalmente superior a 600 t.m, largando massas com peso acima de 30 t desde alturas entre 30 e 40 m. O sistema MARS, representado na Figura 4, otimiza a eficiência da queda livre evitando perda de energia por fricção dos cabos e guinchos. A massa é totalmente libertada após uma fase inicial de aceleração constante e é recuperada através de um acoplamento hidráulico somente após o impacto.

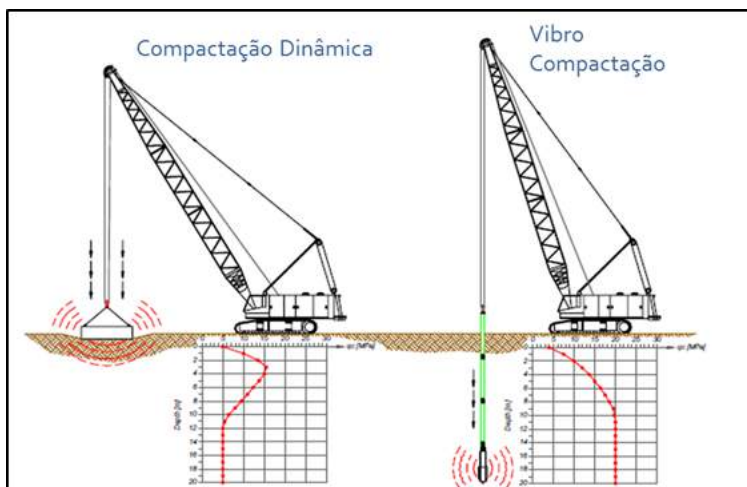
#### ***4.2.2 – Vibro Compactação***

A técnica de vibro compactação consiste no adensamento dos solos granulares, utilizando um vibrador suspenso de uma grua móvel e dotado de uma ponta de tungstênio, com furos por onde pode ser injetada sob pressão água. A operação inicia-se pela cravação do vibrador até à profundidade requerida, conseguida à custa do seu peso e da injeção da água. A vibração em conjunto com a adição de água origina a liquefação localizada dos solos granulares não coesivos e reorganiza as partículas promovendo o assentamento de forma imediata. A técnica é também aplicável em solos coesivos, sendo, no entanto, necessário, nestes casos, complementar o tratamento com a introdução de material granular.

O posicionamento dos pontos a compactar deve ser definido de acordo com as características mecânicas iniciais dos solos a tratar, bem como, com os requisitos finais para o assentamento admissível e a capacidade de carga. Regra geral deve dimensionar-se a malha de maneira a atingir a maior uniformidade de melhoramento possível.

Na Figura 5 pode ver-se que as duas técnicas competem em efectividade a profundidades entre os 5 e os 8 metros, uma vez que, as resistências de ponta atingíveis são semelhantes. A técnica de compactação dinâmica é normalmente mais eficiente a profundidades inferiores a 5 metros enquanto a técnica de vibro compactação é mais eficiente a profundidades superiores a 8 metros.



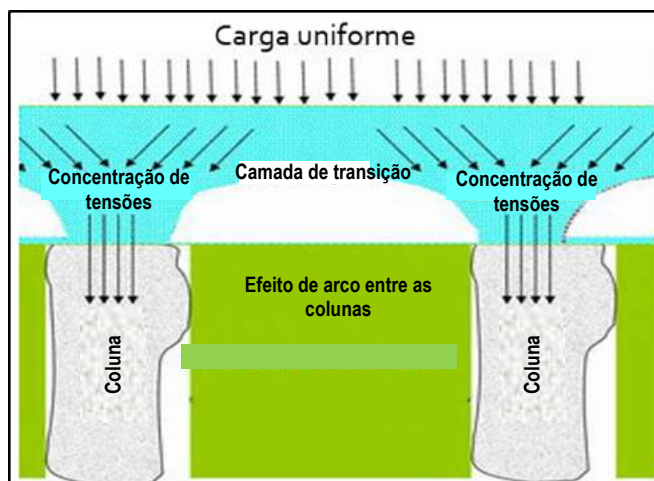


**Fig. 5 – Compactação Dinâmica vs Vibro Compactação (Menard).**

Caso o projecto assim o exija as duas técnicas são complementares, nomeadamente face à necessidade de melhoramento em profundidade e na presença simultânea de solos não saturados e saturados. Neste caso concreto, a vibro compactação deve ser realizada em primeiro lugar nas zonas mais profundas, promovendo a densificação e acautelando o risco de liquefação abaixo do nível freático.

#### 4.3 – Técnicas de Reforço

As técnicas de reforço de solos são complementares das técnicas de melhoramento, surgindo na maioria das vezes por optimização ou variações das mesmas, fazendo uso da mistura de ligantes com os solos ou da inserção de materiais em determinadas zonas pontuais dos solos. Estas técnicas fazem parte da família das inclusões rígidas ou semi-rígidas e emergem de maneira a cerrar o intervalo existente entre as técnicas de melhoramento de solos e as técnicas de fundação indirecta.



**Fig. 6 – Transferência de carga uniforme para elementos pontuais (Soletanche Freyssinet).**

A transferência da carga uniforme para elementos rígidos com capacidade portante pontual é conseguida através do efeito de arco promovido pela construção de uma plataforma de transferência de carga composta por materiais geossintéticos e/ou granulares, materializada entre o topo dos elementos pontuais e a estrutura a fundar, não existindo qualquer ligação física entre as duas. A Figura 6 representa de forma esquemática o mecanismo de transferência de carga uniforme para elementos pontuais.

Em alternativa, os elementos pontuais de reforço podem ser agrupados e funcionar directamente sob zonas de carga pontual ou linear elevada, nomeadamente sapatas de fundação pontuais ou corridas.

#### **4.3.1 – Colunas de Brita**

As colunas de brita são formadas utilizando um equipamento muito semelhante ao da vibrocompactação, que é cravado no solo, e pela incorporação de materiais granulares, que constituem inclusões verticais com alta rigidez, capacidade ao corte e capazes de promover a drenagem do solo.

Durante a penetração do vibrador o solo é deslocado lateralmente. Após atingida a profundidade requerida, inicia-se a extração do vibrador e a introdução do material granular de forma ascendente pela extremidade inferior e o interior do mesmo. A coluna é formada por apiloamento incremental sucessivo, com ciclos entre 0,3 a 0,5 m, até se atingir a superfície. O diâmetro da coluna varia ao longo do fuste, dependendo das características do solo envolvente ao longo dos estratos atravessados. A Figura 7 representa dois dos sistemas utilizados para a execução desta técnica.



**Fig. 7** – Esquerda: “VREX System”, Direita: “DBF Stitcher” (Menard).

A tecnologia de instalação pode variar entre a via seca ou a via húmida, de acordo com a profundidade a atingir, o tipo de solos a reforçar e os diâmetros de coluna requeridos.

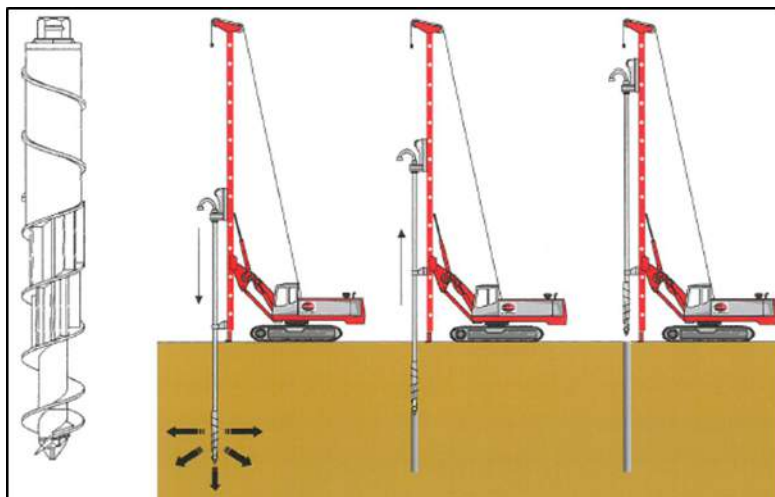
Esta técnica é, basicamente, aplicável em qualquer tipo de solo, recomendando-se, no entanto, prudência na sua utilização na presença de solos que apresentem risco, no longo prazo, de degradação das suas características mecânicas e limitada capacidade de confinamento, nomeadamente argilas e siltes muito moles ou solos com forte componente orgânica como lodos e turfas.



#### 4.3.2 – Colunas de Módulo Controlado

As colunas de módulo controlado (CMC) são formadas pela introdução de uma ferramenta especialmente desenhada para penetrar e deslocar lateralmente o solo envolvente sem extração do mesmo. A ferramenta, com diâmetros que variam entre 250 e 450 mm, é montada na extremidade inferior do sistema e penetra no solo à rotação, impelida por equipamentos com grande capacidade de torque e “pull down”.

Após atingida a profundidade necessária, a ferramenta é extraída a uma velocidade constante e em simultâneo é realizada a injeção sob pressão de calda de cimento, argamassa ou betão pelo eixo do sistema. Na Figura 8 apresenta-se a ferramenta de perfuração à esquerda e as fases de execução à direita.



**Fig. 8** – Esquerda: Vista da ferramenta de furação, Direita: Processo construtivo (Menard).

Contrariamente a uma solução por fundações indiretas, cujo dimensionamento deve ter em conta a transmissão da totalidade da carga aos elementos de fundação, a solução por CMC incrementa a rigidez da massa de solo, o que possibilita mobilizar a resistência do conjunto CMC/solo e permite a distribuição da carga entre as CMC e o solo envolvente. Parte da carga é transmitida diretamente ao estrato competente pelas colunas e a restante é dissipada na massa de solo melhorada.

#### 4.3.3 – Trenchmix

Esta tecnologia patenteada foi desenvolvida por adaptação de equipamentos convencionais destinados à escavação de valas, que foram submetidos a modificações profundas de modo a serem capazes de desmontar o solo em vez de escavar, permitir a incorporação de um ligante e misturar *in situ* o solo revolvido com o agente ligante de maneira efetiva.

O Trenchmix faz parte da família de técnicas de “deep soil mixing” e consiste na execução de valas preenchidas por solo melhorado. O solo é desmontado e misturado com o agente ligante por intermédio de uma serra, com ação contínua, enquanto o equipamento se desloca. O equipamento permite incorporar o agente ligante por via seca ou húmida, dependendo das características dos solos a melhorar. O equipamento e vista da serra (à esquerda) e o processo de execução (à direita) estão representados na Figura 9.



**Fig. 9** – Esquerda: Equipamento de Trenchmix; Direita: Esquema de execução (Soletanche-Bachy).

Durante a fase de desmorte, incorporação de ligante e mistura, os parâmetros operacionais de translação, profundidade, caudal injetado, volume e revoluções da serra, são registados em tempo real, estando disponíveis e podendo ser adaptados pelo operador para controlo da qualidade da execução.

A mistura de solo/ligante atingida por este processo apresenta normalmente maior uniformidade e resistência ao longo da profundidade da vala.

## 5 – CASO 1 - DAS ISLAND (UAE)

Das Island está localizada no Golfo Pérsico a cerca de 160 km a Noroeste do continente, fazendo parte do Emirato Árabe de Abu Dhabi. A ilha é reconhecida pela exportação de crude e gás natural e pela infraestrutura petrolífera nela instalada, sendo a sua população maioritariamente constituída pelas pessoas que nessa infraestrutura trabalham. Uma vista aérea geral da ilha pode ver-se na Figura 10.

O Projeto “Das Island Development Project – Phase III” desenvolveu-se em 2011 e consistiu na extensão da ilha existente para acomodar um aeroporto e uma zona habitacional. No presente artigo serão abordados unicamente os trabalhos de melhoramento de solos após a sua deposição para a ampliação destinada à zona habitacional.



**Fig. 10** – Vista aérea geral da Ilha de Das e extensão para zona habitacional (Menard).

Os requisitos a que o projeto desse tratamento dos solos teria que dar resposta seriam o de: i) garantir a compactação a 95 % da massa específica aparente seca acima da interface com a água (+1,6 m DID); ii) acautelar o risco de liquefação abaixo dessa linha de interface.

Os trabalhos de melhoramento de solos anteriormente realizados na ilha sempre se revelaram difíceis, não sendo fácil atingir os níveis de compactação requeridos face às seguintes condicionantes locais:

- i) Zonas aterradas com material dragado de diferentes proveniências e consequente heterogeneidade, com menor ou maior presença de conchas, como se pode visualizar na Figura 11, que amplia a amostragem realizada às areias utilizadas;
- ii) Distintos processos de reposição após dragagem que originaram diferentes níveis de compactação.



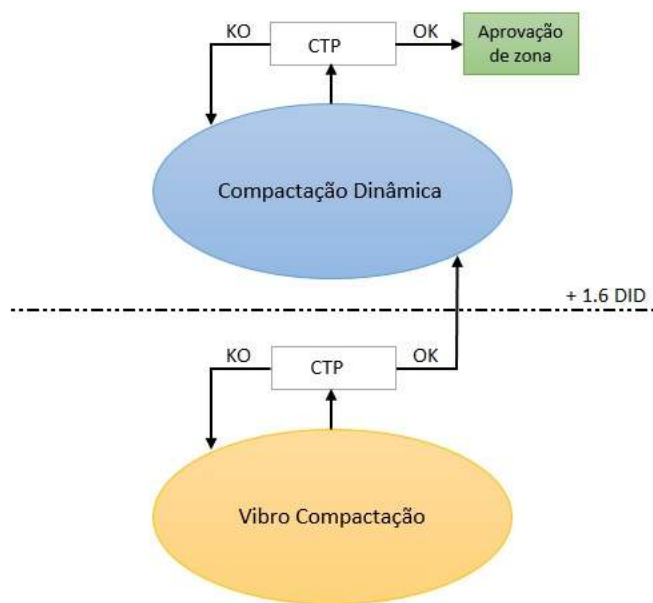
**Fig. 11** – Massiva presença de “conchas” nas areias (Menard).

Face ao histórico dos trabalhos precedentes e às conhecidas condicionantes locais acima descritas, ficou evidente que o dimensionamento do tratamento teria que levar em conta as seguintes aspectos: i) O assentamento imediato admissível acima e abaixo do nível freático induzido pela carga aplicada; ii) O factor de segurança associado ao risco de liquefação e o assentamento induzido por ocorrência de sismos abaixo do nível freático; iii) No caso particular, o factor de correcção da densidade relativa face à massiva presença de “conchas” nas areias.

Para o cálculo das densidades relativas corrigidas e obtenção da resistência de ponta equivalente a obter no ensaio CPT para comprovação *in situ* da efetividade do tratamento foram realizados os seguintes trabalhos que precederam a execução do tratamento:

- i) Ensaio CPT por zonas para determinar a resistência de ponta e a densidade aparente inicial;
- ii) Amostragem exaustiva para caracterizar os solos e identificar zonas singulares;
- iii) Ensaio laboratoriais para determinar:
  - a) Densidade mínima e máxima;
  - b) Potencial de esmagamento;
  - c) CPT miniaturizado após calibração em câmara centrífuga.

A calibração foi realizada por uma centrífuga ISMGEO (IGC), a qual possui um braço de rotação simétrico e dois cestos posicionados nas extremidades que se deslocam da vertical para a horizontal quando em rotação, permitindo que a distorção do campo centrífugo da amostra seja mínima. A calibração em câmara centrífuga foi executada num total de seis amostras, três secas e três saturadas, reconstituídas a três densidades relativas distintas (40, 55 e 70%). O CPT foi executado por um dispositivo miniaturizado com diâmetro 11,3 mm, área total de 1 cm<sup>2</sup> e 60° de



**Fig. 12** – Sequência de execução e validação dos tratamentos.

cone, munido de sensores que possibilitam medir a resistência de ponta, o atrito lateral e a pressão neutra.

De acordo com as regras de boa execução foram realizados ensaios preliminares para calibração dos parâmetros de compactação numa zona experimental de 625 m<sup>2</sup> (25 m x 25 m) em tudo idêntica às resultantes da subdivisão de que foi alvo a totalidade da área a tratar.

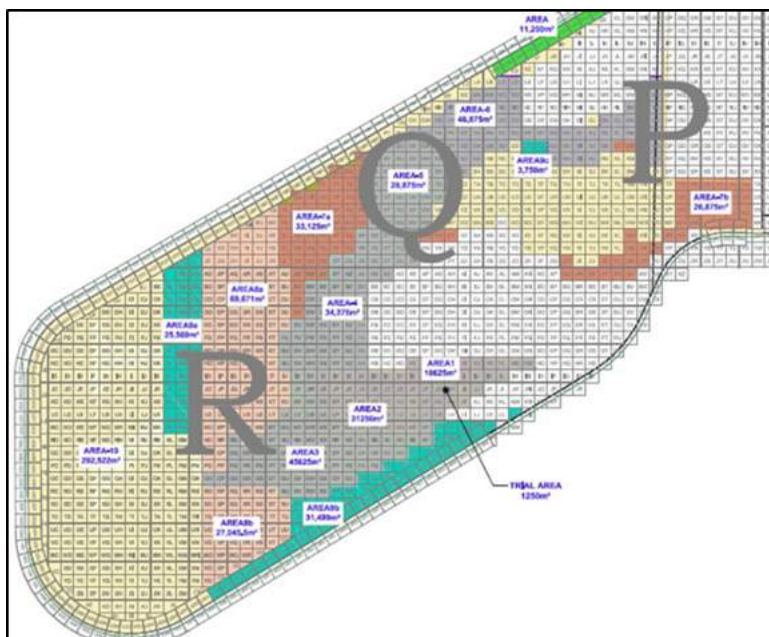
O procedimento e o faseamento de execução adotados para cada uma das zonas a que a área total foi subdividida, foi o que a seguir se descreve e representa na Figura 12.

- i) Vibro compactação executada abaixo de +1,6m DID, seguida de ensaios CPT para validação da efetividade do tratamento às profundidades tratadas;
- ii) Execução de compactação dinâmica acima de +1,6m DID e subsequente validação da efetividade do tratamento, igualmente, através de ensaios CPT.

Na Figura 13 mostra-se a grelha inicial para o melhoramento com as subdivisões de 625 m<sup>2</sup> e, a diferentes cores, representa-se as diversas áreas onde distintos parâmetros de compactação foram utilizados com sucesso.

Da experiência adquirida durante os trabalhos de melhoramento realizados na Ilha de Das sugerem-se as seguintes recomendações, as quais podem e devem ser tidas como genéricas em trabalhos deste género:

- i) A totalidade da área a melhorar deve ser alvo de um zonamento criterioso, visando a identificação de zonas que representem singularidades;
- ii) Com base no zonamento realizado, deve ser definida uma campanha de ensaios preliminares, laboratoriais e *in situ*, a qual deve ser ajustada de modo a ter em conta as singularidades identificadas ou a nova informação entretanto reconhecida;



**Fig. 13** – Subdivisão da área total a tratar por parâmetros de tratamento (Menard).

- iii) Efetuar o dimensionamento da solução de melhoramento tendo em consideração as características mecânicas dos solos e dedicando especial atenção aos fatores de correção resultantes dos ensaios realizados;
- iv) Necessidade de realizar ensaios para calibração dos parâmetros de execução dos tratamentos em área(s) experimental(is) especialmente localizada(s) para esse efeito;
- v) Definir um faseamento e um procedimento de execução e, em paralelo, estabelecer a sequência de ensaios a realizar *in situ* para a validação do tratamento;
- vi) Estar consciente de que “o tratamento global é o somatório de muitas partes” e da necessidade de adaptar e ajustar constantemente.

## 6 – CASO 2 - FORTH CROSSING

A reformulação da infraestrutura viária em Forth Crossing através da construção da Queensferry Crossing Bridge é considerado o maior investimento estruturante recente da Escócia e prevê-se que esteja concluída em 2016. A nova travessia irá complementar a existente ponte Forth Road Bridge, à direita na Figura 14, permitindo atravessar o estuário do rio Forth entre Lothian e Fife respectivamente a Sul e a Norte de Queensferry.

O novo traçado, posicionado sobre solos aluvionares fracos e depósitos de reclamação presentes na margem Norte, cujas características se incluem no Quadro 1, e os requisitos das novas vias de acesso, apoiadas em terraplenos que atingem 16 m de altura, tornaram evidente o risco de assentamentos incompatíveis com as condições de serviço e da própria rotura dos solos de fundação. No que a seguir se refere, pretende-se destacar os problemas solucionados e descrever a aplicação das técnicas de reforço do solo empregues.

O Quadro 1 apresenta sucintamente os estratos atravessados na margem Norte, a sua possança e as fracas propriedades mecânicas dos solos constituintes.

O tipo de estruturas a construir exigia que o dimensionamento do tratamento a realizar garantisse a estabilidade global dos aterros segundo o Eurocódigo 7 e limitasse os assentamentos diferenciais em serviço a 1/200. O dimensionamento das soluções foi desenvolvido em modelos



**Fig. 14** – Acesso Norte a Forth Road Bridge (Menard).

de elementos finitos 2D e 3D, em estrita observância das BS 8006, para os casos de rotura dos solos de fundação e estimativa dos assentamentos nas diferentes fases de construção e em serviço.

**Quadro 1** – Estratos existentes na margem Norte e suas características

| Descrição                     | Profundidade<br>(m) |       | Peso Volúmico<br>(kN/m <sup>3</sup> ) | $c_u$<br>(kN/m <sup>2</sup> ) | $E_u$<br>(MN/m <sup>2</sup> ) |
|-------------------------------|---------------------|-------|---------------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| Aterros                       | 0                   | -2    | 19                                    | 17                            | 3                             |
| Depósitos de Estuário         | -2                  | -9    | 16                                    | 15                            | 0.5 / 2.5                     |
| Depósitos glaciares alterados | -9                  | -10.5 | 19                                    | 90                            | 14                            |
| Depósitos glaciares           | -10.5               | -15   | 19                                    | 150                           | 31                            |

As técnicas seleccionadas para o reforço dos solos de fundação foram as seguintes:

- i) Colunas de Módulo Controlado – Com o objetivo de assegurar uma distribuição adequada de carga entre as colunas e o solo adjacente de modo a potenciar a capacidade resistente da fundação e limitar os assentamentos aos requisitos de projeto;
- ii) Trenchmix – Através de valas de solo/cimento, abertas até ao estrato portante ou profundidade pré-definida, de maneira a incrementar a rigidez vertical do conjunto e/ou limitar a deformação horizontal.

As duas tecnologias foram utilizadas separadamente mas também em conjunto, numa solução inovadora, como a seguir se descreve.

O Quadro 2 resume as possanças e tipos de formações a atravessar, as características do terrapleno e as técnicas de reforço utilizadas em três das zonas que exigiram tratamentos de maior complexidade.



**Quadro 2 – Condicionantes e tipos de reforço**

| Área | Profundidade (m) |       | Terrapleno (m)    | Secção        | Técnica(s)                                                      |
|------|------------------|-------|-------------------|---------------|-----------------------------------------------------------------|
| A    | 0                | -7    | Simétrico, 6 m    | aluvião/rocha | CMC simples/armadas e plataforma de transferência com geotextil |
| I    | 0                | -7    | Assimétrico, 16 m | aluvião       | Trenchmix com afastamento variável, mínimo 1 metro              |
| K    | 0                | -13.5 | Assimétrico, 10 m | aluvião       | CMC (malha de 1.45 x1.45 m2) e Trenchmix (afastamento: 2.9 m)   |

## 6.1 – Tratamentos por área

### Area A

Apesar da possança dos solos a atravessar não ser significativa, inferior a 7 m, a proximidade da margem do estuário, a presença de um afloramento rochoso e o facto do terrapleno a construir atingir uma altura a rondar os 6 m junto do atravessamento da linha férrea, constituíram-se como fatores condicionantes para o dimensionamento da solução de reforço.

Optou-se por adotar uma solução de reforço e melhoramento por CMC com diâmetro de 0,36 m a qual aumenta a rigidez vertical da fundação e permite a redução significativa dos assentamentos. Como complemento ao reforço foi, também, dimensionada uma plataforma de transferência de carga com aplicação de geotêxteis ao longo de toda a largura dos terraplenos para melhorar a rigidez horizontal da solução e limitar os deslocamentos laterais das CMC. Esta plataforma exigiu a substituição de solos e a implementação de pré-carga em algumas zonas singulares do terrapleno, visando controlar os assentamentos diferenciais. É ainda de referir que a análise dos modelos de cálculo determinou que as CMC nos alinhamentos sob o pé do talude do terrapleno fossem armadas para controlar as tensões instaladas e limitar a sua deformação horizontal.

O dimensionamento da solução foi realizado utilizando modelos de elementos finitos 2D para determinar os esforços e os assentamentos em serviço nas CMC, gerados nas interfaces da fundação do terrapleno.

### Area I

Nesta zona verifica-se que a possança dos solos a atravessar é inferior a 7 m. No entanto, o facto de o terrapleno ser assimétrico, dado confrontar com vias de acesso existentes, e atingir alturas a rondar os 16 m, condicionou o dimensionamento e as soluções adotadas, desde logo não sendo possível a aplicação de geotêxteis para controlar as deformações horizontais.

O dimensionamento da solução foi realizado utilizando modelos de elementos finitos 3D e determinou a utilização de Trenchmix para instalar uma malha de valas de reforço desde a superfície até ao estrato com capacidade portante. A malha foi idealizada de maneira a aumentar a rigidez do conjunto e limitar os deslocamentos horizontais.

As valas, com 0,4 m de espessura, foram orientadas e espaçadas entre si para limitar os esforços de compressão e de corte a valores resistentes admissíveis da mistura de solo melhorado. Especial atenção foi dedicada a zonas singulares de confrontação e com altura significativa de terrapleno, onde a distância entre valas atingiu um valor mínimo de 1,0 m.

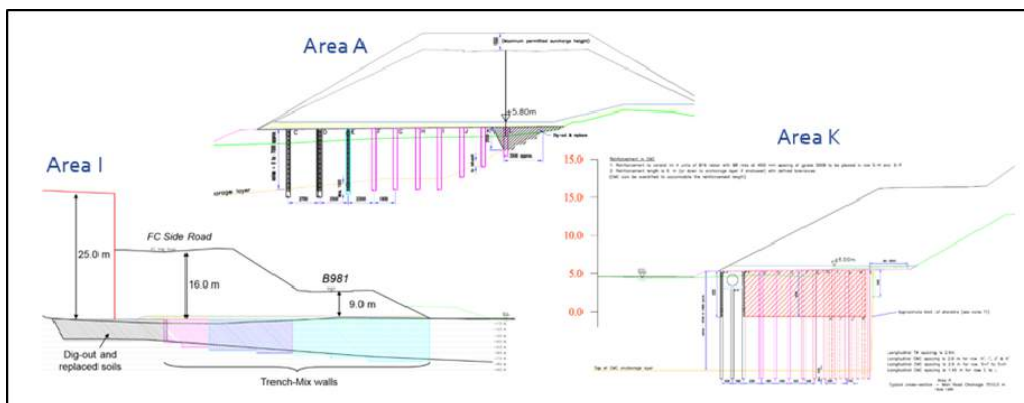
## Area K

Nesta área, como na anterior, o terrapleno é também assimétrico, mas com altura inferior, rondando os 10 m. No entanto, a possança dos solos a atravessar é substancialmente superior atingindo 13,5 m em algumas zonas. Perante este cenário foi necessário dimensionar uma solução de tratamento inovadora que combinasse as duas tecnologias anteriormente referidas.

A solução adotada incluiu um reforço por CMC até ao estrato competente, com distribuição em malha quadrada de  $(1,45 \times 1,45)$  m<sup>2</sup>, e sob a zona mais alta do terrapleno, para melhorar a rigidez vertical do solo de fundação, complementado por valas em Trenchmix, com espaçamento de 2,9 e 6 m de profundidade e posicionadas entre cada duas linhas consecutivas de CMC, para aumentar a rigidez horizontal do conjunto e limitar a deformação horizontal. Para o dimensionamento da solução, modelos de elementos finitos 3D foram empregues.

A combinação das tecnologias, que requereu cuidados redobrados no dimensionamento e alguma criatividade, com adaptações na disposição e nos comprimentos dos elementos de reforço, revelou-se, no final, tecnicamente ajustada e economicamente competitiva.

A Figura 15 apresenta esquemas das soluções adotadas nas áreas acima mencionadas.



**Fig. 15** – Soluções adoptadas nas diferentes áreas (Menard e Soletanche Bachy).

## 6.2 – Controlo de qualidade

O controlo de qualidade é fundamental neste tipo de soluções, nomeadamente no que respeita aos ensaios laboratoriais para definir as dosagens e as características do ligante a adoptar nas misturas com os solos e também durante a execução dos trabalhos.

No caso específico, e por ser de maior interesse, é somente abordado o controlo de qualidade efectuado para o Trenchmix uma vez que as CMC foram realizadas com controlo de parâmetros de execução e com incorporação de uma argamassa fornecida por uma entidade externa, com composição testada e aprovada e com a resistência pré-definida.

### 6.2.1 – Ensaios laboratoriais preliminares

Precedendo os trabalhos foram realizados ensaios laboratoriais a diversas misturas de solo e quantidades de cimento variáveis com o objectivo de garantir uma resistência à compressão mínima de 800 kPa aos 28 dias.

Face à sua predominância local e à variabilidade do seu conteúdo orgânico, de 0,5 a 17%, o solo de base seleccionado para o efeito foi a argila orgânica. Após testadas as diversas composições concluiu-se que a resistência requerida era atingida por uma mistura contendo 80%

de escória de alto forno ativado por 20% de cimento Portland normal, com dosagem de 300 kg de ligante por metro cúbico de solo tratado.

### 6.2.2 – Controlo de qualidade durante a execução

O Trenchmix foi realizado com o apoio do sistema Jean Lutz de registo de parâmetros de execução, sendo efetuado o registo do rácio e incorporação de ligante e número de revoluções da serra. Em paralelo e sistematicamente foram realizados ensaios sobre amostras do ligante, para determinação da sua densidade e da sua resistência, e sobre diversas amostras por vala, para determinar a resistência à compressão simples aos 28 dias do composto final.

Apesar da grande dispersão dos resultados obtidos, função do conteúdo em matéria orgânica e do teor de humidade dos solos locais, a Figura 16 mostra que os valores médios por vala da resistência à compressão, representados pelos triângulos azuis, estão de acordo com os requisitos mínimos definidos.

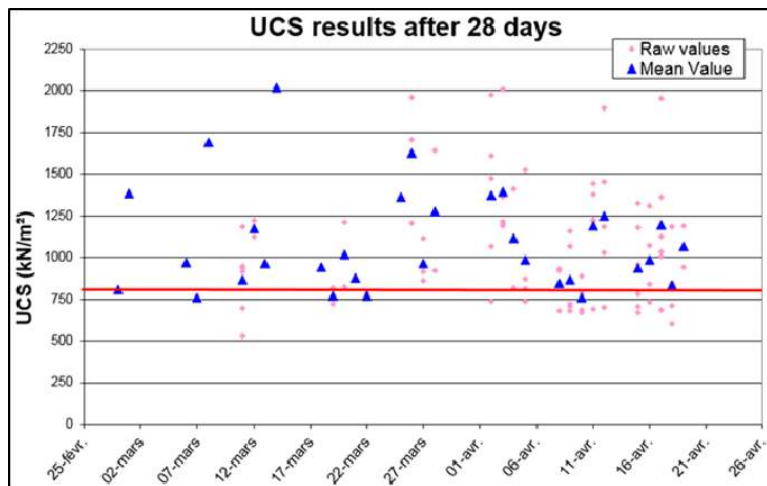


Fig. 16 – Resultados dos ensaios de resistência à compressão aos 28 dias (Menard).

### 6.2.3 – Ensaios após a execução

Finalmente, após a execução, foram realizados ensaios de carga em placa, com  $(2,25 \times 2,25)$  m<sup>2</sup>, colocada sobre 4 colunas CMC. A carga aplicada atingiu o valor de 960 kN, correspondente a 120% da carga de serviço, tendo sido o assentamento máximo medido de 11 mm.

Em todas as zonas intervencionadas foram medidos os assentamentos através de pontos de referência instalados ao longo dos terraplenos, tendo os valores registados sido sempre inferiores a 4 mm. Uma vez que não foram medidos os assentamentos durante a construção dos terraplenos, não foi possível comparar a sua evolução com a decorrente do modelo de cálculo empregue no dimensionamento.

Face aos resultados obtidos, pode concluir-se que a utilização de ambas as tecnologias resultou em benefício do projeto. Uma vez mais se recomenda o dispêndio de tempo na execução de ensaios que permitam otimizar e validar as soluções.

## 7 – CASO 3 - CAIS 306 RICHARDS BAY

O Cais 306 faz parte da infraestrutura portuária de Richards Bay que se situa na província de Kwazulu-Natal, África do Sul. Em 2005 foi decidido incrementar a sua capacidade operacional de

movimentação de carvão de 72 tm/ano para 92 tm/ano, tendo para tal efeito sido necessário estender o cais então existente em cerca de 324 m para incrementar a respetiva linha de acostagem.

O projeto consistiu no melhoramento submerso do solo de fundação, seguido de dragagem para apoio de 11 caixões em betão pré-fabricado com 22 m de altura. A Figura 17 mostra a vista aérea do Cais 306, antes e depois dos trabalhos de beneficiação efetuados.



**Fig. 17** – Vista aérea do Cais 306: antes e depois da sua extensão (Dura Soletanche Bachy, África do Sul).

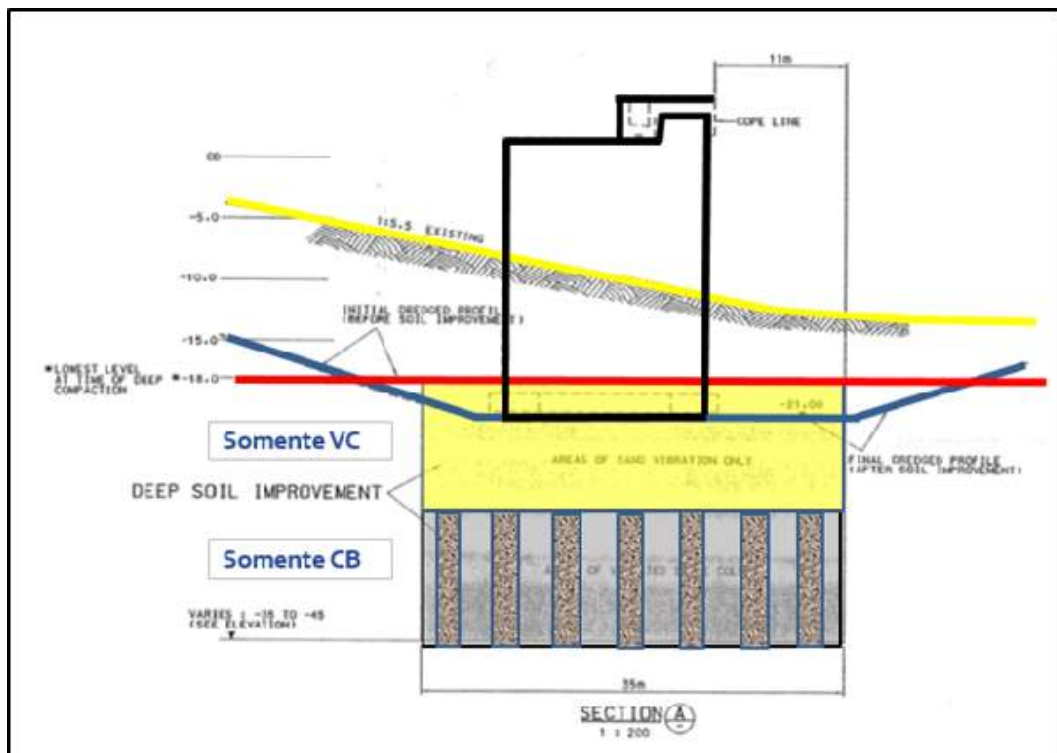
Para o melhoramento do solo de fundação, que se iniciou em janeiro de 2006 com um prazo de execução de 6 meses, estava previsto inicialmente um tratamento de 140 000 m<sup>3</sup> por colunas de brita e de 130 000 m<sup>3</sup> por vibrocompactação.

Preliminarmente à execução dos trabalhos foi demarcada uma área experimental localizada numa zona singular que funcionou como referência e ponto de partida, definido o procedimento para verificar, validar e eventualmente adaptar os parâmetros de execução, que a seguir se descreve:

- i) Realização de ensaios preliminares CPT para aferir das reais condições locais;
- ii) Execução de uma área experimental e materialização de colunas de ensaio com metodologia definida a partir dos resultados dos ensaios preliminares;
- iii) Análise de resultados e definição de procedimento de execução adaptado;
- iv) Execução de colunas para melhoramento do solo de fundação;
- v) Realização de ensaios de penetração após conclusão das colunas em cada área de apoio dos caixões;
- vi) Eventual reforço dependendo dos resultados obtidos nos ensaios de penetração.

Os trabalhos previstos a realizar e a sua sequência de execução encontram-se representados na Figura 18 e consistiam de uma maneira simplista no seguinte: i) Executar colunas de brita entre a cota - 40 m (em média) e a base do estrato arenoso (variável); ii) Compactar as areias

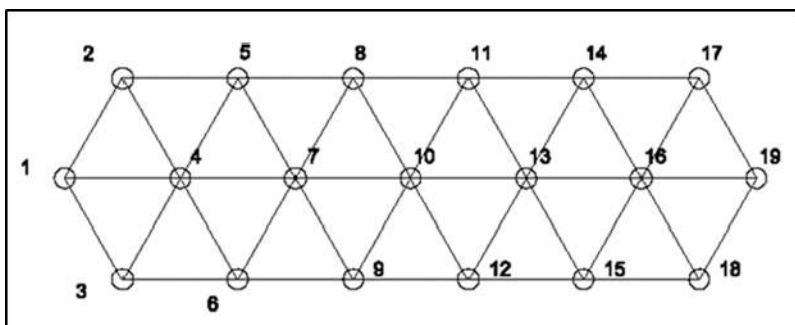
sobrejacentes até ao nível -18 m; iii) Dragar até ao nível da fundação dos caixões, nível -21 m; iv) Posicionar e fundar os caixões ao nível -21 m.



**Fig. 18** – Trabalhos a executar e sua sequência (Dura Soletanche Bachy, África do Sul).

Durante a execução da área experimental, representada na Figura 19, os parâmetros e formas de tratamento foram objeto de algumas variações de maneira a poderem ser otimizados. Assim, optou-se por variar os parâmetros de tratamento conforme a seguir se descreve:

- i) Materialização de coluna somente no estrato argiloso (colunas de 1 a 4 e 10 a 13);
- ii) Materialização de coluna em ambos os estratos (colunas de 5 a 9 e de 14 a 19);
- iii) Utilização de potência no vibrador de 140 a 150 Amp. (colunas 1 a 10);
- iv) Utilização de potência no vibrador de 200 a 220 Amp. (colunas 11 a 19).



**Fig. 19** – Configuração da área experimental (Dura Soletanche Bachy, África do Sul).

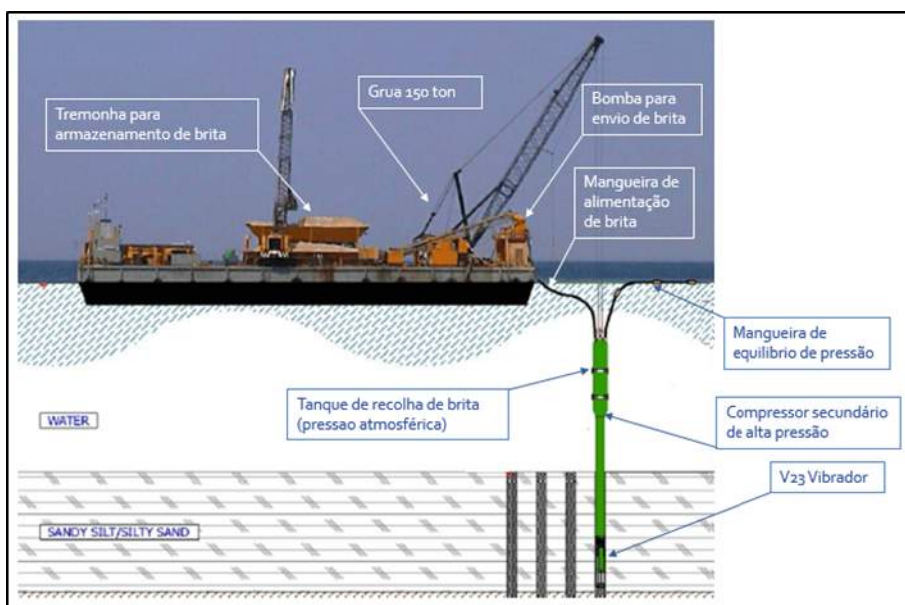
Os resultados obtidos após a execução da área experimental tornaram evidente que não seria possível uma clara separação entre as zonas de execução de colunas de brita e de vibro compactação, tanto devido à variabilidade em profundidade e em rigidez do estrato argiloso como também devido à compacidade das areias sobrejacentes, motivando, portanto, as seguintes mudanças na forma e critérios de instalação: i) Realizar uma penetração nos estratos argilosos de acordo com critérios de potência limite no vibrador, entre 250 e 300 Amp, ou taxa de penetração mínima, < 200 mm em 10 s; ii) Admitida a execução de colunas com 1,4 m de diâmetro onde os solos permitissem ou com uma potência mínima no vibrador de 150 Amps.

Desta maneira, o processo de execução das colunas de brita foi adaptado à variabilidade do estrato argiloso tendo como procedimento base os passos que a seguir se descrevem:

- i) O posicionamento do vibrador e a zeragem do indicador de profundidade;
- ii) Após iniciada a penetração, a profundidade de coluna foi definida por 1 de 3 critérios:
  - a) A profundidade definida no projecto de execução (proveniente da especificação);
  - b) A profundidade atingida quando aplicada uma potência limite entre 250 e 300 Amps no vibrador (definido como critério de “nega”);
  - c) A profundidade atingida quando a penetração do vibrador foi inferior a 200 mm a cada 10 s (critério de “nega”).
- iii) As colunas foram construídas de forma ascendente com sucessivos apiloamentos em tramos entre 0,5 e 1,0 m, aplicando uma potência mínima no vibrador de 150 Amps e um volume de admissão de 1 m<sup>3</sup> por ciclo;
- iv) Adoptou-se ainda por realizar o alargamento do topo da coluna para diâmetros entre 1,5 a 3,0 m através de apiloamento dedicado no último metro de coluna e na zona de transição para as areias.

Os recursos tipicamente afectados a este género de trabalhos encontram-se representados na Figura 20.





**Fig. 20** – Recursos para execução de colunas de brita e vibro compactação submersa (Dura Soletanche Bachy, África do Sul).

De realçar o facto de os inertes serem impelidos por um compressor, para o tanque de recolha situado no extremo superior da ferramenta, aí permanecendo submetidos unicamente à pressão atmosférica até descerem ao longo da aste do vibrador e serem impulsionados por uma pressão adicional gerada por um sistema de pressurização secundário situado na base do tanque.

Para assegurar o posicionamento e o controlo de qualidade foram implementados os seguintes recursos adicionais que devem ser considerados como determinantes: i) Um sistema de posicionamento global (GPS), para garantir uma tolerância de 300 mm; ii) Um sistema de aquisição de dados e registo de parâmetros permitindo registos em função de tempo (profundidade, energia e volume) bem como registos em função da profundidade (quantidade de inerte incorporado).

Após concluído o tratamento, as seguintes conclusões foram retiradas:

- i) A variabilidade em profundidade e a rigidez do estrato argiloso resultou numa variação de diâmetros de coluna entre 0,9 e 1,5 m, gerando menores diâmetros a maiores profundidades e maiores diâmetros na zona superficial do tratamento e na zona de interface com o estrato arenoso;
- ii) Os ensaios de repenetração entre colunas para confirmação da efectividade do tratamento atestaram:
  - a) Penetrações maiores, em zonas localizadas onde o estrato arenoso sobrejacente continha maior percentagem de finos, atingindo cerca de 50% da profundidade das colunas no estrato argiloso. Verificou-se ainda que nestas zonas se atingiram diâmetros mínimos de coluna de 1,4 m e a efetividade do alargamento dedicado do topo das colunas pelo que se considerou que o tratamento foi efectivo;
  - b) Verificaram-se “negas” bruscas ou penetrações diminutas entre colunas nas zonas em que o estrato arenoso sobrejacente era predominantemente arenoso e onde foram geradas colunas com diâmetros inferiores a 1,4 metros no estrato argiloso subjacente. Nestas zonas o tratamento também foi considerado efetivo, uma vez que as

penetrações, no estrato argiloso entre colunas, foram diminutas ou mesmo inexistentes;

Finalmente concluiu-se e confirmou-se a complementaridade entre as duas técnicas, bem como também a sua adaptabilidade e versatilidade, uma vez que foram atingidos maiores diâmetros nas colunas de brita quando materializadas no estrato argiloso nas zonas em que o estrato argiloso era menos rígido e onde se verificou existir maior percentagem de finos no estrato arenoso sobrejacente, e foi conseguido um reforço por alargamento do topo das colunas quando prolongadas no interior do estrato arenoso. Nas zonas onde o estrato era predominantemente arenoso e o estrato argiloso era mais rígido, atingiram-se menores diâmetros nas colunas de brita e maior compactação do estrato arenoso.

## 8 – CONSIDERAÇÕES FINAIS

Existe um leque extenso de técnicas para melhorar as características mecânicas dos solos. Aos solos de granulometria fina aplicam-se as técnicas que visam a sua consolidação. Aos de granulometria grossa são aplicáveis aquelas cujo objetivo é promover a sua compactação.

Complementarmente às técnicas “puristas” de melhoramento, existem diversas tecnologias de reforço dos solos que fazem uso de inclusões e mistura dos solos com ligantes, melhorando a capacidade resistente do conjunto “solo-reforço”.

A definição da solução técnica deve ter em conta as necessidades do projeto e garantir a capacidade resistente necessária, controlar os assentamentos admissíveis e diferenciais, sejam eles imediatos ou diferidos, e/ou acautelar o risco de liquefação.

É de todo recomendável que durante a concepção da solução seja realizado um zonamento que identifique as singularidades, sejam recolhidas amostras e realizados ensaios laboratoriais e *in situ* para suportar a viabilidade da mesma. Precedendo os trabalhos, é essencial aferir e ajustar parâmetros de execução, pelo que áreas experimentais devem ser demarcadas. A validação do tratamento deve ser feita através de campanhas exaustivas de ensaios *in situ*.

Por último, apesar dos resultados conseguidos serem técnica e economicamente interessantes sendo por isso apetecível a sua utilização em detrimento da opção por uma solução de fundações profundas, recomenda-se que a utilização destas técnicas e tecnologias seja cuidadosamente ponderada face às suas limitações e à especificidade dos seus campos de aplicação.

## 9 – AGRADECIMENTOS

Ao colega Killian Coghlan, co-autor deste artigo, a sua inestimável ajuda  
COGHLAN, K. - Ménard ([killian.coghlan@menard-mail.com](mailto:killian.coghlan@menard-mail.com))

Aos colegas Fabrice Mathieu, Jerome Racinais e Frans Visser que gentilmente cederam a informação pertinente para os casos de obra:

MATHIEU, F. – Soletanche-Bachy ([fabrice.mathieu@soletanche-bachy.com](mailto:fabrice.mathieu@soletanche-bachy.com))  
RACINAIS, J. – Ménard ([jerome.racinais@menard-mail.com](mailto:jerome.racinais@menard-mail.com))  
VISSER, F. – Soletanche-Bachy ([frans.visser@durasp.co.za](mailto:frans.visser@durasp.co.za))

Por último o meu agradecimento aos Professores Manuel Matos Fernandes (FEUP), meu estimado professor, e António Topa Gomes (FEUP), meu estimado colega de curso, pelos seus ensinamentos, pela amizade de sempre e pelo convite que me foi endereçado.