

DESENVOLVIMENTO DA GEOTECNIA. ALGUMAS PERSPETIVAS ESPECÍFICAS (2)

Emerging trends in geotechnical engineering – Part 4

António Silva Cardoso*

RESUMO – A engenharia geotécnica é um dos primeiros domínios técnico-científicos a intervir em qualquer projeto de infraestruturas ou de desenvolvimento urbano, sendo, muitas vezes, o mais importante. No decurso dos tempos muitas inovações metodológicas, analíticas, numéricas e tecnológicas foram sendo descobertas e utilizadas nas investigações de campo e de laboratório e nas áreas da análise, do projeto e da construção de estruturas geotécnicas. Os campos em que a geotecnia tem forte intervenção e onde essas inovações foram sendo introduzidas são muito vastos e espraíam-se por escalas muito diversas. A globalização mundial, a utilização não sustentável dos recursos, as alterações ambientais causadas por razões antrópicas, o aumento dos desastres naturais e a carência de infraestruturas para dar resposta às necessidades das populações criam um quadro que condiciona decisivamente a evolução da engenharia geotécnica. Neste conjunto de quatro artigos perspetiva-se o futuro da geotecnia: parte-se de uma caracterização das diversas condicionantes, tanto sociais, económicas e ambientais, como geotécnicas, e das necessidades das sociedades humanas e apontam-se vias de desenvolvimento futuro consideradas como das mais relevantes.

SYNOPSIS – Geotechnical engineering is one of the first technical and scientific fields to intervene in any infrastructure or urban development project and, in many cases, it is the most important. In the course of time, many methodological, analytical, numerical and technological innovations have been discovered and used in field and laboratory investigations and in the areas of analysis, design and construction of geotechnical structures. The fields in which geotechnics has strong intervention and where these innovations have been introduced are very large and spread out over very different scales. The world globalization, the unsustainable use of resources, the climate changes caused by human activities, the increase of natural disasters and the lack of infrastructure to meet people's needs influence decisively the evolution of geotechnical engineering. In this set of four papers, a perspective of the future of geotechnics is outlined, starting with the characterization of various conditioning factors and of the needs of human societies.

PALAVRAS CHAVE – Engenharia geotécnica, tendências emergentes, fatores condicionantes.

KEYWORDS – Geotechnical engineering, emerging trends, conditioning factors.

1 – INTRODUÇÃO

Num conjunto sequencial de quatro artigos fornece-se uma perspetiva do desenvolvimento futuro da geotecnia, partindo de uma caracterização das condicionantes sociais, económicas e ambientais atuais e das necessidades das sociedades humanas. A este propósito é relevante o que, em 2011, disse Peter Hansford ao tomar posse como Presidente da *Institution of Civil Engineers*: “(...) *Continuamos a precisar de mais infraestruturas de transporte, (...) de mais capacidade de geração de energia, de melhores instalações hidráulicas e de recolha e tratamento de resíduos e de todos os outros ingredientes essenciais para apoiar a nossa economia. Em todo o mundo, as comunidades humanas precisam desesperadamente de novas infraestruturas ou de melhoramento*

* Professor, Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto. E-mail: scardoso@fe.up.pt

das existentes para suportar uma população mundial em crescimento para 9 mil milhões de pessoas em 2050 (...)”.

A perspetiva que se desenvolve no conjunto de textos é, naturalmente, parcelar e incompleta, não pretendendo mais do que, por um lado, enunciar um conjunto de fatores condicionantes, tanto sociais, económicos e ambientais, como próprios da disciplina, isto é, geotécnicos, e, por outro lado, apontar vias de desenvolvimento futuro que ao autor parecem, umas (as condicionantes) e outras (as vias de desenvolvimento), das mais relevantes. Por isso, como não podia deixar de ser, é uma perspetiva pessoal, condicionada pelos interesses e pela experiência do autor.

No primeiro artigo trata-se as questões de enquadramento (Cardoso, 2015). No segundo artigo procede-se a uma breve caracterização das necessidades infraestruturais mundiais, usando dados quantificados elaborados por organizações nacionais e internacionais, e enuncia-se perspetivas genéricas para a evolução da geotecnia (Cardoso, 2016). Nos dois últimos artigos aponta-se rumos focalizados em certos temas (perspetivas específicas), que ao autor parecem interessantes e úteis para o futuro. Essas abordagens são levadas a cabo sem qualquer pretensão de exaustividade que, aliás, seria impossível, dados os vastíssimos campos por onde se espraia a geotecnia.

No primeiro destes dois últimos artigos (Cardoso e Alves Costa, 2016) traça-se uma perspetiva envolvente das questões específicas que dizem respeito ao desenvolvimento da geotecnia, relativas quer aos domínios base fundamentais da geotecnia quer aos domínios mais diretamente relacionados com a resolução de problemas, e, depois, trata-se os seguintes temas: i) novas tecnologias aplicadas à geotecnia, designadamente a biotecnologia, os métodos geofísicos, a deteção remota, as tecnologias da informação, os sensores e sistemas de observação e a nanotecnologia; ii) modelos constituintes dos materiais geotécnicos; iii) metodologias de análise e de resolução de problemas.

O presente e último artigo da série está dedicado às questões relativas ao melhoramento e reforço de solos e à energia geotérmica.

2 – MELHORAMENTO E REFORÇO DE TERRENOS

2.1 – Classificação dos métodos de melhoramento e reforço de terreno

Em geral, as técnicas de melhoramento e reforço de terrenos têm como objetivo o aumento da resistência e a diminuição da deformabilidade e/ou a alteração da permeabilidade (em regra a sua diminuição). Sob a designação “estabilização de solos” agrupam-se as técnicas que têm por objetivo melhorar a resistência mecânica, diminuir a deformabilidade e reduzir a possibilidade de amolecimento em presença da água através da ligação entre as partículas ou controlando a presença da água ou por ambos os meios. Os processos mais simples de estabilização são a compactação e a drenagem; outros processos consistem em melhorar a granulometria ou adicionar ligantes; enfim, os solos podem ser estabilizados por diferentes processos, os quais podem ser agrupados simplifadamente do seguinte modo:

- estabilização mecânica – por aplicação de cargas estáticas (com drenagem) ou dinâmicas (vibração) ou incorporando elementos estruturais com características geométricas e mecânicas que, quando devidamente orientados, permitem suprir certas deficiências dos terrenos (alteração da estrutura do maciço);
- estabilização termodinâmica;
- estabilização química – a estabilização depende da reação entre o estabilizador (material cimentício) e os minerais do solo;

- estabilização bioquímica – usa-se a biotecnologia para promover a ligação entre as partículas ou o preenchimento dos vazios.

Chu *et al.* (2009) procederam recentemente à atualização da classificação das técnicas de melhoramento e reforço, como se pode ver no Quadro 1. Na Figura 1 indicam-se os campos de aplicação de alguns dos métodos referenciados no Quadro 1. O que ressalta imediatamente do quadro e da figura é a grande variedade de metodologias existentes, apelando umas e outras a fenómenos de diferente tipo – mecânico, hidromecânico, termodinâmico, químico, etc. – com o objetivo de melhorar alguma ou algumas das propriedades do terreno original ou de alterar a sua estrutura introduzindo nela elementos – dos mais diversos tipos – que supram as suas fraquezas.

Quadro 1 – Métodos de melhoramento e reforço de terrenos (Chu *et al.*, 2009).

Método	Princípio
A Melhoramento sem aditivos de solos não coesivos e de aterros	
A1. Compactação dinâmica	Densificação de solos granulares através do impacto na superfície de massas pesadas a muito pesadas
A2. Vibrocompactação	Densificação de solos granulares usando vibradores alongados inseridos no terreno
A3. Compactação com explosivos	Ondas de choque e vibrações provocam o assentamento do solo granular por compactação ou liquefação
A4. Compactação por pulsos elétricos	Densificação de solos granulares usando ondas de choque e energia geradas por pulsos elétricos de muito alta voltagem
A5. Compactação superficial (incluindo impactos rápidos)	Compactação de aterros/solos à superfície ou a profundidade pequena usando diferentes equipamentos de compactação
B. Melhoramento sem aditivos de solos coesivos	
B1. Substituição / deslocamento (incluindo redução da carga com materiais leves)	Remoção dos maus solos por escavação ou deslocamento e sua substituição por solos bons ou rochas. Pode-se usar materiais leves para reduzir a carga ou a pressão de terras
B2. Pré-carga com aterros (incluindo drenos verticais)	Aterro é aplicado e removido para pré-consolidar o solo compressível, reduzindo a sua compressibilidade posterior
B3. Pré-carga usando vácuo (possível combinação com aterro)	Pressões de vácuo até 90 kPa para pré-consolidar o solo compressível, reduzindo a sua compressibilidade posterior
B4. Consolidação dinâmica com drenagem melhorada (incluindo o uso de vácuo)	Similar à compactação dinâmica mas com drenos verticais ou horizontais (ou conjuntamente com aplicação de vácuo) para dissipar as pressões neutras geradas no solo
B5. Consolidação electro-osmótica ou electro-cinética	A corrente contínua faz com que a água ou as soluções fluam dos ânodos para os cátodos instalados no solo
B6. Estabilização térmica por aquecimento ou congelação	Alteração permanente ou temporária das propriedades físicas ou mecânicas do solo através de aquecimento ou congelação
B7. Compactação por hidro-explosão	Solos colapsíveis (loess) compactados pela ação combinada de encharcamento e explosão profunda ao longo do furo
C. Melhoramento com aditivos ou inclusões	
C1. Vibro-substituição ou colunas de brita	Furos abertos a jato em solos finos moles são preenchidos por solos granulares densamente compactados, formando colunas
C2. Substituição dinâmica	Agregados são introduzidos no solo através de impactos dinâmicos de elevada energia para formar colunas. Usam-se areias, seixos, calhaus, pedras e resíduos de demolição

Quadro 1 (Cont.) – Métodos de melhoramento e reforço de terrenos (Chu *et al.*, 2009).

Método	Princípio
C3. Estacas de areia compactada	Através de tubagem a areia é introduzida no terreno e compactada por vibração ou impacto para formar uma coluna
C4. Colunas confinadas por geotêxteis	Colunas formadas em furos cilíndricos forrados por um geotêxtil (fechados na base) e preenchidos com areia
C5. Inclusões rígidas (ou fundação compósita, ver Quadro 2)	Estacas e corpos ou colunas rígidas ou semi-rígidas pré-fabricadas ou formadas <i>in situ</i> para reforçar solos moles
C6. Colunas reforçadas com geossintéticos ou aterros assentes em estacas	Uso de colunas/inclusões rígidas ou semi-rígidas e de grelhas de geossintéticos para melhorar a estabilidade e reduzir os assentamentos de aterros
C7. Métodos micro biológicos	Uso de materiais microbiológicos para modificar o solo, visando aumentar a resistência e diminuir a permeabilidade
C8. Outros métodos	Não convencionais: formação de estacas de areia usando explosivos; uso de produtos naturais (bambu, sisal, etc.); etc.
D. Melhoramento com adição de caldas	
D1. Injeção de partículas	Solos granulares ou cavidades/fissuras em solos e rochas são injetados com cimento ou outras caldas de partículas, para aumentar a resistência e/ou reduzir a permeabilidade
D2. Injeções químicas	Soluções de 2 ou mais produtos químicos reagem nos poros do solo, formando um gel ou um precipitado sólido, para aumentar a resistência e/ou reduzir a permeabilidade
D3. Técnicas de mistura (incluindo pré mistura e mistura em prof.)	Solo misturado com cimento, cal ou outros ligantes, <i>in situ</i> , usando equipamento de mistura, ou antes da colocação
D4. <i>Jet grouting</i>	O solo é erodido em profundidade por jatos com velocidade elevada, sendo injetada calda para formar colunas e painéis
D5. Injeções de compactação	Caldas muito rígidas são injetadas localmente, densificando o solo solto ou levantando o terreno que tenha assentado
D6. Injeções de compensação	Suspensões de partículas de media a elevada viscosidade são injetadas no terreno, entre a superfície da escavação e a estrutura, para evitar ou reduzir os assentamentos desta devidos à abertura daquela
E. Reforço de terrenos	
E1. Terreno estabilizado mecanicamente (MSE) ou com geossintéticos	A resistência à tração de aços ou de materiais geossintéticos é usada para melhorar a resistência ao corte do solo e a estabilidade de estradas, fundações, estruturas de suporte, etc.
E2. Ancoragens no terreno ou pregagens em solos	Uso da resistência à tração de pregagens ou ancoragens para melhorar a estabilidade de taludes e de estruturas de suporte
E3. Métodos biológicos usando a vegetação	Utilização das raízes da vegetação para estabilizar taludes

Acresce que as técnicas de melhoramento e reforço dos terrenos continuam a diversificar-se e a inovar-se, quer no que respeita à invocação de novos princípios que fundamentam novas metodologias, quer no que concerne ao emprego de equipamentos com capacidades cada vez maiores, quer ainda no tocante à utilização de novos materiais de mistura ou de reforço. No primeiro caso inclui-se o recurso à biotecnologia e às nanotecnologias (ver Cardoso e Alves Costa, 2016); no segundo caso o exemplo mais espetacular talvez seja a evolução que têm conhecido as metodologias de mistura em profundidade (DMM, *deep mixing method*); no terceiro caso refira-se apenas o portentoso desenvolvimento dos geossintéticos.

Quadro 2 – Tipos de inclusões rígidas – metodologias C5 do Quadro 1 (Chu *et al.*, 2009).

Método	Descrição/Mecanismo
Colunas de módulo controlado (<i>Controlled modulus columns - CMC</i>)	Um furo é aberto por cravação e, em seguida, é formada uma coluna, com 250 a 400 mm de diâmetro, por injeção à pressão
Estaca com alargamentos múltiplos (<i>Multiple stepped pile</i>)	No decurso da sua abertura o furo é pontualmente alargado a várias profundidades, pelo que a coluna formada por injeção ou com betão fica com alargamentos a dados intervalos
Estacas injetadas de brita ou de cascalho	Após a construção da coluna de brita ou de cascalho procede-se à sua injeção, de baixo para cima, usando um tubo pré-instalado
Colunas de betão vibrado (<i>Vibro-concrete column</i>)	Usa-se betão para construir colunas através de um método similar ao empregue para executar colunas de brita sem água e com alimentação na base (<i>bottom-feed dry stone columns</i>)
Estacas moldadas de betão, de grande diâmetro e ocas	Uma estaca oca de betão de grande diâmetro (1 a 1.2 m) é moldada in situ usando uma cofragem (constituída por 2 tubos cilíndricos) inserida no terreno
Estacas com forma X ou Y (<i>X or Y shaped pile</i>)	Execução de estacas injetadas ou de betão inserindo no terreno cofragens com a forma de X ou Y

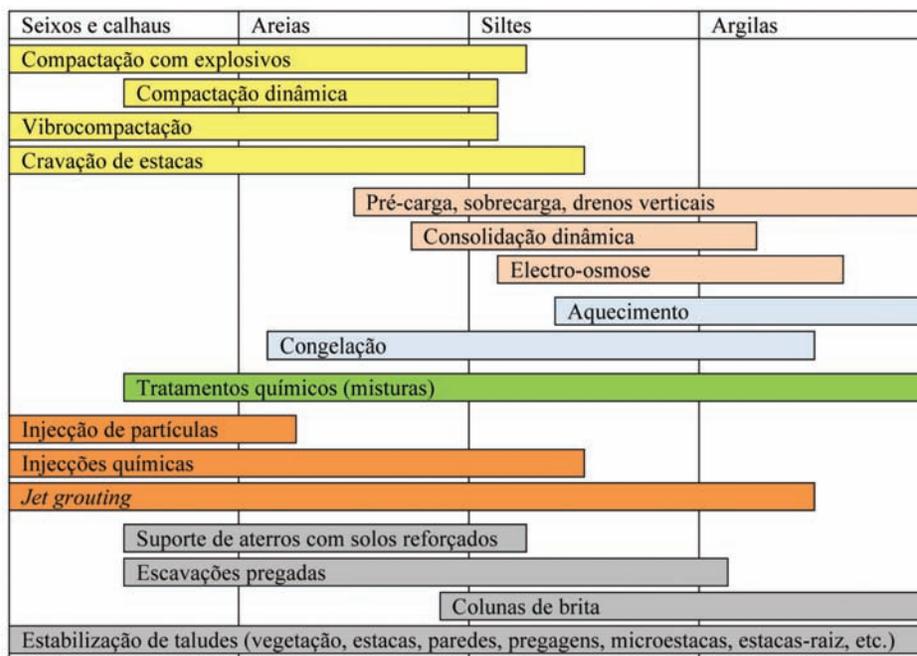


Fig. 1 – Campo de aplicação de alguns métodos de melhoria e reforço de terrenos.

Num texto anterior (Cardoso e Alves Costa, 2016) deu-se conta das portas que se têm vindo a abrir no que concerne à utilização das novas tecnologias e, sobretudo, da biotecnologia no melhoramento das propriedades dos terrenos. No que segue dão-se alguns exemplos de evoluções recentes que, muito provavelmente, prosseguirão no futuro. Selecionaram-se 4 áreas: a) recurso ao rebaixamento do nível freático; b) pregagens em solos; c) reforço com geossintéticos; d) técnicas de mistura em profundidade (DMM).

2.2 – Reforço de solos recorrendo ao rebaixamento do nível freático – Estação de Salgueiros

A técnica que se apresenta em seguida tem sido usada sobretudo no Brasil (França *et al.*, 2009). A título exemplificativo, descreve-se uma obra realizada para a estação de Salgueiros do metro do Porto, que foi estudada por Topa Gomes e coautores (Topa Gomes, 2009; Topa Gomes *et al.*, 2007, 2008 e 2011). A obra, do tipo *cut and cover*, tinha dimensões médias em planta da ordem dos 80m por 35m e uma profundidade de 22m (Figura 2). As grandes dimensões do espaço livre disponível para construir a estação permitiram que se tenha optado por uma solução fortemente inovadora, radicalmente diferente das tradicionais, que consistiu em envolver a forma retangular em planta da estação dentro de duas elipses, tirando partido do efeito de arco associado a esta nova forma. O progresso da construção baseou-se no Método de Escavação Sequencial, mas aplicado na direção vertical. Após a construção da viga de coroamento, com secção de $0.60 \times 1.00\text{m}^2$, procedeu-se à execução sequencial da escavação e da construção do suporte, tendo cada anel 1.8m de altura. O suporte consistiu numa membrana de betão projetado com espessura variável, de 0.30m , mais à superfície, até 0.60m , junto da base da escavação, com armaduras em ambas as faces (Figura 2b).

As forças não equilibradas resultantes da forma adotada, as quais não podiam ser absorvidas pela membrana pouco espessa de betão projetado, obrigaram à construção de um pórtico robusto (devido ao elevado valor daquelas forças) de betão armado, constituído por dois pilares circulares com 3.50m de diâmetro e por uma viga retangular com secção de $1.60 \times 2.00\text{m}^2$, executados antes do começo da escavação.

A escavação (55.000 m^3) ficou completa ao fim de 36 semanas, assim distribuídas: a) execução dos dois poços circulares – 12 semanas; b) execução da viga de coroamento – 1 semana; c) execução da viga transversal, apoiada nos dois poços circulares – 1 semana; d) escavação sequencial dos 11 níveis (anéis) – $2 \times 11 = 22$ semanas. O método construtivo é, portanto, muito eficiente, tanto mais que cerca de $1/3$ das 36 semanas foi usado na construção dos poços verticais, com 3.5m de diâmetro.

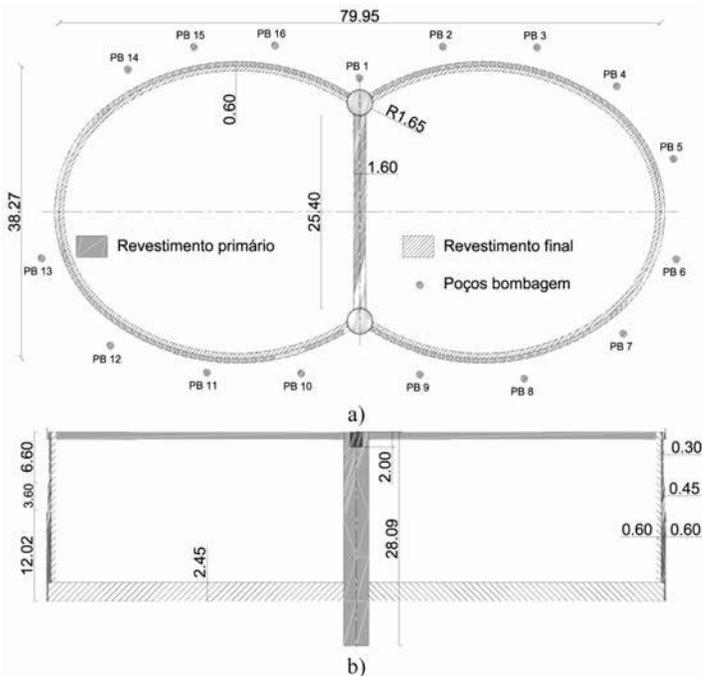


Fig. 2 – Estação de Salgueiros: a) planta com a localização dos 16 poços de bombagem (PB); b) corte longitudinal.

No Quadro 3 resume-se a caracterização geotécnica. A obra em apreço foi executada em solos residuais de granito, com uma certa coesão. Além disso, a existência de um nível de sucção adequado contribui significativamente para o aumento da rigidez e da resistência do terreno. Assim, a drenagem de forma a assegurar que o nível freático se situava constantemente sob a base da escavação assumiu uma importância decisiva. O rebaixamento prévio do nível freático foi obtido por bombagem em 16 *well points*, abertos a cerca de 2m de distância do perímetro da escavação (Figura 2a) e com comprimentos da ordem dos 31m. As bombas submersíveis asseguravam um débito de 3m³/h, cada uma. De forma a aumentar a garantia de que subsistiam condições não saturadas no terreno mais próximo do suporte, foi ainda instalado durante a escavação um sistema redundante constituído por drenos sub-horizontais curtos com 2 polegadas de diâmetro e comprimento de 4m.

Quadro 3 – Definição das unidades geotécnicas e parâmetros geotécnicos considerados.

Formação Espessura (m)		SPT GA // GF // DD	GSI	γ (kN/m ³)	c' (kPa)	ϕ' ($^{\circ}$)	E (MPa)
Aterro e aluviões 2,0 m	g7	–		17 – 20 (19)	0 – 10 (0)	25 – 30 (28)	20 – 70 (vp)
Solo residual 3,0 m	g6	SPT < 50 W6 // n.a. // n.a.	n.a.	18 – 20 (19)	5 – 30 (10)	30 – 35 (32)	30 – 90 (vp)
Solo residual 15,0 m	g5	SPT > 50 W5 // (F5) // (D5)	<20	19 – 21 (20)	10 – 50 (40)	35 – 38 (35)	70 – 200 (vp)
Maçço rochoso 15,0 m	g4	– W4 // F4-5 // D4-5	15 – 30	22 – 24 (21)	80 – 150 (100)	35 – 40 (40)	200 – 600 (500)
Maçço rochoso –	g3	– W3 // F3-4 // D3-4	30 – 45	23 – 25	100 – 350	40 – 45	500 – 2000

GA - Grau de alteração; GF - Grau de fracturação; DD - Distância entre descontinuidades; (vp) – variável em profundidade. Maçço rochoso - granito médio a grosseiro, esbranquiçado (“Granito do Porto”). Todas as formações: coeficiente de Poisson $\nu = 0,3$; coeficiente de impulso em repouso $K_0 = 0,5$.

Junto com os inclinómetros I1 a I4 (Figura 5a) instalaram-se piezómetros com a mesma designação. Na Figura 3 apresenta-se a evolução da profundidade a que se encontrava o nível freático nos piezómetros, confirmando-se assim a eficácia do sistema de rebaixamento, posicionando-se o nível freático constantemente sob a base da escavação.

A Figura 4a mostra o aspecto da obra no final da escavação. A Figura 4b apresenta a malha de elementos finitos deformada obtida nos cálculos numéricos. Note-se o importante deslocamento horizontal experimentado pelos poços, donde resulta o levantamento da viga, rigidamente ligada a eles; as medições dos deslocamentos verticais a meio vão da viga, representado na Figura 3b, confirmam claramente este comportamento. No início é bem visível a descida do meio vão, cerca de 0,6cm, devido ao peso próprio; este movimento ocorre só após a escavação do terceiro anel porque até essa altura não tinha sido retirado o terreno sob a viga. À medida que prossegue a escavação, ocorre um levantamento contínuo da viga pelas razões referidas. Repare-se que o levantamento da viga se prolonga bem para além do fim da escavação: de cerca de 2,5cm, no final da escavação, aumenta para cerca de 3,0cm, cerca de meio ano depois; este comportamento está associado, sobretudo, a fenómenos de fluência do betão que assumem, em peças muito esforçadas, grande relevância.

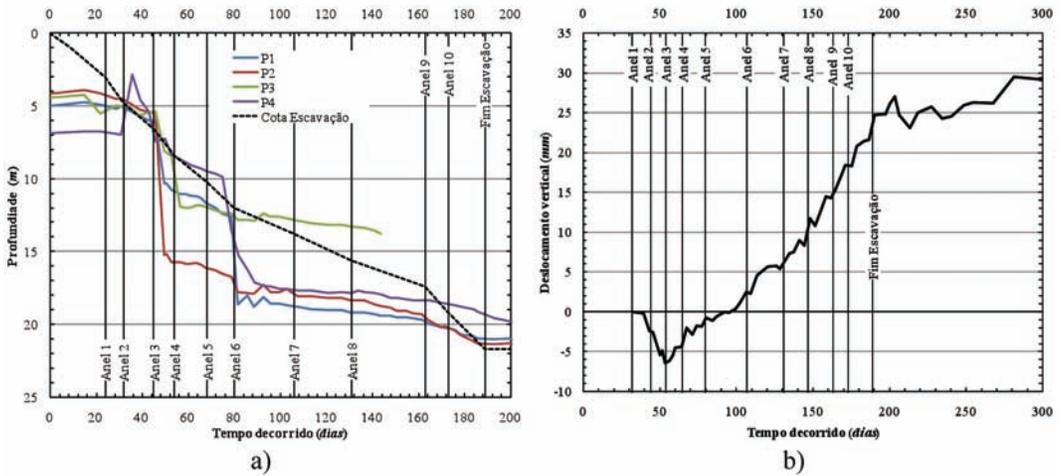


Fig. 3 – Estação de Salgueiros: a) evolução do nível de água nos piezómetros; b) assentamentos medidos no ponto a meio vão da viga transversal.

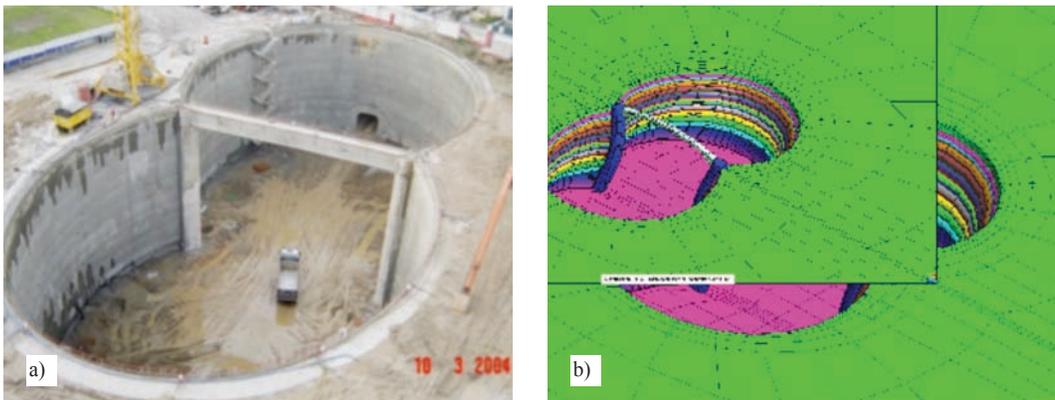


Fig. 4 – Final da escavação da Estação Salgueiros: a) aspeto geral da obra; b) deformada geral da estação obtida nos cálculos numéricos.

Na Figura 5 apresenta-se o plano de monitorização da escavação e a deformada em planta da viga de coroamento na fase final da escavação. Por sua vez, na Figura 6 mostra-se a evolução: a) da deformada do inclinómetro I4, instalado a 2m da parede, que foi o que registou maiores deslocamentos; o deslocamento horizontal máximo ocorreu a cerca de 12m de profundidade e atingiu 3,7cm, isto é, 0,17% da profundidade da escavação; b) dos assentamentos da viga de coroamento, os quais, no final da escavação, atingiram valores entre 2,3 e 4,1cm, ou seja, 0,10 a 0,19% da profundidade da escavação.

Na Figura 7 apresenta-se a evolução dos assentamentos nos 4 edifícios mais próximos da escavação, todos com andamentos muito semelhantes e valores máximos de 6 a 8 mm. Da figura consta também a posição do nível freático num dos piezómetros encostado à escavação.

Note-se que os assentamentos estabilizaram mais ou menos no momento em que se iniciou a escavação dos últimos níveis (anel 8 em diante); ora como a escavação até ao anel 7, sensivelmente até aos 15m de profundidade, dada a distância dos edifícios, não deve ter sido a causa dos assentamentos, conclui-se que, muito provavelmente, grande parte dos movimentos registados está

associada ao rebaixamento do nível freático. Nos piezômetros existentes na Rua Augusto Lessa, mais próximos da escavação que os próprios edifícios, o rebaixamento não ultrapassou a dezena de metros, o qual terá sido o responsável pelos assentamentos acima referidos. Estes assentamentos são bastante mais uniformes que os movimentos associados à escavação, como o comprovam as medições efetuadas.

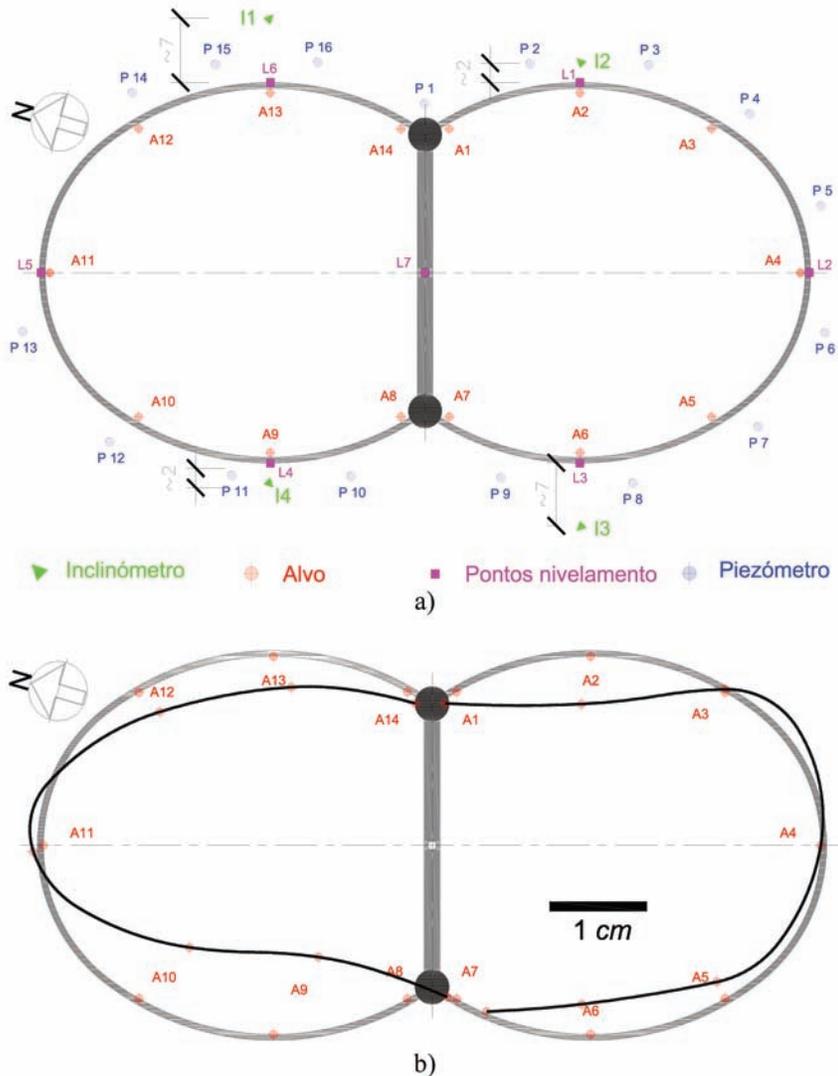


Fig. 5 – Observação do comportamento da escavação da estação de Salgueiros: a) plano de monitorização; b) deformada em planta da viga de coroamento no final da escavação.

Em resumo, uma escavação de grandes dimensões foi executada por uma técnica incomum com muito bons resultados em termos de deslocamentos associados à escavação. As razões deste bom comportamento, apesar da profundidade da escavação, são fundamentalmente três: a) as características “razoáveis” do maciço; b) a forma da escavação; em termos ótimos devia ser circular ou, no mínimo, elíptica com os eixos não demasiado diferentes, para ser possível uma forte mobilização do efeito de arco; c) o rebaixamento no nível freático de modo a garantir uma condição

de não saturação e tirar partido do melhoramento das características mecânicas associado a essa condição; por isso, a drenagem, de forma a assegurar que o nível freático se situa constantemente sob a base da escavação, assume uma importância decisiva.

Um aspeto que haverá que melhor conhecer no futuro é o efeito do rebaixamento do nível freático no assentamento de edifícios vizinhos.

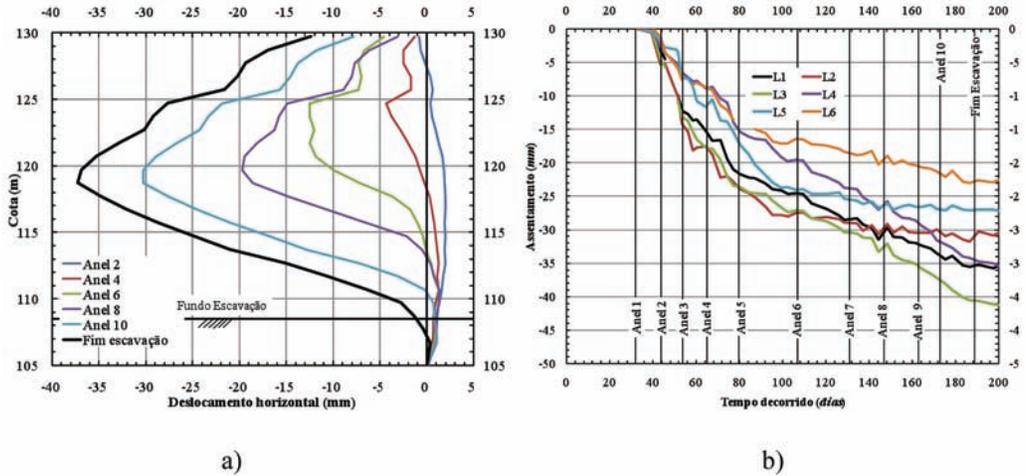


Fig. 6 – Observação do comportamento da escavação da estação de Salgueiros: a) evolução da deformada do inclinómetro I4; b) evolução dos assentamentos da viga de coroamento.

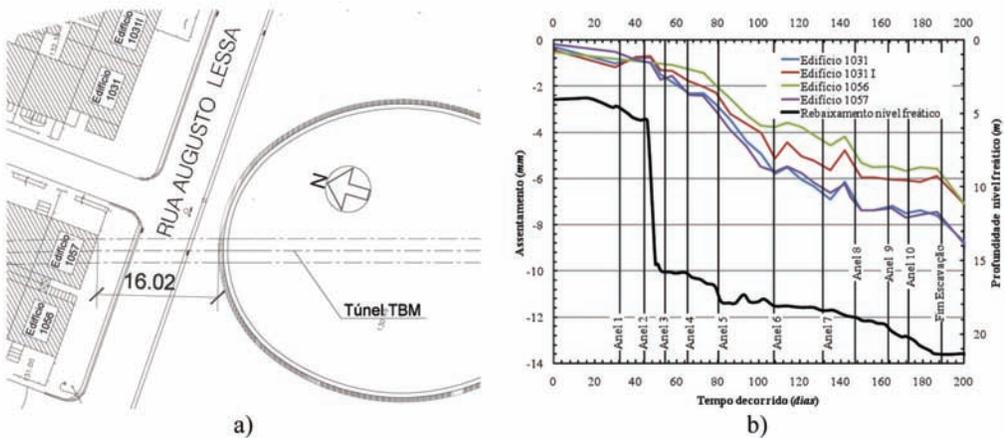


Fig. 7 – Edifícios mais próximos; a) localização; b) assentamentos ao longo do tempo.

2.3 – Pregagens em solos

A escavação pregada executada em Washington para a construção da Embaixada da República Popular da China teve dimensões muito pouco comuns pelo que é um bom exemplo das potencialidades da técnica aplicada. A obra está descrita em Bonita *et al.* (2006). Na Figura 8 apresenta-se a planta da obra e um corte na direção Norte-Sul.

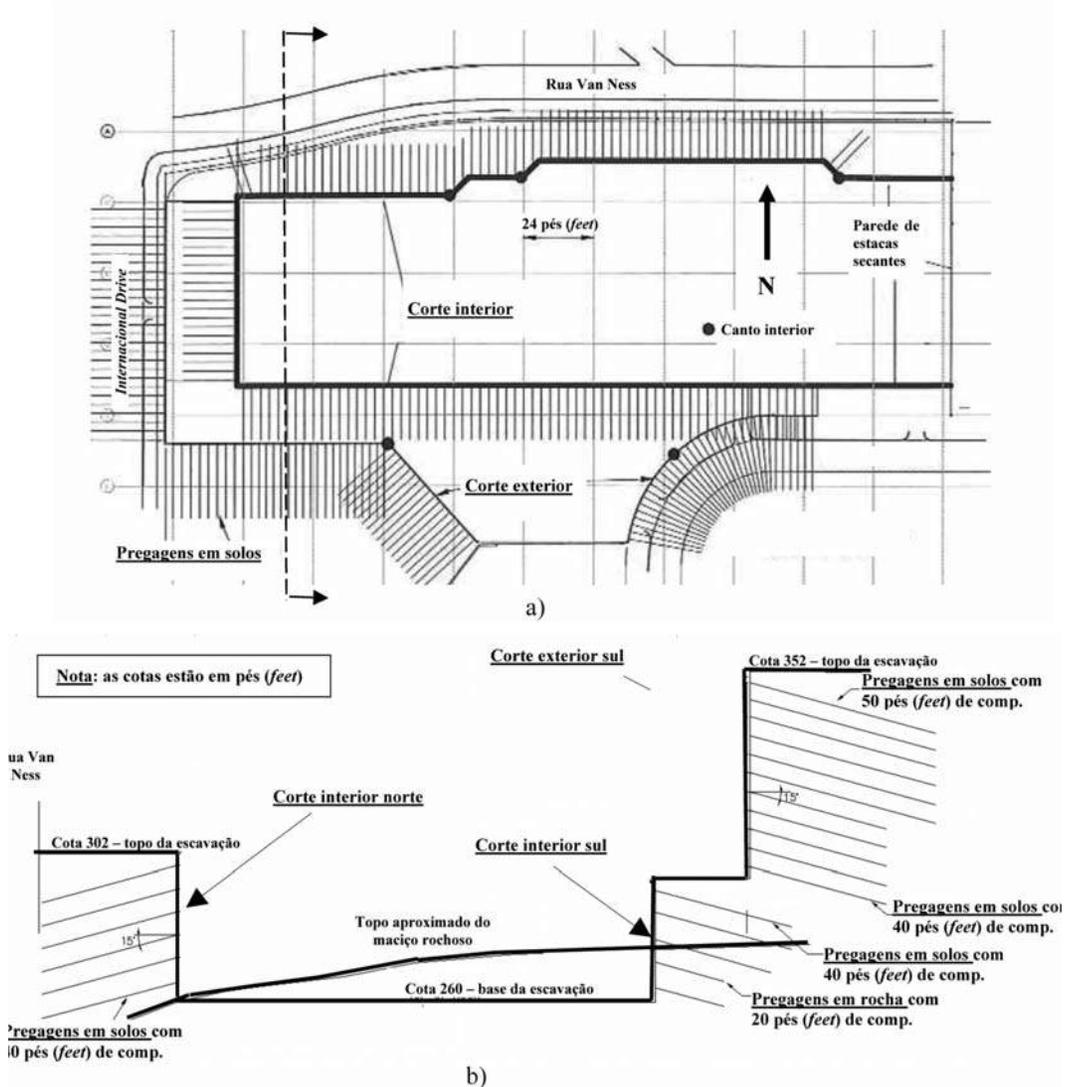


Fig. 8 – Escavação pregada para a Embaixada da República Popular da China em Washington: a) planta; b) corte N-S (Bonita *et al.*, 2006).

O terreno era constituído por uma camada superficial de aterros soltos a medianamente compactos, com 3,1 a 6,2m de espessura, seguida de um solo residual com a composição variando entre areia siltosa (SM) e silte arenoso (ML), resultado da alteração da rocha subjacente, caracterizada como gneisse. As características do solo residual melhoravam com a profundidade, de medianamente compacto ($N_{SPT} = 15$) a muito compacto ($N_{SPT} > 30$). O *bedrock* aflorava próximo da base da escavação, no máximo nos últimos 4 a 5m (ver Figura 8b). Por sua vez, o nível freático foi detetado cerca de 5,2m acima da cota final da escavação.

As profundidades maiores da escavação situavam-se ao longo do lado Sul da propriedade (ver Figura 8b), com um valor máximo de 29,9m. O corte único mais profundo tinha 19,8m (65 *feet*), mostrado na Figura 9a, mas a secção crítica era a representada na Figura 9b, constituída por um corte exterior (superior) com 18,0m, uma banquetta horizontal com 10,7m de largura e um segundo corte interior (inferior) com 10,1m.



Fig. 9 – a) Secção correspondente à escavação superior (exterior) mais profunda (19,8m);
 b) secção crítica, corte superior + corte inferior de 18,0 + 10,1 = 28,1m, com banqueta de 10,7m de largura. (Bonita *et al.*, 2006).

Os cortes exteriores (superiores) foram revestidos com uma membrana de betão projetado com 20,3cm (8 *inches*) de espessura; nos interiores (inferiores), que envolviam um solo mais competente, a espessura de betão projetado foi reduzida para 10,1cm (4 *inches*).

Os cortes superiores situados a Sul foram dotados de 11 níveis de pregagens dispostas numa malha de 1,5 x 1,5m, inclinadas 15° em relação à horizontal e com comprimentos de 15,2m, os 6 primeiros níveis, e 12,2m, os restantes. As pregagens eram constituídas por varões de aço com diâmetro de 32mm, as dos 6 primeiros níveis, e de 29mm, as dos restantes.

Nos cortes interiores (inferiores), com profundidades máximas de 10,1m a Sul e 12,8m a Norte foram usadas pregagens para solos ou para rochas conforme o tipo de terreno que se apresentava na frente de escavação, sendo a decisão tomada localmente. Todas as pregagens foram instaladas com inclinações de 15° em relação à horizontal; os varões constituintes das pregagens para solos tinham 29mm de diâmetro e 12,2m de comprimento e os das pregagens para rochas 25mm e 7,6m, respetivamente.

Os furos para instalação das pregagens foram previstos com 20,3cm (8 polegadas) de diâmetro, o qual foi reduzido para 12,7cm (5 polegadas) no início da obra.

Na Figura 10 mostra-se os resultados de algumas das medições dos deslocamentos horizontais. Com base nestes e noutros resultados Bonita *et al.* (2006) concluem nomeadamente o seguinte:

1. Os movimentos horizontais da parede situaram-se entre 0,25% e 0,35% da altura das paredes exteriores (superiores) e entre 0,1% e 0,2% da altura das paredes interiores (inferiores), que afetam terrenos menos deformáveis;
2. Os movimentos verticais da parede situaram-se entre 0,15% e 0,25% da altura das paredes exteriores (superiores) e entre 0,05% e 0,1% da altura das paredes interiores (inferiores);
3. Os movimentos das paredes ocorreram imediatamente após os cortes, não se tendo observado movimentos de fluência;
4. A velocidade de deformação era claramente superior quando se aumentava o ritmo de execução dos sucessivos níveis;
5. A aplicação de explosivos, necessária para desmontar a rocha que apareceu na base da escavação, não provocou movimentos assinaláveis.

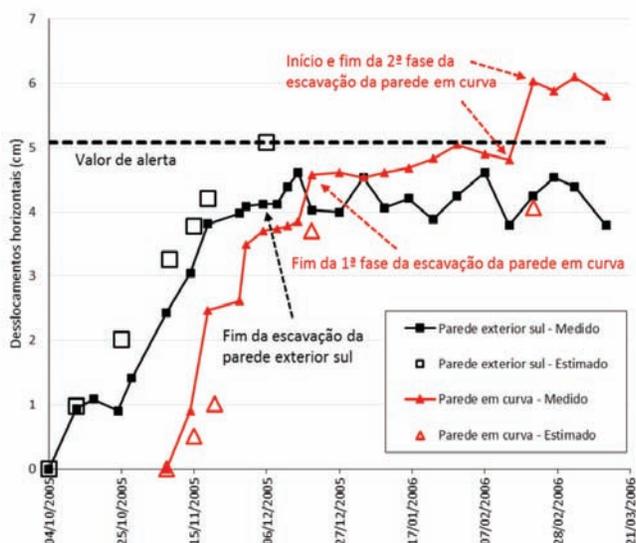


Fig. 10 – Deslocamentos horizontais das paredes exteriores (adaptado de Bonita *et al.*, 2006).

2.4 – Reforço com geossintéticos

A construção do novo aeroporto de Sikkim, na Índia, exigiu a construção de cerca de 1,7km de muros de contenção de aterros. Atendendo às características do local de implantação do aeroporto, era obrigatória a compensação total entre os volumes de escavação e de aterro necessários para a construção da plataforma da pista. Esta obra foi descrita por Rimoldi *et al.* (2013).

O terreno era constituído por misturas de solo e rocha, resultantes dos desmontes; as camadas superiores estavam muito alteradas e fragmentadas, mas com a profundidade a alteração diminuía. Por outro lado, tendo a região de Sikkim uma muito elevada pluviosidade, a drenagem constituía uma questão central do projeto. Tendo presente os vários fatores condicionantes, optou-se por uma estrutura MSE (*mechanically stabilized earth*) com geogrelhas como elementos de reforço primário e grelhas metálicas com 3m de comprimento como reforço secundário junto à face, a qual é constituída por gabiões. A Figura 11a mostra um aspeto da instalação de um nível de geogrelhas e a Figura 11b inclui um pormenor do sistema de reforço junto à face. As geogrelhas, com resistência à tração variando entre 200 e 800 kN/m, foram colocadas com espaçamentos dependentes da altura dos gabiões, com um valor máximo de 2,4m.

Neste tipo de estruturas, os reforços primários fornecem a resistência à tração necessária para garantir a estabilidade global com um dado fator de segurança, enquanto os reforços secundários garantem a estabilidade local, junto à face, assegurando que nenhum mecanismo de escorregamento, rotação ou arranque localizado possa ocorrer.

A altura máxima da estrutura atingiu os 86,96m, como mostra a Figura 12a; segundo Rimoldi *et al.* (2013), este muro deve ser o muro reforçado mais alto do mundo. A Figura 12b mostra outra zona do muro com a face já vegetalizada. A Figura 13 apresenta um corte esquemático do muro numa zona com mais de 70m de altura, bem como o resultado de um dos cálculos efetuados.

O aeroporto de Sikkim fica localizado numa zona classificada como de intensidade sísmica severa, de acordo com a normalização indiana. Esta também foi uma das razões que justificou a opção por um muro reforçado para a contenção dos aterros. Em 18 de setembro de 2011 ocorreu na zona um sismo de magnitude 6.9 na escala de Richter não se tendo detetado qualquer dano na

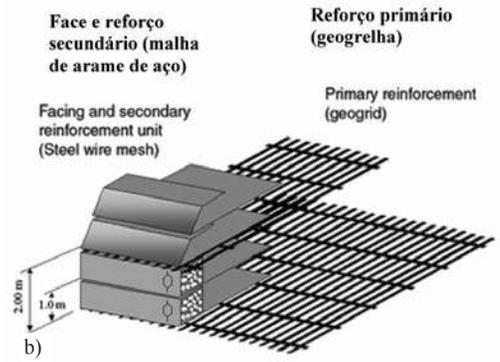


Fig. 11 – a) Instalação de um nível de geogrelhas; b) pormenor do sistema de reforço (Rimoldi *et al.*, 2013).



Fig. 12 – Dois aspetos do muro reforçado com geogrelhas (Rimoldi *et al.*, 2013).

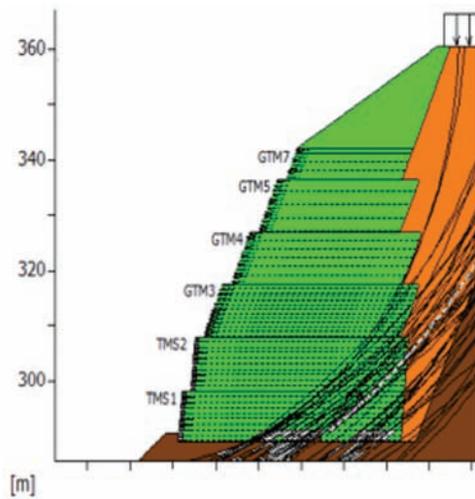


Fig. 13 – Corte esquemático do muro (mais de 70m de altura) e resultado de um cálculo (Rimoldi *et al.*, 2013).

estrutura. Rimoldi *et al.* (2013) resumem as vantagens do tipo de estruturas em consideração, salientando designadamente as seguintes:

- permeabilidade da face, garantindo a drenagem do aterro;
- flexibilidade elevada, tolerando deslocamentos diferenciais;
- versatilidade, permitindo várias soluções para a face, o que favorece nomeadamente a minimização do impacto ambiental;
- economia e simplicidade; dispensa mão-de-obra muito especializada ou equipamentos raros;
- boas características de insonorização (18-28 decibel);
- redução do impacto ambiental através da vegetalização da face.

2.5 – Técnicas de mistura em profundidade (DMM)

2.5.1 – Definição. Campo de aplicação

No âmbito da estabilização química de solos, as técnicas de mistura em profundidade (DMM, *deep mixing method*) têm tido um desenvolvimento notável. Muito recentemente (em outubro de 2013), a FHWA publicou um documento que dá conta do estado da arte (FHWA, 2013; Bruce *et al.*, 2013). O DMM é um processo de tratamento de solos *in situ* pelo qual os solos nativos (ou os aterros) são misturados com um ligante, geralmente de carácter cimentício. O novo material possui propriedades melhoradas em relação ao material original, tais como resistência mais elevada e menores deformabilidade e permeabilidade; essa melhoria reflete as características do material original, do ligante e do processo construtivo, dependendo igualmente das variáveis operacionais, do tempo de cura e das condições das solicitações impostas. A Figura 14 ilustra as dimensões que pode alcançar uma coluna de solo tratado por uma técnica DMM.



Fig. 14 – Coluna construída por um método DMM

(<http://www.geo-solutions.com/what-we-do/technologies/soil-mixing>. Acedido a 15/out/2016).

O ligante (estabilizador ou reagente) pode ser qualquer material quimicamente reativo – cimento, cal, gesso, escórias de alto-forno (*blast furnace slag*), cinzas (*fly ash*) ou outros agentes endurecedores – que possa ser usado em misturas com solo *in situ* de modo a formar colunas ou outros elementos verticais de solo tratado (Makusa, 2012).

O campo de aplicação do DMM tem vindo a ampliar-se; têm-se usado colunas isoladas ou painéis contínuos, conforme os casos, com as seguintes funções (note-se que, frequentemente, as estruturas DMM desempenham mais do que uma função): i) melhoria/reforço de terrenos; ii) tratamento de terrenos; iii) suporte de escavações; iv) mitigação da liquefação; v) controlo da percolação; vi) cortinas impermeáveis (*hydraulic cutoff walls*) e reparação de cortinas impermeáveis de solo-bentonite; vii) redução das vibrações; viii) remediação ambiental / fixação de contaminantes.

2.5.2 – Vantagens e inconvenientes

Nos Quadros 4 e 5 apresentam-se, respetivamente, as vantagens e os inconvenientes relativos do emprego das técnicas DMM considerando 3 tipos de aplicações: tratamento e melhoramento de terrenos; mitigação da liquefação; estruturas de suporte de escavações.

Quadro 4 – Vantagens relativas das técnicas DMM (FHWA, 2013).

<p>Tratamento e melhoramento dos terrenos</p> <ul style="list-style-type: none"> • Baixo custo relativo por unidade de volume até aos 40m de profundidade • A resistência dos solos tratados situa-se entre 0.5 e 4 MPa. • Layouts variáveis baseados no afastamento e diâmetro das colunas ou espessura dos painéis • Os métodos de mistura a seco garantem volumes muito pequenos de resíduos • Os resíduos dos métodos de mistura com água podem ser um excelente material de aterro • Baixo nível de vibrações e nível de ruído médio (o ruído pode ser abafado) • Elevada capacidade de produção em certas condições • O desempenho pode ser rapidamente verificado in situ • Pode usar-se em projetos marítimos • Geralmente obtêm-se bons níveis de tratamento tanto lateralmente como verticalmente • Pode ser empregue na maioria dos tipos de solos e de aterros (desde que não haja obstruções) • A execução é relativamente constante e não complicada • Excelentes dados teóricos e experimentais (de lab. e de campo) para suporte dos projetos • Económico para grandes projetos em solos muito moles, compressíveis • O espaçamento e a composição de cada coluna individual pode ser infinitamente variável • Alguns tipos (colunas de cal, por exemplo) implicam custos de mobilização baixos • Em projetos de melhoramento os valores típicos da resistência após tratamento ronda 1 MPa
<p>Mitigação da liquefação</p> <ul style="list-style-type: none"> • Excelente comportamento comprovado pelos registos feitos no Japão • Económico em grandes projetos • As propriedades do solo tratado podem alcançar cerca de 4 MPa • Qualidade da construção facilmente comprovável (em qualquer processo, secos ou como água) • As tensões laterais ou verticais que podem danificar as estruturas adjacentes são mínimas • Sem despesas de pós-construção recorrentes
<p>Paredes de contenção de escavações</p> <ul style="list-style-type: none"> • Baixo custo relativo por unidade de volume sobretudo entre os 15 e os 40m de profundidade • Não necessita de outros tipos de proteção • Permeabilidade relativamente baixa; portanto, não há necessidade de selagem adicional • Os resíduos dos métodos de mistura com água podem ser um excelente material de aterro • Baixo nível de vibrações e nível de ruído médio (o ruído pode ser abafado) • Em estado fluído é possível a introdução de elementos estruturais • Garante boa continuidade lateral • Elevada capacidade de produção em certas condições (mais de 200 m² por turno) • Pode tratar uniformemente camadas de solos heterogéneos

Quadro 5 – Inconvenientes relativos das técnicas DMM (FHWA, 2013).

<ul style="list-style-type: none">• Limitações no que respeita à profundidade (em termos práticos, 40 m)• Necessita de grandes áreas de trabalho descobertas para os grandes e poderosos equipamentos• Não utilizável em solos muito densos/rígidos ou que tenham pedregulhos no seu interior*• Apenas podem ser executados na vertical• Os serviços enterrados podem colocar problemas• Capacidade limitada para tratar estratos isolados situados em profundidade• Elevados custos de mobilização
Tratamento e melhoramento dos terrenos <ul style="list-style-type: none">• O método que usa água produz um volume significativo de resíduos• O peso do equipamento pode ser problemático em solos muito fracos• Podem ocorrer variações significativas de resistência no solo tratado, o que pode ser importante em certas aplicações• Não pode ser instalado muito próximo de estruturas existentes• A flexibilidade geométrica da furação e do tratamento é limitada
Mitigação da liquefação <ul style="list-style-type: none">• Não aplicável para remediação diretamente através ou sob estruturas de betão existentes
Paredes de contenção de escavações <ul style="list-style-type: none">• Pode ocorrer degradação devido ao congelamento e degelo• Outros métodos permitem evitar os resíduos (estacas prancha, por exemplo)• Podem ocorrer variações significativas de resistência no solo tratado, o que pode ser importante em certas aplicações

* Técnicas DMM específicas para a execução de paredes podem ser capazes de penetrar materiais mais densos ou rígidos e com pedras.

2.5.3 – Classificação das técnicas

O objetivo principal de qualquer técnica DMM é assegurar uma distribuição regular do ligante pelo volume de solo tratado, com um teor em água uniforme e sem quantidades significativas de solo ou de ligante não misturadas entre si. A FHWA (2013) introduziu uma classificação dos numerosos métodos existentes – de fato, atualmente, há dezenas de técnicas alternativas – baseada nos seguintes critérios:

- Processo para introduzir o ligante no terreno: i) húmido (W, *wet*), isto é, bombeado em forma de calda; ii) seco (D, *dry*), isto é, introduzido seco de forma pneumática;
- Método para penetrar no terreno ou misturar o ligante: i) rotação (R, *rotary*), rotação simples sendo a pressão do ligante relativamente baixa; ii) injeção pontual, jato (J, *jet*), rotação auxiliada pela injeção pontual da calda a elevada pressão, iii) vertical (V), através de uma serra articulada de rotação vertical que conduz à criação de paredes e painéis;
- Posição do local onde se faz a mistura do ligante com o solo: i) na ponta (E, *end*), a mistura faz-se na ponta da coluna; ii) na haste (S, *shaft*), a mistura ocorre ao longo de toda ou de uma porção significativa da haste de furação; iii) no painel (P, *panel*), a mistura é efetuada em toda a dimensão da ferramenta que constrói a parede ou o painel.

Consequentemente, as diferentes técnicas DMM são classificadas atendendo ao agente (W/D), ao método de penetração / mistura (R/J/V) e à posição da ação de mistura (S/E/P). Na Figura 15 apresenta-se alguns exemplos de classificação de equipamentos DMM mediante a metodologia proposta pela FHWA (2013). Na Figura 16 mostra-se fotografias de equipamentos CDM (*Cement Deep Mixing*) usados em obras *offshore* no Japão.



Fig. 15 – Classificação de equipamentos DMM (FHWA, 2013):

- a) equipamento típico - lâminas - de mistura das técnicas classificadas como WRS;
- b) equipamento de corte do método designado por *Cutter Soil Mixing* – CSM, classificado como WRE;
- c) equipamento do método designado por *Trench cutting and remixing deep wall* – TRD, classificado como WVP).

No Anexo D do documento da FHWA em referência fornecem-se detalhes dos equipamentos usados pelas diversas metodologias e dão-se indicações sobre as dimensões do solo tratado em cada caso e sobre as suas propriedades mecânicas e hidráulicas.

Outros sistemas de classificação têm sido introduzidos, designadamente o proposto por Kitazume e Terashi (2013), baseado no processo de mistura. Na Figura 17 apresenta-se o resultado do levantamento feito por estes autores da aplicação de técnicas DMM no Japão desde meados da década de 70 do século anterior até ao ano 2012.



Fig. 16 – Equipamentos do método CDM (*Cement Deep Mixing*) usados em obras *offshore* no Japão (Cement Deep Mixing Method Association, http://www.cdm-gr.com/sea/ship_03.html. Acedido em 10/out/2016).

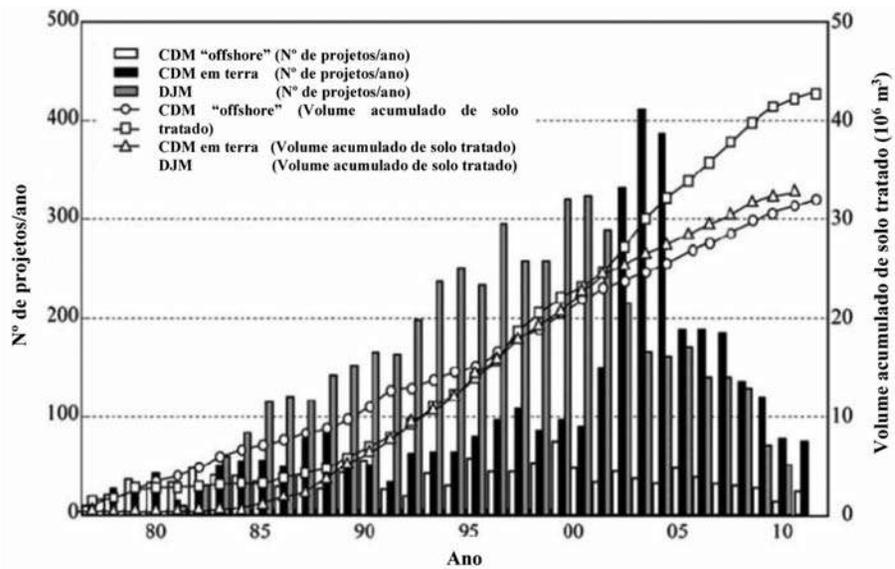


Fig. 17 – Estatística das obras em que se usaram as técnicas *Cement deep mixing* (CDM) e *Dry jet mixing* (DJM) no Japão (Kitazume e Terashi, 2013).

3 – ENERGIA GEOTÉRMICA

3.1 – Tipos de energia geotérmica

Com temperaturas da ordem dos 6.000 °C (mais ou menos 500 °C, segundo as últimas estimativas) o núcleo da Terra é algo mais quente do que a superfície do Sol (5.500 °C). O calor da Terra é originado pelo decaimento dos elementos radioativos que se acumularam no decurso do processo de formação do nosso planeta. A temperatura na Terra cresce de forma constante com a profundidade cerca de 3° por cada 100m. Isto também é válido para a água contida nas rochas porosas, pelo que quando a água circula o calor é trazido para a superfície, por vezes oriundo de

grandes profundidades; em algumas regiões, devido às condições geológicas locais, a temperatura à superfície é consideravelmente aumentada nos locais em que a água borbulha na superfície ou sai à pressão (*geysers*).

O fluxo de calor que por ano atravessa a superfície da Terra é cerca do dobro do consumo mundial de energia primária (nas fontes antes de qualquer transformação). Por outro lado, a energia térmica que é extraível só nos EUA está estimada em cerca de 200×10^{21} J (Anderson *et al.*, 2006), o que é mais de 1400 vezes superior ao consumo anual de energia primária (141×10^{18} J, em 2007, Fragaszy *et al.*, 2011). Para se poder usar a energia armazenada no interior da Terra, fazem-se perfurações para captar as reservas a diferentes profundidades, usando-se a água como veículo, na maioria dos casos.

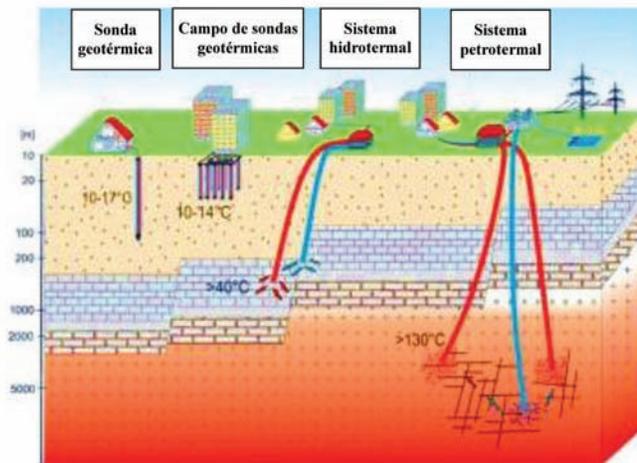


Fig. 18 – Sistemas de exploração da energia geotérmica.
(<http://www.jigsawenergy.co.uk/technologies/>. Acedido em 10/out/2016).

A energia geotérmica divide-se simplificada em (Figura 18): a) energia geotérmica superficial, usada para o aquecimento e arrefecimento de edifícios; b) energia geotérmica profunda, empregue na produção de vapor que pode ser usado diretamente no fornecimento de calor ou para gerar eletricidade. Recursos geotérmicos de baixa temperatura explorados próximo da superfície podem ser usados diretamente no aquecimento de água, enquanto, para a geração de eletricidade, são necessárias temperaturas de pelo menos $120\text{ }^{\circ}\text{C}$, o que exige a execução de furos que podem chegar a atingir os 5.000m, dependendo das condições geológicas. Os sistemas de exploração da energia geotérmica profunda podem ser agrupados em:

- Sistemas hidrotermais: têm por finalidade a extração de calor de maciços rochosos com poros e fissuras cheios de água quente, a qual é bombeada para a superfície e usada em permutadores de calor para, por exemplo, produção de água quente que é usada para aquecer edifícios ou estufas ou, se a temperatura for suficientemente elevada, para geração de eletricidade; geralmente, a água arrefecida é injetada no terreno através de um segundo furo (Figura 18).
- Sistemas petrotermais: também conhecidos como *Enhanced or Engineered Geothermal Systems* (EGS) ou como *Hot Rock Energy*, têm como objetivo a extração de calor de reservatórios profundos (profundidades da ordem dos 5.000m), aonde, mesmo em regiões não vulcânicas, podem ser encontradas as temperaturas muito elevadas (120 a $180\text{ }^{\circ}\text{C}$) requeridas para a produção de eletricidade; a pressões tão elevadas quanto as existentes a

essas profundidades a circulação da água é muito difícil, pelo que têm que ser aplicadas técnicas especiais para estimular a circulação da água; geralmente, procede-se à fracturação hidráulica do maciço rochoso para aumentar a condutividade hidráulica e ampliar a área da superfície de contacto água-rocha, potenciando as trocas de calor; também neste caso a água é bombeada para a superfície através de furos de produção e retorna ao terreno via furos de injeção.

O calor geotérmico pode ser extraído de praticamente qualquer local, seja superficialmente para aquecimento e arrefecimento de edifícios, seja de profundidades intermédias para produção de água quente, seja, em locais particulares, de grandes profundidades também para produção de eletricidade. A Figura 19 mostra, de forma esquemática, a localização dos recursos geotérmicos na Europa, considerando os vários tipos de energia geotérmica.

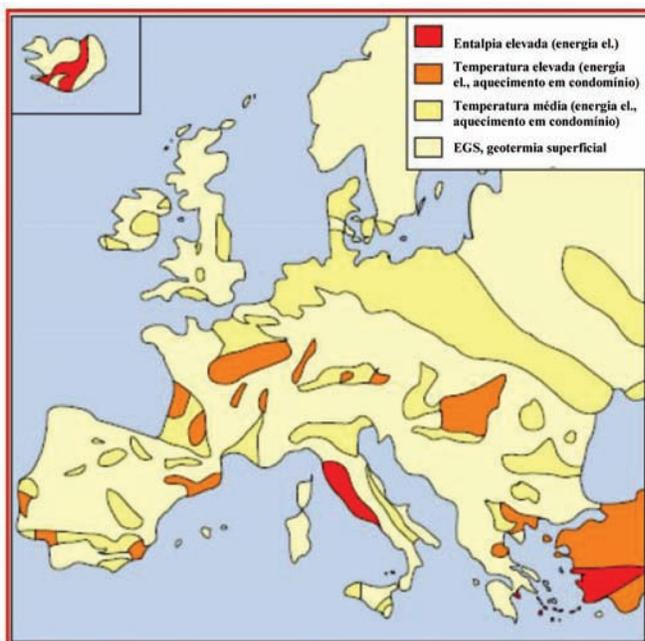


Fig. 19 – Recursos geotérmicos na Europa (EGEC, 2010).

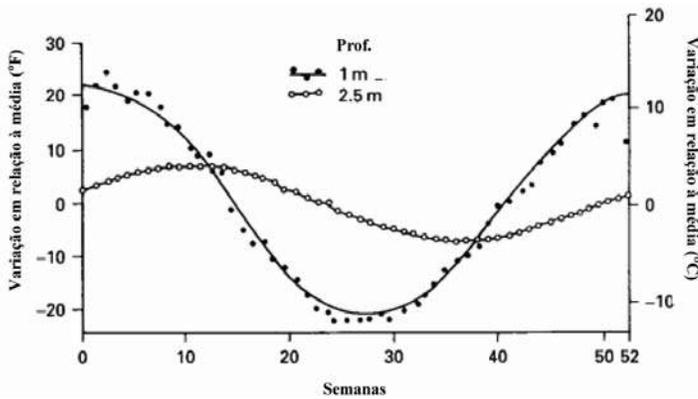
Uma vez que a exploração da energia geotérmica superficial não afeta a paisagem, produz poucas emissões de CO₂ e tem possibilidade de fornecer uma certa potência de base, esta forma de energia renovável constitui uma alternativa viável, ainda que parcelar, aos combustíveis fósseis. Sem embargo, a extração de calor geotérmico, sobretudo a grande profundidade para efeitos de produção de energia, coloca desafios importantes, estando em cursos investigações e desenvolvimentos visando melhorar a eficiência da produção geotérmica. Seja como for, é importante ter presente que este tipo de recurso geotérmico pode ficar temporariamente esgotado, como ilustra o caso documentado por Frągaszy *et al.* (2011).

A energia geotérmica superficial pode ser explorada de forma generalizada e, nessa medida, pode dar um contributo significativo para os consumos de energia nos edifícios. A secção seguinte está dedicada a este tema.

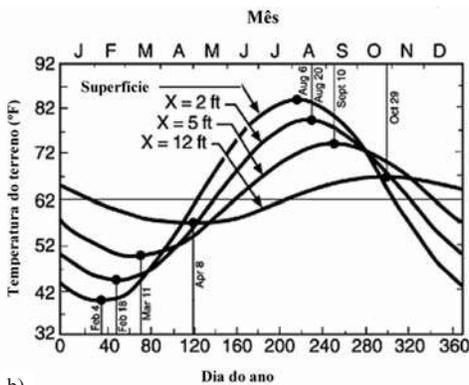
3.2 – Energia geotérmica superficial

A temperatura do solo varia de mês para mês em função da incidência da radiação solar, da chuva, das variações sazonais da temperatura do ar, do coberto vegetal, dos tipos de solos e da profundidade. A muito maior capacidade calorífica do solo em relação ao ar, entre outros fatores, faz com que as variações sazonais da temperatura do solo em profundidade sejam muito menores do que as do ar e, além disso, sejam desfasadas (atrasadas) destas. Na Primavera o solo aquece mais lentamente e menos acentuadamente do que o ar, logo, no começo do Verão, tem uma temperatura inferior à do ar, pelo que constitui um meio natural para retirar calor dos edifícios. Em contrapartida, no Outono o solo arrefece mais lentamente e em menor grau do que o ar, pelo que no começo do Inverno está mais quente do que o ar, constituindo um meio natural de fornecer calor aos edifícios.

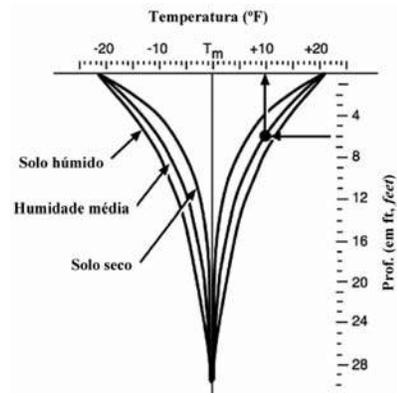
A profundidades superiores aos 9m (30 feet) a temperatura do solo mantém-se relativamente constante ao longo do ano (ver Figura 20c) e corresponde aproximadamente à temperatura da água medida em furos a profundidades entre os 9 e os 15m.



a)



b)



c)

Fig. 20 – Influência da profundidade nas variações anuais de temperatura: a) na Austrália ([http:// scienceofdoom.com/2010/04/09/sensible-heat-latent-heat-and-radiation/](http://scienceofdoom.com/2010/04/09/sensible-heat-latent-heat-and-radiation/). Acedido em 15/out/2016); b) na Virgínia, humidade média; c) amplitude das variações em função da humidade na Virgínia ($^{\circ}\text{F} = 1.8\text{ }^{\circ}\text{C} + 32$; $\Delta^{\circ}\text{C} = \Delta^{\circ}\text{F} / 1.8$) (<http://www.builditsolar.com/Projects/Cooling/EarthTemperatures.htm>. Acedido em 10/out/2016).

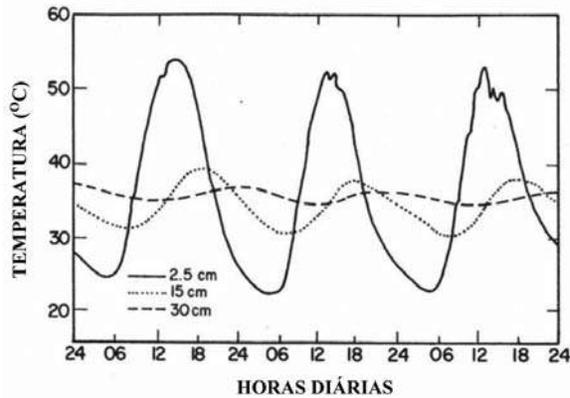


Fig. 21 – Influência da profundidade nas variações diárias de temperatura (http://www.learner.org/jnorth/tm/tulips/investigate_soil_temps.html. Acedido em 10/out/2016).

Ainda que vá perdendo importância com o aumento da profundidade, o desfasamento (atraso) das variações de temperatura no solo em relação às que ocorrem no ar (ver Figura 20b) também é favorável para o objetivo de fornecer aos edifícios calor, no Inverno, e frio, no Verão, porque, no pico do Inverno ou no pico do Verão, os solos estão, respetivamente, mais quentes ou mais frios do que estariam se as suas variações de temperatura estivessem em fase com as variações de temperatura no ar (<http://www.builditsolar.com/Projects/Cooling/EarthTemperatures.htm>. Acedido a 15/out/2016).

Note-se que, como se constata observando os resultados das medições resumidas na Figura 21, as variações diárias de temperatura são praticamente inapreciáveis para profundidades superiores a 30 cm.

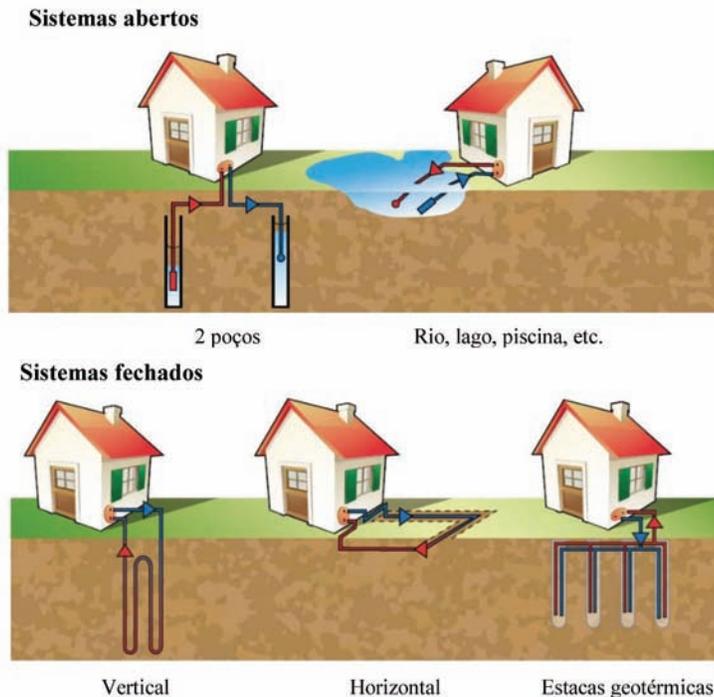


Fig. 22 – Esquemas de exploração de energia geotérmica superficial (Fonte:<http://iter-geo.eu/shallow-geothermal-systems-how-extract-inject-heat-into-ground/>. Acedido a 18/set/2016).

Na Figura 22 ilustra-se vários esquemas de exploração da energia geotérmica superficial. Uma bomba de calor geotérmica (GSHP, *ground source heat pump*) é um sistema de aquecimento e arrefecimento que usa o terreno como fonte de calor no Inverno e como retentor de calor no Verão. Uma GSHP combina um ciclo reversível de refrigeração com a circulação de água em tubagens pelo terreno (*circulating ground loop*). O sistema é similar ao das bombas de calor em que a fonte é o ar, em que as trocas de calor se fazem com o terreno em vez de ser com o ar. Porém, as GSHP são muito mais eficientes do que as bombas que envolvem o ar, porque a temperatura do terreno é mais alta que a do ar no Inverno e mais baixa no Verão. A eficiência das GSHP pode alcançar os 600%, porque a energia geotérmica pode chegar a ser 85% da energia total (Fragaszy *et al.*, 2011); valores comuns situam-se entre 300 e 600%, no mínimo 250%, enquanto para as bombas que envolvem o ar a eficiência se situa entre os 175 e os 200%. Para este nível elevado de eficiência contribui o facto de a temperatura no solo se manter quase constante ao longo do ano, apenas com pequenas variações, mesmo a profundidades reduzidas de 1,5 a 3m (Figura 20).

Note-se, sem embargo, que a eficiência a longo prazo dos sistemas geotérmicos superficiais é significativamente afetada pelo balanço entre as cargas de aquecimento e de arrefecimento. Se as cargas forem equilibradas, não ocorrem, ou se ocorrerem são pequenas, variações na temperatura do terreno, que poderiam por em causa a eficiência do sistema a longo prazo. Não havendo equilíbrio, a temperatura do terreno pode ir gradualmente aumentando (dominam as cargas de arrefecimento) ou diminuindo (dominam as cargas de aquecimento). É ainda de realçar que, não havendo equilíbrio, as variações graduais de temperatura num dado sentido podem afetar os terrenos vizinhos, o que pode constituir uma preocupação em zonas urbanas onde as variações de temperatura de um dado sistema GSHP podem afetar sistemas e estruturas vizinhas (Fragaszy *et al.*, 2011).

Num levantamento feito em 2012 existiam nos USA mais de 600.000 bombas de calor geotérmicas, com um crescimento anual da ordem das 60.000. O gráfico da Figura 23 mostra, para a Europa, o ponto da situação em 2013 e as expectativas para 2015 em termos de capacidade instalada nos diversos países. Abrem-se boas perspetivas para o uso da energia geotérmica superficial na Europa, tanto no sector residencial, como nos sectores comercial e industrial (escritórios, lojas, superfícies comerciais, alguns tipos de instalações fabris, etc.) onde seja alternadamente necessário aquecer e arrefecer (Sanner, 2004).

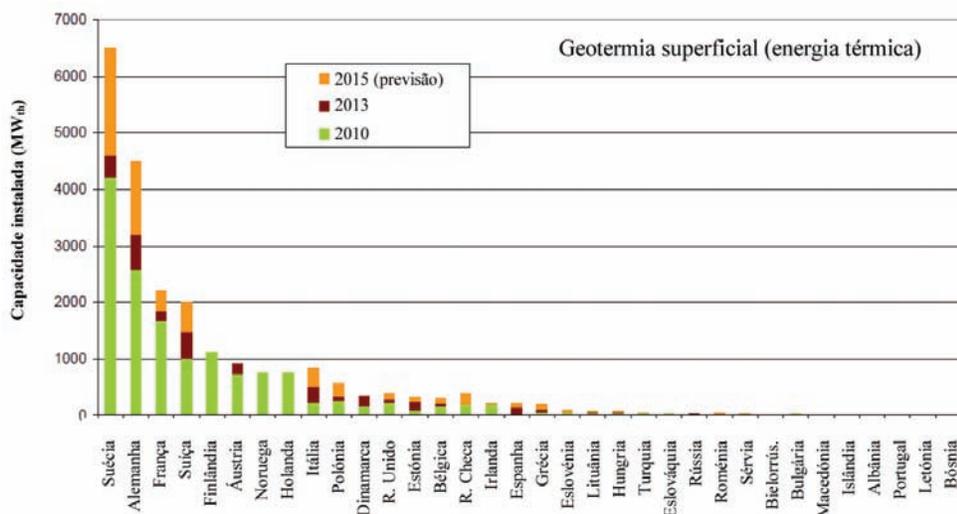


Fig. 23 – Evolução da capacidade geotérmica superficial nos distintos países europeus (Fonte: EGEC, European Geothermal Energy Council, <http://egec.info/>. Acedido a 15/set/2016).

Estacas dotadas de tubagens para trocas de calor com o terreno (*energy pile foundations*) podem ter uma função dupla, de suporte de cargas e integradas em bombas de calor geotérmicas, GSHP. Esta última função pode provocar variações de temperatura no fuste da estaca, afetando o seu comportamento termo-mecânico em termos estruturais e geotécnicos. Apesar do grande número de estacas já instaladas com sistemas de produção de energia, é ainda pequena a quantidade de informação fiável sobre aquela questão.

Muito recentemente, Gashti *et al.* (2014), usando simulações com o MEF, estudaram numericamente a resistência estrutural e geotécnica de estacas com sistemas GSHP instalados. No caso de estacas flutuantes, os resultados mostraram que os efeitos térmicos podem provocar aumento das tensões de compressão na estaca, tipicamente à volta dos 20% da resistência à compressão do betão. No caso de estacas de ponta, mostraram que a resistência lateral mobilizada devido às variações de temperatura não afeta significativamente a rotura geotécnica das estacas.

Bourne-Webb *et al.* (2009) ensaiaram uma estaca dotada de tubagens para aproveitamento geotérmico. A estaca, instalada na argila de Londres, foi sujeita a ciclos de variação da temperatura, estando carregada verticalmente. A resistência mobilizada na interface estaca/solo foi inferida através dos resultados do ensaio. O aquecimento da estaca provoca o aumento das tensões nela instaladas, sendo este efeito afetado pelas condições de restrição dos deslocamentos na ponta; as tensões na estaca podem ultrapassar os limites impostos nos códigos. No caso estudado por Bourne-Webb *et al.* (2009) a margem entre a resistência lateral última e as tensões de corte mobilizadas na interface no decurso dos ciclos térmicos era elevada, pelo que se considerou improvável que a capacidade de carga da estaca tivesse sido afetada de forma significativa.

3.3 – Conclusão

O dimensionamento ótimo e sustentável da operação de sistemas geotérmicos requer: conhecimento das propriedades térmicas dos geomateriais, tecnologias eficientes de caracterização do subsolo, avaliação das condições de percolação da água subterrânea, análise do processo acoplado hidro-termo-químico-mecânico para se prever o comportamento do reservatório a curto e longo prazo. São igualmente necessários melhoramentos nas técnicas de perfuração e de controlo da fracturação hidráulica de rochas a temperaturas elevadas e estudos da sismicidade induzida (Fragaszy *et al.*, 2011).

No que respeita aos sistemas geotérmicos superficiais deve haver o cuidado de coordenação com as atividades de prospeção, de modo a otimizar custos: i) associar a determinação das propriedades térmicas às operações de caracterização do terreno; ii) os furos de prospeção podem ser usados para instalar tubagens verticais de um sistema GSHP; iii) se o sistema GSHP for com tubagem horizontal, as valas abertas para a sua instalação podem ser usadas para a investigação das características do maciço (Fragaszy *et al.*, 2011).

Segundo Fragaszy *et al.* (2011) é preciso aprofundar a investigação, entre outras, nas seguintes áreas: desenvolvimento de métodos baratos de avaliação das propriedades térmicas dos terrenos; modelação e métodos de cálculo que entrem em consideração com o balanço das cargas térmicas, para prevenir variações de temperatura a longo prazo (em zonas urbanas densamente povoadas); compreensão do efeito dos ciclos térmicos nas estacas dotadas de sistemas GSHP; compreensão dos limites da energia térmica extraível em sistemas horizontais e verticais.

Quando as estacas fazem parte de um sistema de aproveitamento geotérmico, a mobilização da resistência das estacas deve ser considerada com cuidado, particularmente a resistência lateral dos fustes. Fragaszy *et al.* (2011) salientam que os ciclos de aquecimento e arrefecimento podem afetar a resistência lateral das estacas e potencialmente causar assentamentos. Bourne-Webb *et al.* (2009) recomendam que os estudos futuros incluam a monitorização de sistemas em uso para que

se possa perceber melhor a variação das forças mobilizadas nas estacas ao longo do tempo e para se detetar se há efeitos cumulativos que os ensaios por eles conduzidos não permitiram estudar. As investigações futuras devem também estudar o impacto dos ciclos de temperatura em estacas que, em serviço, mobilizem uma percentagem elevada da resistência lateral disponível, para que se possa apreciar qualquer eventual efeito detrimental dos ciclos na resistência lateral.

4 – CONCLUSÃO DO CONJUNTO DE ARTIGOS

Este artigo remata o conjunto de 4 artigos publicados sucessivamente nos últimos números da Revista Geotecnia. Considera-se útil deixar ficar um índice resumido dos assuntos abordados, o que é feito no Quadro 6.

Procura-se, em primeiro lugar, situar as perspetivas futuras no âmbito de algumas das principais condicionantes da evolução das sociedades humanas: a) as alterações climáticas e as suas implicações, nomeadamente, o aumento dos desastres naturais, sobretudo de natureza hidrológica; b) o aumento da população mundial e o crescimento da urbanização; c) a preocupação social com o modo como se aplica o investimento público e o exercício do escrutínio social sobre a questão do cumprimento de estimativas de custos e de prazos das obras; d) as disponibilidades tecnológicas; para as ilustrar selecionou-se o domínio tecnológico que provavelmente maior evolução experimentou, o da capacidade de cálculo; e) a complexidade que cada vez mais afeta os projetos e as obras.

Quadro 6 – Resumo dos assuntos tratados nos 4 artigos da série.

1	<p>Desenvolvimento da geotecnia. Condicionantes gerais e específicas</p> <p>1. INTRODUÇÃO</p> <p>2. ENQUADRAMENTO. QUESTÕES GERAIS</p> <p>2.1. Assuntos abordados</p> <p>2.2. Mudanças climáticas e desastres naturais (preâmbulo; mudanças climáticas; desastres naturais; ritmo de implementação de medidas adequadas)</p> <p>2.3. Crescimento da população e das cidades (preâmbulo; importância económica das cidades e crescimento populacional; aumento da vulnerabilidade)</p> <p>2.4. Escrutínio social. Custos e prazos (preâmbulo; custos e prazos das obras: discrepância entre as previsões e a realidade; percepção da existência de corrupção no sector da construção; desafio para os engenheiros)</p> <p>2.5. Evolução da capacidade de cálculo e do seu custo</p> <p>2.6. Complexidade (preâmbulo; sistemas complexos, método observacional; complexidade dos projetos e sua gestão)</p> <p>2.7. Conclusão</p> <p>3. ENQUADRAMENTO. QUESTÕES GEOTÉCNICAS</p> <p>3.1. Assuntos abordados</p> <p>3.2. O estado da prática e o estado da arte. Acidentes (preâmbulo; acidentes em túneis; exemplos de alguns colapsos de diverso tipo ocorridos recentemente; causas dos colapsos)</p> <p>3.3. Capacidade de previsão do comportamento das estruturas geotécnicas (preâmbulo; estacas construídas num maciço de solos residuais; escavação suportada por cortina ancorada em maciço arenoso)</p> <p>3.4. Lacunas</p>
2	<p>Desenvolvimento da geotecnia. Necessidades infraestruturais e perspetivas genéricas</p> <p>1. INTRODUÇÃO</p> <p>2. NECESSIDADES</p> <p>2.1. Introdução. A importância das infraestruturas</p> <p>2.2. Breve caracterização das necessidades em alguns sectores (água; energia; transportes)</p>

Quadro 6 (Cont.) – Resumo dos assuntos tratados nos 4 artigos da série.

<p>2</p>	<p>Desenvolvimento da geotecnia. Necessidades infraestruturais e perspectivas genéricas</p> <p>2.3. Estimativas dos investimentos futuros em infraestruturas a nível mundial 2.4. Os casos de alguns países (preâmbulo; Estados Unidos; Reino Unido; África do Sul; conclusão)</p> <p>3. PERSPECTIVAS DE DESENVOLVIMENTO DA GEOTECNIA – PARTE 1</p> <p>3.1. Introdução 3.2. Perspetivas globais 3.3. Sustentabilidade (definição e operacionalização do conceito; avaliação da sustentabilidade; sustentabilidade e eurocódigos; espaço subterrâneo e sustentabilidade das cidades) 3.4. Resiliência 3.5. Colaboração e formação multidisciplinares</p>
<p>3</p>	<p>Desenvolvimento da geotecnia. Algumas perspectivas específicas (1)</p> <p>1. INTRODUÇÃO 2. DOMÍNIOS BASE FUNDAMENTAIS 3. OUTROS DOMÍNIOS 4. NOVAS TECNOLOGIAS 4.1. Preâmbulo 4.2. O potencial das novas tecnologias para o avanço da geo-engenharia 4.3. Biotecnologia (objetivos, limitações, exemplos de aplicação; praticabilidade de diferentes aplicações) 4.4. Métodos geofísicos 4.5. Detecção remota 4.6. Tecnologias de informação 4.7. Sensores e sistemas de observação 4.8. Nanotecnologia 5. MODELOS CONSTITUTIVOS 5.1. Preâmbulo 5.2. Seleção de modelos 5.3. Perspetivas 6. MÉTODOS DE ANÁLISE E DE RESOLUÇÃO DE PROBLEMAS 6.1. Introdução 6.2. Breves considerações sobre limitações e dificuldades das análises numéricas 6.3. Acoplamento de diversas metodologias 6.4. Método do Elementos Discretos (DEM) 6.5. Método dos Elementos/Partículas Finitas (PFEM) 6.6. Método dos Elementos Finitos Aleatórios (RFEM)</p>
<p>4</p>	<p>Desenvolvimento da geotecnia. Algumas perspectivas específicas (2)</p> <p>1. INTRODUÇÃO 2. MELHORAMENTO E REFORÇO DE TERRENOS 2.1. Classificação dos métodos de melhoramento e reforço de terrenos 2.2. Reforço de solos recorrendo ao rebaixamento do nível freático – Estação de Salgueiros 2.3. Pregagens em solos 2.4. Reforço com geossintéticos 2.5. Técnicas de mistura em profundidade (DMM) (definição, campo de aplicação; vantagens e inconvenientes; classificação das técnicas) 3. ENERGIA GEOTÉRMICA 3.1. Tipos de energia geotérmica 3.2. Energia geotérmica superficial 3.3. Conclusão 4. CONCLUSÃO DO CONJUNTO DE ARTIGOS</p>

No que toca às perspetivas para a evolução da geotecnia começa-se pelo enunciado das de carácter genérico, apontando-se em seguida rumos focalizados em certos temas (perspetivas específicas), mais diretamente relacionados com a resolução de problemas e que ao autor parecem interessantes e úteis para o futuro.

Consequentemente traça-se uma perspetiva envolvente das questões específicas que dizem respeito ao desenvolvimento da geotecnia, relativas quer aos domínios base fundamentais da geotecnia quer aos domínios mais diretamente relacionados com a resolução de problemas, e, depois, trata-se os seguintes temas: i) novas tecnologias aplicadas à geotecnia, designadamente a biotecnologia, os métodos geofísicos, a deteção remota, as tecnologias da informação, os sensores e sistemas de observação e a nanotecnologia; ii) modelos constituintes dos materiais geotécnicos; iii) metodologias de análise e de resolução de problemas; iv) melhoramento e reforço de terrenos; v) energia geotérmica.

Como reiteradamente se enfatizou, a perspetiva que se desenvolve neste conjunto de textos é, naturalmente, parcelar e incompleta, não pretendendo mais do que, por um lado, enunciar um conjunto de fatores, tanto sociais, económicos e ambientais, como próprios da disciplina, isto é, geotécnicos, e, por outro lado, apontar vias de desenvolvimento futuro que ao autor parecem, umas (as condicionantes) e outras (as vias de desenvolvimento), das mais relevantes. Não há, portanto, qualquer preocupação de exaustividade que, aliás, seria impossível, dados os vastíssimos campos por onde se espria a geotecnia. Por outro lado, como não podia deixar de ser, é uma perspetiva pessoal, condicionada pelas preferências do autor e pelas suas capacidades para as abordar.

Para finalizar saliente-se que, das pesquisas que fez para a elaboração dos artigos, ao autor resulta muito claro e evidente que a geotecnia é uma área técnico-científica extremamente atraente pela sua multidisciplinaridade, diversidade e vitalidade, desafiando constantemente os seus praticantes dada a complexidade que a envolve e condiciona.

5 – AGRADECIMENTOS

O autor agradece a cuidada revisão do texto feita pelo colega e amigo Professor José Couto Marques.

6 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Anderson, B.; Batchelor, A.S.; Blackwell, D.D.; DiPippo, R.; Drake, E.M.; Garnish, J.; Livesay, B.; Moore, M.C.; Nichols, K.; Petty, S.; Toksöz, M.N.; Veatch, J.R.W. (2006). *The future of geothermal energy*. Massachusetts Institute of Technology, Boston.
- Bonita, G.A.; Tarquinio, F.S.; Wagner, L. (2006). *Soil Nail Support of Excavation System for the Embassy of the Peoples Republic of China in the United States*. Presented at DFI's 31st Annual Conf. on Deep Foundations, Washington, D.C. (DFI - Deep Foundations Institute). (<http://www.nicholsonconstruction.com/techresources/techPapers/PDF/Chinese%20Embassy.pdf>). Acedido a 15/set/2016.
- Bourne-Webb, P.J.; Amatya, B.; Soga, K.; Amis, T.; Davidson, C.; Payne, P. (2009). *Energy pile test at Lambeth College, London: geotechnical and thermodynamic aspects of pile response to heat cycles*. *Géotechnique* 59, No. 3, 237-248.
- Bruce, M.E.C.; Berg, R.R.; Collin, J.G.; Filz, G.M.; Terashi, M.; Yang, D.S. (2013). *Federal Highway Administration Design Manual: Deep Mixing for Embankment and Foundation Support*. Report No. FHWA-HRT-13-046, October 2013.

- Cardoso, A.S. (2015). *Desenvolvimento da Geotecnia. Condicionantes Gerais e Específicas*. Geotecnia nº 135, pp. 05-39.
- Cardoso, A.S. (2016). *Desenvolvimento da Geotecnia. Necessidades Infra-estruturais e Perspetivas Genéricas*. Geotecnia nº 136, pp. 03-26.
- Cardoso, A.S.; Alves Costa, P. (2016). *Desenvolvimento da Geotecnia. Algumas Perspetivas Específicas (1)*. Geotecnia nº 137, pp. 05-46.
- Chu, J.; Varaksin, S.; Klotz, U.; Mengé, P. (2009). *Construction Processes. State of the Art Report*. 17th International Conference on Soil Mechanics & Geotechnical Engineering, Alexandria, Egypt.
- EGEC – European Geothermal Energy Council (2010). EGEC’s response to the EC Public consultation exercise on “Roadmap for a low carbon economy by 2050”, additional comments, VISION 2050, Brussels, 26.11.2010. (<http://egec.info/wp-content/uploads/2011/02/EGECs-answer-to-EC-consultation-on-roadmap-2050-annex.pdf>). Acedido a 15/set/2016.
- FHWA (2013). Federal Highway Administration Design Manual: Deep Mixing for Embankment and Foundation Support, Report No. FHWA-HRT-13-046, October 2013 (Authors: Mary Ellen C. Bruce, Ryan R. Berg, James G. Collin, George M. Filz, Masaaki Terashi, & David S. Yang).
- Fragaszy, R.J.; Santamarina, J.C.; Amekudzi, A.; Assimaki, D.; Bachus, R.; Burns, S.E.; Cha, M.; Cho, G.C.; Cortes, D.D.; Dai, S.; Espinoza, D.N.; Garrow, L.; Huang, H.; Jang, J.; Jung, J.W.; Kim, S.; Kurtis, K.; Lee, C.; Pasten, C.; Phadnis, H.; Rix, G.; Shin, H.S.; Torres, M.C.; Tsouris, C. (2011). *Sustainable development and energy geotechnology - Potential roles for geotechnical engineering*. KSCE Journal of Civil Engineering, April 2011, Volume 15, Issue 4, pp. 611-621.
- França, P.T.; Campanhã, C.A.; Andrade, J.C. (2009). *Large-diameter shafts*. (<http://www.Large-diameter shafts, World Tunnel Congress, ITA-AITES, Budapeste, Hungria, 24p>)
- Gashti, E.H.N.; Malaska, M.; Kujala, K. (2014). *Evaluation of thermo-mechanical behaviour of composite energy piles during heating/cooling operations*. Engineering Structures, Volume 75, pp. 363-373.
- Hansford, P. (2011). *Delivering value*. Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Civil Engineering, Volume 164, Issue 1.
- Kitazume, M.; Terashi, M. (2013). *The Deep Mixing Method*. CRC Press, Taylor & Francis Group.
- Makusa, G.P. (2012). *Soil Stabilization Methods and Materials in Engineering Practice. State of the Art Review*. Department of Civil, Environmental and Natural Resources Engineering, Division of Mining and Geotechnical Engineering, Luleå University of Technology, Sweden.
- Rimoldi, P.; Gharpure, A.D.; Mahajan, R.R. (2013). *Seismic Behavior of Hybrid Reinforced Soil High Walls and Slopes*. Published in Geosynthetica.net at September 17, 2013. (<http://www.geosynthetica.net/rimoldi-seismic-behavior-reinforced-soil/>). Acedido a 15/set/2016.
- Sanner, B. (2004). *Shallow geothermal energy*. International Workshop on Geothermal Energy Resources in Central and Eastern European Countries, Chapter 2.3.
- Topa Gomes, A. (2009). *Poços elípticos pelo Método de Escavação Sequencial. O caso do Metro do Porto*. Tese de doutoramento. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

- Topa Gomes, A.; Ferraz, M.; Faria, R.; Figueiras, J.; Cardoso, A.S. (2007). *Análise do comportamento diferido e não linear geométrico de uma escora de betão armado da estação de Metro Salgueiros*. Anais do Congresso em Métodos Numéricos e Computacionais em Engenharia, Porto.
- Topa Gomes, A.; Cardoso, A.S.; Sousa, J.A.; Andrade, J.C.; Campanhã, C.A. (2008). *Design and behaviour of Salgueiros station for Porto metro*. Proceedings of the 6th International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering, Arlington, VA.
- Topa Gomes, A.; Cardoso, A.S.; Sousa, J.A.; Andrade, J.C.; Campanhã, C.A. (2011). *Comportamento da estação Salgueiros do metro do Porto*. Revista Geotecnia, nº122, pp. 49-67.