

DESENVOLVIMENTO DA GEOTECNIA. ALGUMAS PERSPETIVAS ESPECÍFICAS (1)

Emerging trends in geotechnical engineering – Part 3

António Silva Cardoso*

Pedro Alves Costa**

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 espraiam-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, feita no 1º artigo, das diversas condicionantes, tanto sociais, económicas e ambientais, como geotécnicas, e das necessidades das sociedades humanas, sumariadas no 2º artigo, 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 change 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.

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*

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

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

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 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 aos autores 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 dos autores.

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 elaborados por organizações nacionais e internacionais que incluem estimativas quantificadas, 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 aos autores parecem interessantes e úteis para o futuro.

Nas duas secções seguintes do presente artigo traça-se uma perspetiva envolvente das questões específicas que dizem respeito ao desenvolvimento da geotecnia: i) em 2 aborda-se as relativas aos domínios base fundamentais da geotecnia; ii) em 3 refere-se as que envolvem outros domínios, mais diretamente relacionados com a resolução de problemas, sem qualquer preocupação de exaustividade que, aliás, seria impossível, dados os vastíssimos campos por onde se espalha a geotecnia.

Depois trata-se com mais detalhe algumas das questões referenciadas de forma genérica. Obviamente essa abordagem é muito parcelar e enviesada, até porque está inevitavelmente condicionada pelas preferências dos autores e pelas suas capacidades para as abordar.

O documento da NRC (2006) que tem sido citado neste trabalho dá significativa relevância à identificação das novas ferramentas e tecnologias que fornecem as bases para se poder encontrar soluções para colmatar as lacunas existentes e enfrentar novas aplicações. Dada a importância atual e futura dessas tecnologias, entendeu-se que no presente trabalho se devia tratar esses assuntos, seguindo de perto o citado documento. Tal é feito na secção 4 (Novas tecnologias) e inclui considerações sobre a aplicação à geotecnia da biotecnologia, dos métodos geofísicos, da deteção remota, das tecnologias da informação, dos sensores e sistemas de observação e da nanotecnologia. Depois são abordados os seguintes assuntos: modelos constituintes, na secção 5, e metodologias de análise e de resolução de problemas, na secção 6.

Questões relativas ao melhoramento e reforço de solos e à energia geotérmica são tratadas no quarto e último artigo da série.

2 – DOMÍNIOS BASE FUNDAMENTAIS

Em 1936 Terzaghi (1936) escreveu o seguinte: *“In soil mechanics the accuracy of computed results never exceeds that of a crude estimate, and the principal function of the theory consists in teaching us what and how to observe in the field”*. 80 anos depois é óbvio que algumas das condicionantes que, à data, contribuíam para fazer desta sentença uma realidade já foram superadas, mas, outras, ainda não o foram. Com efeito, apesar de, desde então, ter havido um enorme desenvolvimento dos conceitos e das teorias que enformam a geotecnia e das capacidades de cálculo, subsiste a dificuldade fundamental de caracterizar a variabilidade dos solos, razão pela qual os engenheiros geotécnicos continuam a sofrer de falta de informação. Por isso, mesmo os resultados de cálculos com modelos numéricos muito sofisticados continuam ainda a ser estimativas mais ou menos rudes da realidade.

Assim, tendo em vista a aspiração de melhorar a aderência das previsões à realidade, é fácil para um engenheiro geotécnico enunciar os desafios fundamentais do domínio técnico-científico em que trabalha:

- 1) caracterização geotécnica dos terrenos, incluindo a sua variabilidade espacial, a qual deve contemplar todas as variáveis com importância para o problema em consideração;
- 2) melhor compreensão do comportamento complexo dos terrenos, incluindo a influência do tempo; a compreensão abrangente e completa das características e dos comportamentos dos solos e das rochas e o desenvolvimento de novas soluções eficazes, eficientes e económicas para problemas de geo-engenharia deve considerar não apenas as interações mecânicas, mas também as de outro cariz: térmicas, químicas e elétricas (NRC, 2006); neste âmbito devem incluir-se quer os solos que não se enquadram nos paradigmas tradicionais (solos residuais, solos não saturados, etc.) quer os solos locais (Rocca *et al.*, 2006; Terzariol, 2009; Francisca, 2011); em algumas circunstâncias o conhecimento do comportamento dos geomateriais em ambientes extremos é também imprescindível (NRC, 2006);
- 3) melhorar a quantificação das variabilidades associadas à caracterização (das propriedades físicas e químicas, atendendo à distribuição espacial e ao efeito temporal) e, de um modo geral, melhorar a estimação de todas as incertezas que envolvem o processo decisório e desenvolver melhores métodos para avaliar os impactos potenciais dessas incertezas sobre as decisões de engenharia, ou seja, na análise de risco para a tomada de decisões de engenharia; com efeito, subsiste a incapacidade de traduzir a compreensão fundamental da física e da química dos solos e das rochas e do comportamento dos sistemas particulados em metodologias e processos que permitam quantificar as propriedades necessárias à análise de engenharia dos materiais; diante desses condicionalismos, os paradigmas para lidar com as incertezas resultantes são mal compreendidos e, ainda mais, mal praticados.

Os autores consideram que se perspetiva a possibilidade de se encontrar boas respostas para estes três problemas fundamentais baseadas em:

- utilização dos métodos geofísicos, em campo e em laboratório;
- utilização de ensaios de laboratório com capacidade de controlar diferentes trajetórias de tensão e de medir com elevada precisão o que se passa, havendo a mínima interferência dos equipamentos de medição no comportamento;
- emprego de métodos de análise que permitem modelar o conjunto de partículas e nessa medida permitem melhor estudar os fenómenos a nível local e os reflexos destes para o nível macroscópico; claro que, de momento, estes estudos têm essencialmente um caráter teórico, visando sobretudo a melhor compreensão dos fenómenos;
- desenvolvimento de metodologias para consideração da variabilidade nos procedimentos de análise e de conceção;
- incorporação das análises de risco nos processos de desenvolvimento dos projetos.

Mais adiante algumas das metodologias e tecnologias agora brevemente referidas são abordadas mais em pormenor.

3 – OUTROS DOMÍNIOS

Mas as perspectivas de evolução da Geotecnia não se cingem aos três domínios fundamentais referidos na secção anterior. Com efeito, outras e muito diversificadas perspectivas futuras se abrem quando se procede à análise das lacunas que permanecem e continuam a desafiar a prática da geoenharia. Nestas matérias é conveniente pesquisar o que foi escrito anteriormente: nos parágrafos subsequentes enumeram-se algumas das perspectivas que têm sido apontadas por diversos autores, não se voltando a referir as já enunciadas no ponto anterior.

Num texto intitulado *Geotechnics: the next 60 years*, Simpson e Tatsuoka (2008) preveem que o futuro da construção geotécnica será muito ativo, contemplando a aplicação de processos e metodologias correntemente em uso e de muitos desenvolvimentos e inovações tendo como objetivo comum e primordial a redução do consumo de energia e das emissões de dióxido de carbono. Mais especificamente indicam que:

- são de esperar avanços em todos os tipos de obras geotécnicas, incluindo as obras subterrâneas e as fundações; tais avanços contemplarão igualmente novos métodos construtivos (Francisca, 2011);
- os métodos de melhoramento e reforço de solos deverão sofrer uma evolução muito importante, conjuntamente com técnicas mais avançadas de reutilização de terrenos contaminados (NRC, 2006), incluindo tecnologias nano-bio-geotécnicas (Nelson, 2013);
- avanços em computação, instrumentação e comunicação fornecerão novas oportunidades de melhoramento dos processos atuais (NRC, 2006; ASCE, 2007).

Existe uma grande conjugação de ideias (NRC, 2006; Chowdhury & Flentje, 2007; Simpson & Tatsuoka, 2008; Francisca, 2011; Brandl, 2011; Misra & Basu, 2011; Nelson, 2013; etc.) no que concerne ao futuro promissor da área do melhoramento e reforço de terrenos. Vem a propósito referir que dos 5 projetos nacionais franceses de investigação em geotecnia apresentados na 18th ICSMFE (Schlosser *et al.*, 2013) 3 dizem respeito a técnicas de melhoramento e reforço de solos – pregagens em solos (CLOUTERRE), estacas raiz / conjuntos de microestacas (FOREVER) e reforço de solos de fundação por inclusões rígidas – e um quarto, relativo à cravação dinâmica de estacas (VIBROFONÇAGE), também tem aplicações no domínio do melhoramento de solos arenosos, embora o seu campo de aplicação seja mais vasto.

Por sua vez, Clough (2006) salienta que os avanços das tecnologias permitem tratar problemas fundamentais que não puderam ser abordados antes devido a não haver meios para o fazer. Alguns exemplos: i) melhorar o conhecimento dos sistemas multifásicos complexos como os solos através da simulação molecular dos componentes, água, ar, partículas sólidas, minerais de argila, matéria orgânica, etc.; ii) mantendo sempre uma perspectiva 3D, estudar o comportamento de estruturas geotécnicas complexas, desde a nano-estrutura básica, passando pela escala microscópica (para, por exemplo, se perceber como os maciços terrosos mobilizam a resistência em alguma zonas enquanto noutras a resistência diminui para níveis residuais), até à visualização sequencial de como as deformações são induzidas pelos diferentes processos construtivos; iii) os avanços na capacidade de computação permitem a criação de sistemas *on line* de recolha e tratamento da informação por forma a melhorar a capacidade de ajustar os projetos às condições locais, apenas totalmente expostas no decurso da execução (método observacional).

No que respeita às estruturas subterrâneas, Nelson (2013) refere serem necessários: i) desenvolvimentos computacionais alternativos a ensaios de custo elevado que permitam estudar o efeito de escala presente na maioria dos maciços rochosos e melhor compreender a mecânica da fratura e o mecanismo de corte das rochas; ii) avanços na compreensão do comportamento das estruturas subterrâneas ao longo do tempo, aspeto chave para a avaliação da sustentabilidade e resiliência, que implica necessariamente o longo prazo; iii) o comportamento dos sistemas de

impermeabilização de obras subterrâneas precisa de ser melhor compreendido, incluindo o longo prazo (ciclo de vida); iv) uso de novos materiais e tecnologias para a reabilitação e prolongamento da vida útil das infraestruturas subterrâneas existentes; v) desenvolvimento de modelos probabilísticos para o projeto de estruturas subterrâneas contemplando a vida útil e incorporando o custo, o impacto, os recursos necessários, as contingências e os riscos.

As análises prospetivas apontam no sentido de que prosseguirão no futuro, podendo mesmo agravar-se, as tendências atuais de existir no mundo situações sociais e ambientais com níveis elevados de riscos de diversa índole. Os engenheiros civis são chamados a estar na linha da frente do desenvolvimento de metodologias e procedimentos adequados para gerir e mitigar os riscos (ASCE, 2007). Tal exige, por um lado, o desenvolvimento de metodologias robustas de determinação da probabilidade de ocorrência de fenómenos adversos – o que implica melhorar a capacidade de caracterizar as incertezas, espaciais e temporais, condicionantes das roturas catastróficas causadas por eventos naturais extremos como sismos, tempestades, etc. (Chowdhury & Flentje, 2007), desenvolver metodologias para caracterização da variabilidade dos solos, incluindo a espacial, etc. – e, por outro lado, o estabelecimento de procedimentos fiáveis e robustos de avaliação das consequências dessas ocorrências, qualquer que seja o seu cariz – social, económico, tecnológico, etc. –, tarefa complexa e profundamente multidisciplinar.

Relativamente à avaliação da resiliência das comunidades urbanas, Nelson (2013) aponta os seguintes desenvolvimentos futuros, entre outros: i) sistemas de informação que relacionem todos os elementos de caracterização das cidades; ii) modelos computacionais que suportem a investigação sobre o comportamento interdependente dos diferentes setores e modelem a resposta integrada dos sistemas urbanos a eventos extremos, isto é, que estimem a resiliência.

Francisca (2011) salienta que a engenharia geotécnica vai ter de dar o seu contributo na resolução de problemas centrais da civilização atual:

- aumento da população urbana coloca problemas ambientais complexos, em consequência da alteração do uso da terra, do aumento da poluição do ar, da água e do solo e da geração e acumulação de resíduos;
- congestionamento das áreas urbanas obriga a que se tenha que projetar e construir estruturas geotécnicas em condições difíceis (solos instáveis, encostas inclinadas e com instabilidades, problemas de erosão, impermeabilização de solos, riscos de inundação, etc.) e reciclar os materiais resultantes das demolições;
- nos países menos desenvolvidos, os engenheiros geotécnicos serão confrontados com a necessidade de dar resposta a necessidades urgentes mais do que lidar com novos e inovadores desafios, particularmente nas áreas do desenvolvimento das infraestruturas civis, da mitigação de desastres naturais e da gestão de resíduos;
- em suma, o âmbito da profissão de engenheiro geotécnico ampliar-se-á no futuro próximo em resposta à procura gerada pelos novos problemas, tais como as mudanças climáticas, a procura de água potável e de energia, o crescimento da população e a necessidade do uso racional e otimizado dos recursos de forma a se alcançar um desenvolvimento sustentável.

Globalizando este conjunto de preocupações, o NRC (2006) entende que a geo-engenharia se deve concentrar nos problemas associados à recuperação dos recursos globais e aos efeitos globais da utilização desses recursos. Nesta linha, a das questões relacionadas com a sustentabilidade, para além dos já referidos, são igualmente domínios de investigação e de aplicação os seguintes (NRC, 2006; Misra e Basu, 2011):

- 1) aplicação de materiais alternativos;
- 2) reutilização e reciclagem de materiais (Nelson, 2013);

- 3) desenvolvimento de técnicas de melhoramento de terrenos ambientalmente “amigáveis”;
- 4) uso eficiente do espaço subterrâneo;
- 5) reutilização de fundações;
- 6) geotecnologia associada à energia (*energy geotechnology*).

Vale a pena comentar um pouco mais este último domínio. A geotecnologia associada à energia (*energy geotechnology*) é uma subárea da geotecnia, proposta recentemente, com o propósito de agregar todos os temas que tenham a ver com a energia, constituindo-se assim como um componente essencial de uma estratégia de desenvolvimento sustentável da energia. Os temas incluídos nessa subárea são (Santamarina & Cho, 2011; Fragasz et al. 2011):

- a) produção de energia
 - prospeção e exploração de combustíveis fósseis (petróleo, gás e carvão);
 - questões geotécnicas associadas à exploração da energia nuclear;
 - desenvolvimento de estruturas para a produção de energias renováveis (vento, sobretudo);
 - energia geotérmica (furação, fracturação, permutação de calor, estacas, otimização, etc.);
 - neste contexto a engenharia geotécnica marítima (*offshore geotechnical engineering*) ganha relevância (Randolph, 2005; Randolph et al., 2011; Jardine, 2013 e 2014);
- b) armazenamento geológico
 - captura de CO₂ (Boyd, 2008);
 - armazenamento de energia (ar comprimido contido em depósitos subterrâneos, etc.);
 - resíduos, designadamente radioativos;
- c) remediação geo-ambiental (fenômenos e métodos bio-químico-geológicos)
- d) eficiência e conservação
 - tecnologias construtivas energeticamente eficientes; métodos para reduzir a energia envolvida no desenvolvimento dos projetos de engenharia (*life cycle assessment*);
 - bio-mimetização (raízes de árvores, processos usados por animais e plantas, etc.).

As questões técnicas envolvidas neste domínio requerem análises a escalas muito diversas, consideração de grandes dimensões espaciais e temporais e consideração de processos acoplados hidro-bio-quimo-termo-mecânicos (Santamarina e Cho, 2011; Santamarina, 2012 e 2014).

Shackelford (2005) enumera alguns dos problemas geotécnicos associados às questões ambientais: i) comportamento a longo prazo dos sistemas de contenção de resíduos (aterros sanitários); ii) aplicação de materiais alternativos como barreiras impermeáveis; iii) desenvolvimento de materiais e de barreiras inovadoras; iv) novo perfil de resíduos; v) importância dos processos biológicos (aterros sanitários com melhoramento das condições de decomposição dos resíduos, biorremediação, etc.); vi) capacidade de modelação e previsão; vii) necessidade de identificação profissional dos geotécnicos ambientais.

A enumeração do que Brandl (2011) entende serem “desafios fundamentais” (*key challenges*) para a engenharia civil e para a geotecnia é vasta e inclui boa parte dos temas já referidos anteriormente: i) infraestruturas de transportes e de tráfico (construção e manutenção); ii) gestão da água; iii) gestão de recursos; iv) gestão de resíduos (sólidos e líquidos); v) prevenção e mitigação de riscos; vi) gestão de cursos de água; vii) produção de energia; viii) sistemas de irrigação; ix) ecologia urbana e industrial; x) regeneração de terrenos; xi) remediação de terrenos abandonados e contaminados; xii) renaturalização de áreas mineiras; xiii) tecnologias construtivas subterrâneas ambientalmente corretas; xiv) engenharia marítima (portuária, costeira, etc.).

Por fim saliente-se que nos contributos que têm que dar para a definição das soluções mais adequadas, os engenheiros e, em particular, os geotécnicos devem tomar em consideração as novas tecnologias e as novas abordagens para resolver melhor os seus problemas, de forma mais rápida e mais barata. Sem embargo, como muito bem chama a atenção Long (2006), apesar dos novos contextos e condicionantes, não se deve esquecer que problemas tradicionais resolvidos no passado continuam a precisar de ser resolvidos e que muitas das técnicas e das tecnologias então usadas mantêm a sua validade. Este aspeto deve ser devidamente acautelado nos programas de educação dos engenheiros.

Também compete aos engenheiros informar/educar a sociedade sobre as limitações das novas tecnologias, contribuindo para a gestão adequada das expectativas e para que possam ser tomadas decisões adequadas sobre o modo como as infraestruturas podem ser construídas (ASCE, 2007).

4 – NOVAS TECNOLOGIAS

4.1 – Preâmbulo

Os avanços tecnológicos, nomeadamente nas designadas, na terminologia da Comissão Europeia, “tecnologias facilitadoras essenciais” [*KET's - key enabling technologies: Micro- and Nano-electronics, Advanced Materials, Nanotechnology, Biotechnology, Photonics, Advanced Manufacturing Systems*] têm vindo a abrir novos caminhos, e continuarão a fazê-lo no futuro, que permitem a conceção de novas abordagens que facultam aos engenheiros civis e, em particular, aos geotécnicos, a possibilidade de definir e usar soluções inovadoras, quer para problemas tradicionais, quer para problemas que são colocados designadamente pelo aumento da urbanização das populações, pelas mudanças globais e locais no ambiente da Terra e pelas necessidades de abastecimento de água potável e de energia livre de emissões poluentes.

Em 2006 o *National Research Council* dos Estados Unidos patrocinou a elaboração de um estudo (NRC, 2006) muito importante e abrangente sobre a aplicação de novas tecnologias ao domínio da geo-engenharia, considerando-se incluídos neste domínio todos os tipos de engenharia que lidam com materiais naturais (da Terra), como a engenharia geotécnica, a engenharia geológica, a engenharia hidrológica e as partes relacionadas com a Terra da engenharia de petróleo e da engenharia de minas. Nesse relatório explanam-se as razões pelas quais as novas tecnologias, já disponíveis ou em desenvolvimento, abrem novas e excitantes possibilidades à geo-engenharia, sendo particularmente interessantes as seguintes aplicações dessas novas tecnologias: 1) micróbios para estabilizar ou remediar solos; 2) deteção remota e técnicas não-invasivas de auscultação dos terrenos; 3) nanosensores e sistemas microelectromecânicos para caracterizar e monitorizar o comportamento dos materiais e dos sistemas geológicos; 4) nanotecnologia para modificar o comportamento da argila; 5) interligação da observação, da computação e da simulação do comportamento em tempo real para fins de gestão adaptativa de infraestruturas urbanas.

Algumas dessas novas tecnologias provavelmente contribuirão fortemente para revolucionar a forma como os sistemas geológicos são caracterizados, monitorizados e modificados. Sem embargo, muitas das aplicações destas novas tecnologias ainda têm de ser identificadas.

4.2 – O potencial das novas tecnologias para o avanço da geo-engenharia

O relatório do NRC (2006) centra-se na identificação das tecnologias que podem abrir vias para o avanço da geo-engenharia, isto é, com potencial elevado para contribuírem para a definição de boas soluções para problemas da geo-engenharia, com as quais esta deve estabelecer interações; são elas: a biotecnologia, a nanotecnologia, os MEMS (*microelectromechanical systems*) e os

microsensores, a geodeteção, instrumentação e monitorização (*geosensing*), a tecnologia da informação, a infraestrutura cibernética e a modelação, análise e visualização de dados geográficos multiespaciais e multitemporais (*multispatial and multitemporal geographical data modeling, analysis, and visualization*).

No Quadro 1 estima-se o impacto que algumas dessas tecnologias podem ter ou já estão a ter na geo-engenharia. A aplicação de todas estas novas tecnologias e a necessidade de incorporar mais eletrónica, biologia, química, ciência dos materiais e tecnologia da informação nos projetos tem importantes implicações na educação, bem como no exercício profissional.

Quadro 1 – Potencial das novas tecnologias no âmbito da geotecnologia (adaptado de NRC, 2006).

Disciplina	Impactos potenciais	Estado de desenvolvimento
Biotechnologia	Elevados	
<ul style="list-style-type: none"> • melhor compreensão do comportamento dos materiais geológicos • novos materiais de construção • tratamento <i>in situ</i> de solos e aquíferos contaminados • possibilidade de métodos passivos de estabilização de terrenos • expectativa de desenvolvimento de métodos mais eficazes de aproveitamento dos recursos 		Conceitos maduros, sendo previsíveis impactos importantes a curto prazo.
Métodos geofísicos	Elevados	
<ul style="list-style-type: none"> • necessário melhorar a relação custo-benefício • os métodos não invasivos necessitam de desenvolvimento • novos métodos de aquisição e de processamento de dados aumentam a aplicabilidade • caracterização 3D através de tomografias 		Métodos revolucionários maduros. Novos impactos a médio prazo do aumento da resolução na caracterização próximo da superfície.
Deteção remota	Elevados	
<ul style="list-style-type: none"> • I&D em curso com resultados frutíferos • permanece como um tema de investigação • a investigação pode tornar claro o potencial destas técnicas para a tomada de decisões em tempo real 		Uma nova família de ferramentas terá um impacto significativo no curto prazo.
Tecnologias da informação	Elevados	
<ul style="list-style-type: none"> • desenvolvimentos em curso • suportam mecanismos para uma maior cooperação • requer sinergias entre a ciência dos computadores, a engenharia e as comunidades de pesquisa científica • 4-D GIS para decisões em tempo real • desenvolvimento de geossistemas inteligentes autorreferenciados com estruturas de informação 		Tecnologias críticas para os sistemas de deteção remota, de observação e geofísicos. Há novos dispositivos disponíveis para a integração com esses sistemas.
Sensores e sistemas de observação	Médios a elevados	
<p>Se as expectativas se cumprirem, os MEMS podem vir a contribuir para a solução de problemas geotécnicos:</p> <ul style="list-style-type: none"> • requer o aumento dos conhecimentos em eletrónica • medições em laboratório através de técnicas não invasivas • métodos geofísicos mais baratos e mais eficazes 		Em curso desenvolvimentos revolucionários. Sensores já disponíveis e sistemas podem ter grande impacto no curto prazo.
Nanotecnologia	Médios a pequenos	
<ul style="list-style-type: none"> • nanotecnologia é reconhecida como geotecnologia • conhecimento aprofundado baseado no estudo das reações à nano-escala • novos materiais e métodos 		Aplicações: estado inicial de desenvolvimento. Estima-se impacto a longo prazo na geotecnologia.

No que segue trata-se com algum pormenor as aplicações geotécnicas das seguintes tecnologias: biotecnologia, métodos geofísicos, detecção remota, tecnologias de informação, sensores e sistemas de observação e nanotecnologia.

4.3 – Biotecnologia

4.3.1 – *Objetivos. Limitações. Exemplos de aplicação*

A aplicação da Biotecnologia à Geotecnia tem sido estudada em dois domínios:

1) Biocolmatação (*bioclogging*)

- uso de microrganismos para produção local de materiais para enchimento dos poros, com o objetivo de reduzir a porosidade e a condutividade hidráulica de solos e rochas porosas;
- aplicação potencial como material isolante na construção de diques, aterros e poços ou como argamassa fina para controlo da erosão, mitigação da liquefação e encapsulamento de materiais poluídos.

2) Biocimentação (*biocementation*)

- utilização de microrganismos e de aditivos para promover a formação local de materiais que liguem as partículas do solo;
- os processos químicos, tais como, oxidação, redução ou dissolução, têm que poder ser promovidos pela atividade microbiológica;
- a precipitação de substâncias inorgânicas no solo é robusta e estável.

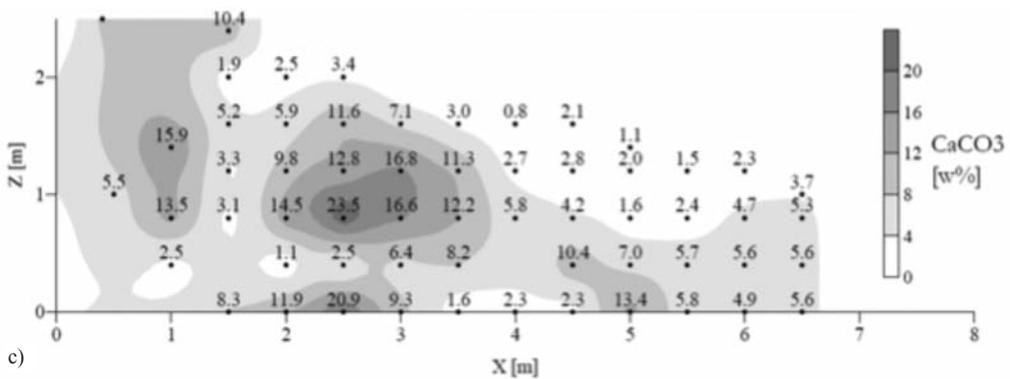
Os principais fatores que afetam a aplicação de microrganismos são (Babu, 2012): (i) seleção e identificação dos microrganismos adequados; (ii) otimização da atividade microbiológica *in situ*; (iii) estabilidade das propriedades do terreno após o tratamento biológico; (iv) biossegurança da aplicação; (v) custos, sobretudo em aplicações a larga escala. As principais limitações são: (i) os processos microbiológicos são lentos; (ii) os processos são complexos pois dependem de múltiplos fatores (pH, concentração do fornecedor e do recetor de eletrões, temperatura, taxas de concentração e de difusão dos nutrientes e dos metabolitos, etc.); (iii) além das características do terreno e do conteúdo em aditivos, os aspetos microbiológicos, ecológicos e geotécnicos devem também ser tomados em consideração.

A investigação na aplicação da biotecnologia à geotecnia tem tido um forte incremento (Whiffin *et al.*, 2007; Van Paassen *et al.*, 2009; Van Paassen, 2010; Kim *et al.*, 2014; Venda Oliveira *et al.*, 2015; etc.). Van Paassen e coautores conduziram um conjunto de experiências sobre biocimentação mediante a precipitação da calcite por efeito de microrganismos (MICP, *microbially induced calcite precipitation*). O processo, que resulta da hidrólise da ureia, comporta os seguintes passos:

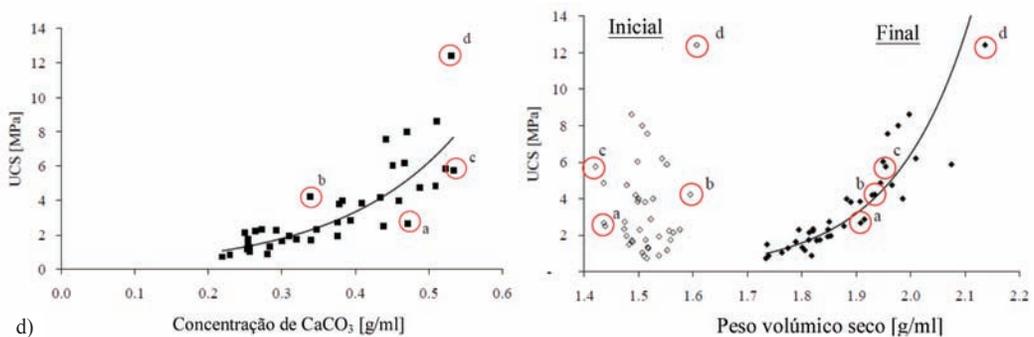
- 1) Cultivo da bactéria (*Sporosarcina Pasteurii*) num reator arejado;
- 2) Injeção de bactérias no solo conjuntamente com cloreto de cálcio [CaCl_2] e ureia [$\text{CO}(\text{NH}_2)_2$];
- 3) A reação origina cristais de calcite [CaCO_3] que se depositam entre as partículas, ligando-as e melhorando o terreno: $\text{CO}(\text{NH}_2)_2 + \text{CaCl}_2 + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2 \text{NH}_4\text{Cl} + \text{CaCO}_3$;
- 4) O cloreto de amónia também resultante da reação é removido.

A Figura 1 ilustra a experiência de grandes dimensões (100m^3) concebida e levada a cabo por Van Paassen e coautores. Ao fim de 12 dias de tratamento, cerca de 40m^3 de areia ficaram solidificados, mas não de uma forma homogénea, visto que a resistência da areia tratada depende do teor em calcite, o qual varia de ponto para ponto. Saliente-se ainda o significativo aumento do peso volumico seco do solo tratado.

Até ao presente há poucos exemplos de aplicações reais da biocolmatação ou da biocimentação (DeJong *et al.*, 2013). Van Paassen (2010) e DeJong *et al.* (2013) descrevem uma das primeiras aplicações num projeto na Holanda, em 2010, da MICP para estabilizar um solo grosseiro (seixos e calhaus) de forma a ser possível proceder à furação horizontal (HDD, *horizontal directional drilling*) tendo em vista a instalação de uma conduta de gás (Figura 2).



c)



d)

Fig. 1 – Experiência de aplicação da biotecnologia: a) montagem (circulação dos fluidos através da areia entre os 3 furos de injeção – esquerda – e os 3 furos de extração – direita); b) resultado ao fim de 12 dias de tratamento; c) concentração variável de calcite; d) dependência da resistência à compressão simples (UCS, *unconfined compressive strength*) do teor em calcite e do peso volúmico seco (Van Paassen *et al.*, 2009; Van Paassen, 2010).

Foi tratado um volume de 1000m³ até profundidades variando entre os 3 e os 20m. O tratamento implicou a injeção de 200m³ de uma suspensão com bactérias cultivadas em laboratório, duas injeções de 300-600m³ de uma solução reagente contendo ureia e cloreto de cálcio e a extração da água após a reação até que a condutividade elétrica e a concentração de amônia retornassem aos valores iniciais. A MICP foi controlada através da medição da resistividade elétrica, da recolha de amostras de água e de amostras do solo tratado para avaliação do conteúdo em calcite. Globalmente o tratamento teve sucesso, tendo sido possível executar a furação HDD no depósito, à partida grosseiro e solto.

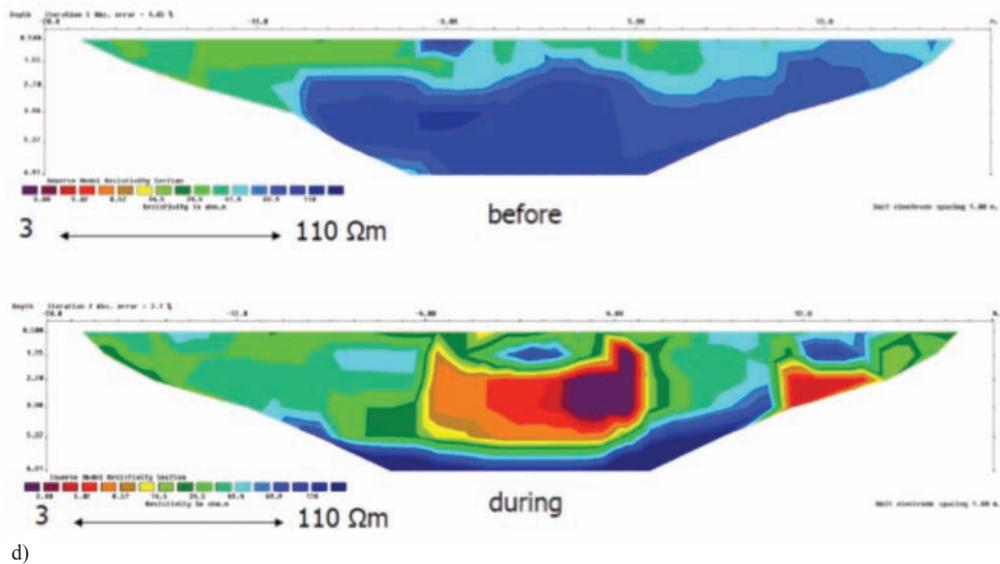


Fig. 2 – Aplicação da MICP para estabilização de solo grosseiro solto: a) vista geral; b) amostra de solo estabilizado; c) instalação da conduta após execução da furação horizontal; d) mapa de resistividades antes e durante o tratamento (Van Paassen, 2010; DeJong *et al.*, 2013).

4.3.2 – Praticabilidade de diferentes aplicações

As tecnologias bioquímicas de melhoramento dos solos não substituirão todas as técnicas convencionais de melhoramento de terrenos. Contudo os seguintes atributos gerais fazem com que aquelas tecnologias sejam potencialmente mais favoráveis em muitos casos: (i) baseiam-se em processos naturais; (ii) usualmente consomem menos energia; (iii) podem ser aplicadas sob e em volta de estruturas existentes e não afetam essas estruturas; (iv) e possibilitam o melhoramento em áreas

Quadro 2 – Avaliação qualitativa de aplicações alternativas da biotecnologia a problemas geotécnicos (adaptado de DeJong *et al.*, 2013).

Aplicação	(A)	(B)	(C)	(D)	Classif. em 20
Reparação estrutural	5	5	3	5	18
Controlo da erosão	4	5	4	5	18
Coprecipitação / imobilização de contaminantes	5	4	4	5	18
Controlo / mitigação de poeiras	4	5	4	5	18
Melhoramento de terreno em vias rurais	5	4	3	4	17
Captura superficial de CO ₂	5	3	4	5	17
Controlo de fugas	4	3	4	5	16
Reabilitação de monumentos antigos	3	3	5	5	16
Melhoramento de sub-bases de vias urbanas	5	3	3	4	15
Mitigação da liquefação de solos (MICP)	3	5	3	3	14
Melhoramento de depósitos de cinzas	1	4	4	5	14
Reciclagem / reutilização de materiais dragados	3	2	3	5	13
Mitigação da liquefação de solos (biogás)	3	3	3	3	12
Melhoramento da recuperação de petróleo dos reservatórios	1	3	3	5	12
Combate à desertificação	1	5	1	5	12
Enfraquecimento de sedimentos por fluidificação	3	2	3	3	11
Estruturas subterrâneas (condutas)	3	4	1	3	11
Estabilização de vias de escoamento (<i>sinkholes</i>)	1	3	2	5	11
Aterros como nova fonte de energia	3	4	1	2	10
Blocos de solo bio-cimentado	2	4	1	3	10
Armazenamento de água	3	2	2	2	9
Dessecação de argilas	1	1	1	4	7
Captura de carbono em profundidade	1	1	1	3	6
Estruturas subterrâneas (túneis)	1	1	2	1	5

(A) Implementação: 1 a 5 (difícil a fácil)

(B) Probabilidade de sucesso: 1 a 5 (baixa a alta)

(C) Custo / viabilidade: 1 a 5 (caro a económico)

(D) Aceitação social: 1 a 5 (baixa a alta)

elevadas, dadas as suas baixas viscosidade e pressão de injeção. Em geral estas técnicas são de fácil implementação, têm um custo competitivo e possuem potencial para poderem ser adotadas pela indústria e aceites pela sociedade. DeJong *et al.* (2013) apresentam uma apreciação qualitativa de 24 aplicações diferentes, considerando critérios tais como o custo, a dificuldade de implementação, a probabilidade de sucesso e a aceitação pela sociedade. O Quadro 2 transcreve o incluído no artigo de DeJong *et al.* (2013).

Até ao momento, o reforço de solos mediante a precipitação de calcite biologicamente estimulada (MICP) é a tecnologia que tem tido maior desenvolvimento. Muitos outros processos biotecnológicos têm merecido pouca atenção comparada com a que tem sido posta na MICP e haverá muitos outros processos que estão por descobrir. O que se pode afirmar, sem margem para qualquer dúvida, é que a aplicação da biotecnologia à resolução de problemas, os mais diversos, da geotecnia ou, num âmbito algo mais alargado, da geo-engenharia é um domínio muito promissor, onde há muito trabalho de investigação por fazer, em todos os domínios, quer experimentais, quer nos da modelação analítica e numérica, quer nos da instrumentação e monitorização. Neste último domínio, havendo necessidade de monitorizar grandes volumes e de avaliar a homogeneidade do tratamento, os métodos geofísicos apresentam um elevado potencial para mapeamento indireto do efeito que o tratamento teve em certas propriedades do terreno. Também as questões que se prendem com a durabilidade e o comportamento no decurso da vida de serviço deverão merecer esforços de estudo e análise, até porque a acumulação de dados até ao momento diz respeito a períodos de tempo muito curtos (2-4 anos).

4.4 – Métodos geofísicos

Os métodos geofísicos podem aplicar-se à superfície ou em furos abertos nos terrenos e visam determinar o perfil dos terrenos e as suas propriedades físicas, químicas ou biológicas. No Quadro 3 faz-se uma breve apresentação de alguns métodos geofísicos.

Os métodos geofísicos são usados na caracterização dos terrenos, na exploração de recursos (hidrocarbonetos, minerais e água) e em processos de monitorização (de construções, de

Quadro 3 – Métodos geofísicos (adaptado de NRC, 2006).

Método	Princípio	Parâmetros obtidos
Deteção aérea	Mede-se a radiação eletromagnética refletida	Alinhamentos geológicos, variações da vegetação, alterações superficiais
Elétrico e eletromagnético	Mede-se o fluxo da corrente elétrica nos terrenos	Resistividade e porosidade dos terrenos, estimativa da química dos fluidos
Radar (<i>Ground-penetrating radar</i>)	Transmite-se aos terrenos ondas de rádio na banda dos 10 a 500 MHz e deteta-se as ondas refletidas	Profundidade e geometria de interfaces pouco profundas, velocidade e atenuação das ondas eletromagnéticas
Magnético	Deteta variações locais do campo magnético terrestre devidas às propriedades dos terrenos	Geometria e suscetibilidade magnética de inclusões locais subterrâneas
Microgravidade	Deteta-se variações localizadas do campo gravitacional terrestre	Localização, geometria e densidade de inclusões locais subterrâneas
Métodos sísmicos	As ondas sísmicas permitem obter as propriedades elásticas de um dado volume de terreno	Profundidade e geometria de interfaces, módulos elásticos, localização de falhas
Métodos térmicos	Medições de temperatura e das suas variações relacionadas com fontes térmicas ativas e passivas	Peso volúmico, teor em água, anomalias térmicas, fontes térmicas, taxa das reações geoquímicas

intervenções de remediação, etc.). A maioria dos métodos geofísicos baseia-se na detecção da variação contrastada de uma dada propriedade física no espaço e no tempo.

Os novos e eficientes sensores geofísicos associados a programas de modelação versáteis que podem ser instalados em computadores pessoais facilitam a aplicação das técnicas geofísicas e permitem a visualização em tempo real das condições subterrâneas. Estes avanços permitem perspetivar a possibilidade de se alterar, em favor dos segundos, o balanço entre as técnicas de prospeção tradicionais, invasivas, e os métodos geofísicos. Os métodos geofísicos podem ter grande impacto nas seguintes áreas (NRC, 2006): i) delimitação da estratigrafia e caracterização da variabilidade de cada camada, incluindo a detecção e caracterização de pequenas mas importantes estruturas geológicas; ii) caracterização da fracturação de maciços rochosos; iii) classificação dos solos e estimativa da sua porosidade; iv) avaliação do grau de envelhecimento e de diagénese; v) avaliação das características dos fluidos (química, saturação, pressão, etc.) e das condições hidrogeológicas (definição do nível freático e da variabilidade da condutividade hidráulica); vi) parâmetros (mecânicos) para pequenas deformações e anisotropia; vii) avaliação das tensões efetivas; viii) detecção e monitorização dos movimentos; ix) avaliação da atividade metabólica e da distribuição da biomassa, visando a definição do papel potencial da atividade biológica.

Não é de mais realçar uma notável característica dos métodos geofísicos que os torna imprescindíveis para uma mais precisa definição geométrica e das propriedades dos maciços: o facto de poderem caracterizar grandes áreas, em contraste com os métodos de prospeção por furação, faculta a possibilidade de obtenção de dados sobre a variabilidade (em todos os sentidos, geométrica e das propriedades) dos terrenos.

Os métodos sísmicos são talvez os mais proveitosos para a prática geotécnica, visto que permitem obter informações muito úteis para o desenvolvimento dos projetos: a) a partir da velocidade das ondas S, V_s , determina-se o módulo de deformabilidade distorcional para pequenas deformações, G_{max} , e avalia-se a anisotropia da rigidez; b) a velocidade das ondas P, V_p , permite estimar a proximidade à completa saturação; c) se o solo estiver saturado, a partir de V_p e V_s pode-se inferir a porosidade; d) a medição sísmica de G_{max} permite a detecção dos efeitos do envelhecimento e da diagénese na estrutura dos solos, efeitos que são destruídos pelas técnicas de furação.

Os métodos geofísicos têm também aplicações muito importantes em laboratório. Desde logo as técnicas geofísicas podem ser usadas para controlar a evolução da qualidade das amostras, afetadas pelo processo de amostragem. São de referir, entre outras, as técnicas tomográficas não invasivas para estudar a evolução das amostras em ensaios centrífugos, o emprego das ondas elásticas ou eletromagnéticas para, sem perturbar o processo, recolher informações sobre a evolução das amostras no decurso dos ensaios ou o uso de microtomógrafos (desenvolvido na medicina e na ciência dos materiais) para analisar a evolução da estrutura / fábrica dos terrenos, a percolação dos fluidos, a concentração de deformações (*strain localization*) e outros fenómenos no decurso dos ensaios de laboratório (NRC, 2006).

Em suma, a necessidade de se melhorar a caracterização dos terrenos, absolutamente central para a evolução da geo-engenharia, passa muito pela utilização dos métodos geofísicos. Com efeito o carácter não intrusivo (e portanto não perturbador do estado dos terrenos), o facto de facultarem (conforme as técnicas) quer medições globais médias quer medições mais ou menos locais, de onde deriva a possibilidade de caracterização da variabilidade espacial, e a capacidade de se poder usar a mesma técnica tanto em laboratório como no campo, a que se associam, por um lado, a forte evolução tecnológica (melhoramento dos atuadores, dos sensores e da precisão da aquisição dos sinais, novas técnicas de interpretação, etc.) e, por outro, o melhoramento da relação custo-benefício, fazem com que as técnicas geofísicas reúnam vantagens únicas para a satisfação das necessidades de caracterização dos terrenos.

4.5 – Detecção remota

No Quadro 4 comparam-se várias técnicas de monitorização dos movimentos, incluindo as de deteção remota.

Quadro 4 – Características de técnicas de monitorização de movimentos (Arroyo *et al.*, 2009).

Técnicas de monitorização de movimentos		(A)	(B)	(C)	(D)	(E)	Não aplicável devido a:
LIDAR	Satélite	MB	1	< 1	MG	Limitada	Clima
	Aéreo	B	10^{-2}	10^{-2}	G	A pedido	Clima
	Terrestre	Med.	10^{-3}	10^{-3}	Med.	Contínua	Obstruções
Fotogrametria	Satélite	MB	1	< 1	MG	Limitada	Clima, noite
	Aéreo	B	10^{-2}	1	G	A pedido	Clima, noite
	Proximidade	Med.	$> 10^{-4}$	10^{-3}	P	Contínua	Obstruções
Taquimetria		ME	10^{-3}	10	P	Contínua	Obstruções
Nivelamento		ME	$> 10^{-4}$	1	MP	A pedido	Obstruções
GPS		E	10^{-3}	1	Med.	Contínua	Céu obstruído
PSInSAR (satélite TerraSAR-X)		B	$> 10^{-4}$	10	MG	Limitada	Vegetação

(A) Custo; (B) Precisão (m); (C) Distância entre pontos (m); (D) Área coberta em dado tempo; (E) Possibilidade de repetição [M – muito; Med. – médio; B – baixo; E – elevado; G – grande; P – pequena]

[O SAR (*Synthetic aperture radar*) usa antenas localizadas no espaço, em meios aéreos ou na superfície da terra para gerar imagens de alta resolução através da repetição de medições a intervalos selecionados ao longo de uma trajetória retilínea; com o LIDAR (*Light detection and ranging*), através da medição do tempo que leva um raio laser a fazer o percurso desde a fonte até ao alvo e voltar, obtém-se as coordenadas 3D do alvo.]

As tecnologias de deteção remota são potencialmente aplicáveis em projetos de grandes dimensões e em atividades de planeamento regional, como por exemplo, monitorização de subsidências regionais, previsão de riscos, gestão da resposta a desastres, planeamento de infraestruturas, mapeamento e previsão de instabilidades regionais (deslizamentos, avalanches, etc.), estabilidade de taludes (minas, estradas, etc.), caracterização de recursos próximos da superfície, monitorização da operação de minas e proteção costeira (NRC, 2006). Na Figura 3 apresenta-se um exemplo de monitorização dos movimentos regionais da cidade de Castel Volturno, situada a norte da Nápoles.

Nos últimos anos, há alguns exemplos de utilização de técnicas de deteção remota, designadamente o SAR (*Synthetic aperture radar*), para monitorar o efeito da construção de túneis, como é o caso das cidades de Delft (Arroyo *et al.*, 2009) e de Shanghai (Perissin *et al.*, 2012). A Figura 4 mostra medições de assentamentos feitas nesta última cidade.

Finalmente, refere-se dois casos de deslizamentos de terras ocorridos recentemente nos quais imagens anteriores à ocorrência dos eventos mostram claros indícios do que poderia acontecer e que, nestes casos, aconteceu com consequências dramáticas: i) o escorregamento ocorrido em março de 2014 em Oso, EUA, causou 43 mortes (Figura 5); ii) o escorregamento ocorrido em maio de 2014 em Ab Barak, Afeganistão, pode ter causado mais de 300 mortes, havendo estimativas que apontam para um número muito superior, da ordem das 2.500 mortes (Figura 6)

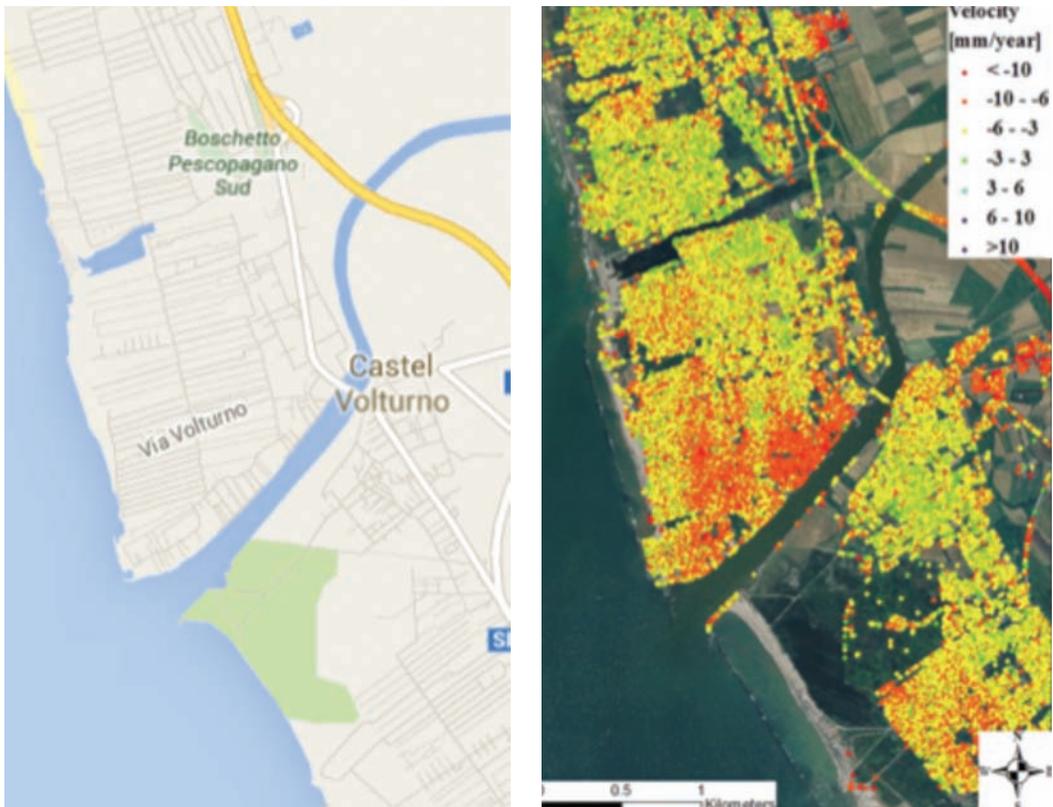


Fig. 3 – Movimentos verticais regionais na cidade de Castel Volturno (Cascini *et al.*, 2013).

(<http://blogs.agu.org/landslideblog/2014/05/05/ab-barak-1/>). Estes dois exemplos mostram que atualmente existem meios para poder prever a ocorrência de desastres de grandes dimensões, havendo necessidade de aumentar a capacidade de análise das informações disponibilizadas por esses meios.

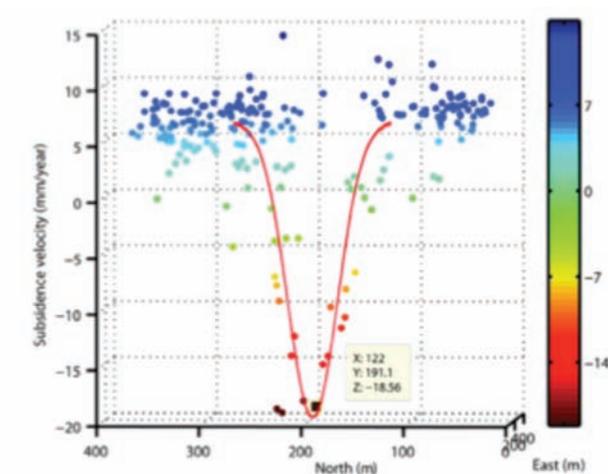


Fig. 4 – Perfil de subsidência (velocidade de assentamento em mm/ano) da linha 10 do metro de Shanghai determinado usando o SAR (Perissin *et al.*, 2012).



Fig. 5 – Deslizamento de terras em Oso, EUA, ocorrido em março de 2014. A fotografia superior é anterior ao deslizamento e a inferior é posterior.



Fig. 6 – Escorregamento de terras em Ab Barak, Afeganistão: a) a área que veio a deslizar é a que apresenta muitas ravinas posicionada mais ou menos no centro da fotografia superior, acima do curso de água
b) consequências do acidente.

4.6 – Tecnologias de informação

A importância das tecnologias e sistemas de informação para o avanço da engenharia, em particular da geotecnia, é absolutamente indiscutível, como já se salientou. No relatório do NRC (2006) defende-se que a evolução do emprego das tecnologias de informação à geo-engenharia passa agora também pelo advento e desenvolvimento de geossistemas inteligentes (*smart geosystems*). Na mesma linha se pronuncia Clough (2006), como adiante se pormenoriza um pouco mais. Esses sistemas não só comunicam hierarquicamente com os utilizadores como são autoinformados e autocontrolados.

O emprego explosivo das tecnologias de informação já afeta e continuará a afetar cada vez mais o dia a dia dos investigadores e dos engenheiros, nos mais variados aspetos:

- utilização de ferramentas de cálculo cada vez mais poderosas (capazes de tratar problemas não-lineares muito complexos, dependentes do tempo e dinâmicos, envolvendo processos acoplados mecânicos e/ou químicos e/ou térmicos e/ou biológicos e sequências construtivas complexas) para resolver problemas de geotecnia (mecânica dos solos ou das rochas, engenharia geológica, fundações, etc.), de hidrogeologia e de engenharia geoambiental;
- integração de sistemas de monitorização no contexto de sistemas inteligentes; dados obtidos por múltiplos e diferenciados sensores, e a sua interpretação conjunta, possibilitam a diminuição das incertezas e a tomada de decisões racionais em tempo real;
- integração de modelos computacionais com grandes volumes de informação obtidos por conjuntos densos de sensores e por deteção remota e exame das incertezas com base em simulações computacionais bem informadas e realistas;
- utilização de sistemas de informação geográfica (GIS) cada vez mais poderosos para tratar volumes massivos de dados 3D topográficos, geológicos e geotécnicos georreferenciados; a ligação das bases GIS a módulos de inteligência artificial e a módulos analíticos pode abrir novas portas (Clough, 2006);
- análise e controlo remoto de ensaios de campo e de laboratório;
- emprego de redes computacionais para tratar e escrutinar gigabytes de informação;
- cooperação com colegas integrados em equipas multidisciplinares, criando-se uma infraestrutura cibernética integrando as capacidades humanas, tecnológicas e computacionais.

Por sua vez, Clough (2006), baseado nas tecnologias de informação, introduz o conceito de engenharia de geossistemas (*geosystems engineering*), que entende ser um conceito global, multidirecional, que visa a resolução integral de problemas geotécnicos. Na sua opinião, um sistema bem desenvolvido deve integrar, entre outros, os seguintes aspetos: 1) os documentos históricos, societários, legais e de políticas públicas de enquadramento profissional e do projeto particular em desenvolvimento; 2) métodos de comunicação eficaz com as partes interessadas (*stakeholders*) externas; 3) os fatores que condicionam as decisões que têm de ser assumidas no âmbito do projeto; 4) questões económicas e de mercado; 5) identificação e consideração das expectativas dos *stakeholders*; 6) todas as questões geológicas e geotécnicas pertinentes; 7) alternativas potenciais para solução do problema em consideração e identificação das vantagens e limitações de cada uma; 8) cenários alternativos atendendo aos resultados potenciais.

A adoção de ferramentas informáticas e de computação de elevado desempenho para criar um geossistema que suporte uma metodologia integral para a resolução de problemas e para a conceção de projetos, permitirá aos geotécnicos adquirir uma maior segurança e autoridade na seleção das alternativas mais adequadas, garantindo que os seus julgamentos técnico-científicos são melhor

informados porque o contexto global das questões a resolver (incluindo a definição e ponderação de alternativas) fica bem estabelecido.

4.7 – Sensores e sistemas de observação

No mercado existem atualmente sensores com dimensões muito pequenas, pelo que não interferem no comportamento, com capacidade para comunicar sem fios, espertos (*smart*) e baratos para medir deslocamentos, deformações, variações de deformação, inclinações, posicionamento, vários tipos de gases e de fluidos, temperatura, humidade relativa, teor em água, pressão dos fluidos, intensidade e composição da luz, evolução das fraturas e outros parâmetros mecânicos e químicos (NRC, 2006).

A contínua evolução da tecnologia dos sensores tem tido um grande efeito na investigação e prática da geo-engenharia. Com efeito, nanosensores podem ser extensivamente colocados (misturados no caso de aterros) nos maciços terrosos para proceder aos mais diversos tipos de medições de parâmetros mecânicos, físicos, químicos, etc.

Tradicionalmente os geotécnicos dispõem apenas de informação incompleta, quer no que respeita à caracterização dos terrenos, quer no tocante à monitorização do comportamento das estruturas geotécnicas. Os desenvolvimentos recentes dos MEMS (*microelectromechanical systems*) perspetivam a possibilidade de, em algumas situações, ocorrer o problema contrário, isto é, a disponibilização de informação em excesso e de haver dificuldade de lidar com ela; aprender a tratar quantidades ingentes de informação é também ainda um assunto em aberto. Perspetiva-se, portanto, uma situação contraditória: falta de informação em certas questões, excesso de informação relativamente a outras.

4.8 – Nanotecnologia

Como se mostra na Figura 7, o comportamento fundamental de muitos dos minerais argilosos enquadra-se no âmbito da nanomecânica, o que sugere que conceitos e modelos desenvolvidos pela nanotecnologia podem ser úteis para um melhor conhecimento do comportamento das partículas de argila e para encontrar novos processos para as manipular e modificar (NRC, 2006).

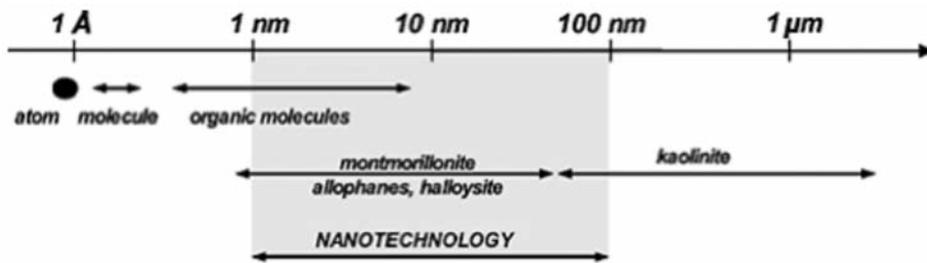


Fig. 7 – Os minerais de argila e a nanotecnologia (NRC, 2006).

Um tema fundamental da engenharia geotécnica é a relação entre o que se passa ao nível das partículas, ou seja, caso as partículas sejam argilosas, ao nível nanométrico, e o que é perceptível e medido ao nível do conjunto de partículas (amostra), isto é, ao nível centimétrico. Trata-se, portanto, de compreender as mudanças nas propriedades e no comportamento quando se passa da grande dimensão para a pequena dimensão, enquanto a questão central na nanotecnologia é tirar partido desta transição e conseguir obter novos materiais manipulando a estrutura a nível nanométrico.

As nanotecnologias promovem o melhoramento do comportamento dos materiais, por exemplo das suas propriedades mecânicas, da estabilidade térmica e do comportamento físico-químico, mesmo quando as nanopartículas são adicionadas em pequenas quantidades. Por via da introdução das nanopartículas as propriedades podem ser completamente alteradas, materiais isolantes tornam-se condutores elétricos ou materiais opacos transformam-se em transparentes.

A aplicação de nanotecnologias no âmbito dos geossintéticos é uma área promissora; o tratamento de fibras com nanopartículas pode mudar significativamente as características do comportamento dos geossintéticos e levar à conceção de novas aplicações (ver, por exemplo, http://www.textilescience.ca/downloads/111th_presentations/pres_Mohamed_Ragoubi.pdf).

De momento as aplicações das nanotecnologias à geo-engenharia possuem ainda um carácter essencialmente experimental, mas já se avançam ideias para futuras e revolucionárias aplicações que a investigação aplicada há de desenvolver, validar e confirmar a respetiva aplicabilidade a condições reais. Os solos e as rochas são os materiais de construção mais abundantes e de menor custo. Em certas condições (por exemplo, se secos, densos e coesivos) são materiais resistentes, pouco deformáveis e duráveis; em outras (por exemplo, se saturados, soltos e moles) são fracos e imprestáveis. Será concebível que as nanotecnologias possam um dia transformar esses materiais de um modo tal que os tornem ainda mais úteis e económicos (NRC, 2006)?

5 – MODELOS CONSTITUTIVOS

5.1 – Preâmbulo

Os terrenos são materiais multifásicos, compostos por partículas sólidas (com diversas mineralogias, granulometrias, formas, etc.), água, ar e outros fluidos. Devido aos seus distintos processos de formação, entre as partículas pode haver ligações mais ou menos estáveis. Se quando usados como material de construção (aterros, enrocamentos, pedraplenos, etc.) é possível garantir, através de controlos adequados, alguma homogeneidade de composição e do estado em que ficam depois de colocados em obra, no caso dos terrenos naturais a variabilidade é um fator presente a maioria das vezes. Acresce que o comportamento dos terrenos é afetado por numerosos fatores tais como as características próprias (composição mineralógica e granulométrica, teor em água, grau de saturação, índice de vazios, etc.), as condições iniciais *in situ*, os estados de tensão e de deformação, as trajetórias de tensão, o tipo de sollicitação (estática, cíclica ou dinâmica), as alterações de volume, os efeitos do tempo (fluência, etc.) e os condicionalismos ambientais (temperatura, reações químicas e bioquímicas, etc.).

A tarefa de desenvolvimento de modelos constitutivos representativos do comportamento destes complexos materiais constitui um dos ramos básicos da investigação geotécnica que ganhou uma relevância acrescida com o advento e, depois, o portentoso incremento das capacidades de cálculo automático, que possibilitou, por via da resolução numérica das equações diferenciais de campo, a consideração de modelos cada vez mais complexos. De qualquer modo, os modelos que têm vindo a ser desenvolvidos cobrem apenas alguns dos materiais terrosos e contemplam apenas parte dos fatores condicionantes brevemente enunciados acima. Daqui resulta ser necessário considerar modelos separados para estudar diferentes aspetos do comportamento do mesmo material.

5.2 – Seleção de modelos

Os modelos não são mais do que abstrações simplificadas de uma realidade complexa. Face a esta complexidade, a informação disponível para alimentar os modelos é sempre insuficiente, pelo

que não faz sentido aumentar a complexidade teórica (dos modelos) para lá do nível de qualidade dos dados disponíveis. Realisticamente, a modelação, como representação de uma realidade física, deve possuir o nível de complicação adequado para que, tanto quanto possível (atendendo à limitação dos dados), se possa obter uma compreensão suficiente do fenómeno em análise (Barbour e Krahn, 2004; Cardoso, 2004). Portanto, experiência e capacidade crítica são imprescindíveis para uma seleção sensível e significativa dos modelos apropriados e para a definição dos valores dos seus parâmetros.

Por outro lado, tenha-se presente que o processo de modelação, eventualmente evolutivo desde um modelo o mais simples possível até modelos mais complexos, deve ser encarado como uma metodologia que permite melhor compreender o mundo físico complexo e, ao mesmo tempo, facilita o exercício do “*juízo de engenharia*” ao melhorar a capacidade de se poder fazer previsões razoáveis.

5.3 – Perspetivas

É muito pouco provável que venha a ser proposto um modelo constitutivo universal, capaz de fornecer estimativas adequadas para todos os tipos de solos e todas as condições de carga e de drenagem. Se se tiver presente que não existe “*um material geológico*”, mas sim “*uma multitude de materiais*” com propriedades muito distintas, não parece apropriado procurar um modelo único para todo o tipo de solos. Em contrapartida, fazem sentido os esforços que visem a integração no mesmo modelo, aplicável a um dado tipo de solos, de condições diversas de carga e de drenagem.

Portanto, permanece a necessidade de desenvolvimento de novos modelos constitutivos, quer para melhorar os existentes, quer para simular comportamentos que não têm sido considerados (cargas cíclicas e dinâmicas, liquefação, comportamentos acoplados hidro-termo-químico-mecânicos, etc.) ou o comportamento de materiais que não têm sido contemplados suficientemente (solos naturais estruturados, solos não saturados, misturas solo-ligante, solos reforçados, etc.).

Provavelmente o maior impedimento ao uso de muitos dos modelos propostos é a dificuldade em avaliar os valores dos seus parâmetros; muitos modelos consideram parâmetros difíceis de avaliar diretamente através de ensaios de laboratório ou de campo, visto que não têm um significado físico preciso; se os parâmetros obedecerem a este requisito há certamente uma maior probabilidade de se poderem medir convenientemente.

Se continua a haver necessidade de avanços no domínio da modelação, permanece igualmente a necessidade de se manter uma atividade de qualidade em áreas de que aquela depende, como sejam as das: 1) técnicas experimentais para avaliação dos parâmetros dos modelos; limitações experimentais podem condicionar os resultados das avaliações dos parâmetros e, portanto, a aplicabilidade dos modelos; no entanto, é de esperar que prossigam os melhoramentos das técnicas experimentais; 2) calibração dos modelos existentes e dos novos; a calibração deve ser feita em relação a resultados experimentais de campo e de laboratório e através de exercícios de previsão usando vários modelos alternativos; este tipo de estudos permite também melhorar o conhecimento das limitações e dos méritos de cada modelo (Carter *et al.*, 2000).

Para rematar esta secção, entende-se pertinente transcrever as conclusões da 1ª Lição Bishop proferida por Tatsuoka (2011): “(...) *A lição mais importante da minha experiência como investigador e profissional da área da engenharia geotécnica é que o comportamento tensão-deformação dos terrenos é muito mais complexo do que usualmente se considera (...). É muito perigoso cristalizar os conceitos sobre o comportamento tensão-deformação dos geomateriais, como mostram diversas descobertas “inesperadas” obtidas em ensaios laboratoriais de tensão-deformação. Isto significa que qualquer modelo constitutivo existente deve incorporar modificações ou revisões quando for necessário (...)*”.

6 – MÉTODOS DE ANÁLISE E DE RESOLUÇÃO DE PROBLEMAS

6.1 – Introdução

Os principais métodos de análise aplicados em Geotecnia à resolução de problemas mecânicos de campo (*boundary or initial value problems*) podem ser classificados como indica o Quadro 5. A maioria dos problemas geotécnicos envolve a verificação das condições de estabilidade e a avaliação das deformações. Há 4 condições fundamentais que devem ser satisfeitas pelos métodos de análise: 1) equilíbrio; 2) compatibilidade; 3) leis constitutivas; 4) condições de fronteira e condições iniciais. A menos que estas 4 condições sejam satisfeitas (exata ou aproximadamente) a solução do problema não é rigorosa e, em alguns casos (métodos de equilíbrio limite), não se sabe qual o nível de erro que contêm.

No Quadro 5 indica-se para cada tipo de metodologia se são ou não verificadas as 4 condições enunciadas. Resulta claro que apenas as análises elastoplásticas podem fornecer uma solução completa para o problema em consideração satisfazendo (ainda que aproximadamente) todas as 4 condições. Dada a dificuldade, mesmo impossibilidade, de encontrar soluções analíticas para problemas práticos conclui-se que as técnicas de aplicação universal são os métodos numéricos.

Quadro 5 – Resumo dos principais métodos de análise (adaptado de Carter *et al.*, 2000).

	Equilíbrio limite	Análise limite		Análise elástica	Análise elastoplástica	
		Teorema estático	Teorema cinemático		Expressões analíticas	Resolução numérica
Equilíbrio	Global ✓ Local - Não	✓	Não	✓	✓	✓
Compatibilidade	Não	Não	✓	✓	✓	✓ (1)
Condições de fronteira	Forças apenas	Forças apenas	Deslocamentos apenas	✓	✓	✓
Modelo constitutivo	Critério de rotura	Rígido-plástico perfeito		Elástico	Elastoplást. perfeito	Qualquer (2)
Informação sobre os estados limite	✓	✓	✓	Não	✓	✓
Informação sobre o serviço	Não	Não	Não	✓	✓	✓
Exemplos de métodos	Das fatias, etc.	-	-	Analít. e num. (+)	Limitado	(+)

(1) Podem-se simular as descontinuidades pré-existentes ou induzidas.

(2) Inclui a plasticidade perfeita e modelos que simulam comportamentos complexos tais como deformação descontínua, endurecimento e degradação e efeitos não-locais.

(+) FDM – métodos das diferenças finitas (*finite difference method*); FEM – método dos elementos finitos (*finite element method*); BEM – método dos elementos de fronteira (*boundary element method*); DEM – método dos elementos discretos (*discrete element method*); PFEM – método dos elementos/partículas finitas (*particle finite element method*).

Com o aumento da capacidade de cálculo e a disponibilização, a preços razoáveis, de programas de cálculo automático, os métodos de uso mais corrente na prática profissional – equilíbrio limite e análise elástica – têm vindo a ser substituídos pelos métodos de análise elastoplástica.

Os métodos de análise limite em si mesmos não são aplicados na prática. Como é sabido, a obtenção de soluções analíticas baseadas nos teoremas da análise limite só é possível em casos muito limitados, muito simples no que respeita às condições geométricas e de contorno. Assim, na atualidade, usam-se ferramentas numéricas, nomeadamente baseadas no FEM, para obter soluções de problemas de diversa índole (fundações, túneis, etc.), as quais são válidas para o caso específico que foi analisado. Porém, em alguns casos, tem sido possível propor expressões analíticas que, de uma forma aproximada, generalizam as resoluções pontuais; tal é o caso da expressão aproximada proposta por Hjiáj *et al.* (2005) para o fator N_γ da capacidade de carga de fundações diretas.

Sem embargo, dado o rigoroso enquadramento teórico que os suporta, os métodos de análise limite desempenham um papel importante na confirmação de resultados obtidos por outros métodos. Acresce que o uso do método dos elementos finitos aleatórios (RFEM, *random finite element method*) permite encontrar soluções baseada na análise limite que incorporam a variabilidade espacial dos terrenos, o que pode constituir uma via muito interessante para se poder levar em linha de conta essa incontornável variabilidade nos projetos. Na secção 6.6 aprofunda-se um pouco mais esta questão.

Note-se que, cada vez mais, à resolução do problema mecânico há que acoplar a resolução de outros problemas, sendo o hidromecânico o mais comum (problemas de consolidação, solos não saturados, problemas hidrogeológicos, etc.). Contudo, para resolver certos problemas, nomeadamente do âmbito da geotecnia ambiental, tem também que se acoplar a resolução de equações diferenciais que traduzem fenómenos termodinâmicos ou químicos. Com efeito, a consideração de fenómenos acoplados termo-hidro-mecânicos (THM) é fundamental para se poder analisar os sistemas geotécnicos profundos sujeitos a altas temperaturas, pressões e tensões; uma larga variedade de aplicações geotécnicas, como a deposição de resíduos nucleares ou quimicamente tóxicos, a energia geotérmica (superficial e profunda), a produção de petróleo e de gás, o armazenamento de carbono, a contaminação de aquíferos, etc., envolvem processos acoplados termo-hidro-mecânico-químicos (THMC, *thermo-hydro-mechanical-chemical*). Neste âmbito são de referir, entre outros, os seguintes projetos internacionais:

- DECOVALEX – DEvelopment of COupled models and their VALidation against EXperiments – em 1992 iniciou-se esta colaboração internacional visando a investigação e a comparação de modelos para tratar problemas acoplados THM e THMC inerentes a sistemas geológicos. A previsão destes efeitos acoplados constitui um elemento essencial para a avaliação do desempenho e da segurança dos sistemas de eliminação geológica de resíduos radioativos e de combustível nuclear. Este projeto é suportado por muitas organizações que tratam da gestão de resíduos radioativos e autoridades de regulação (<http://www.decovalex.org/index.html>).
- OpenGeoSys (OGS) – é um projeto científico aberto que tem por objetivo o desenvolvimento de simulações numéricas de processos termo-hidro-mecânico-químicos (THMC) em meios porosos; pretende-se abarcar um amplo leque de questões geotécnicas que carecem deste tipo de metodologias e não apenas o problema do armazenamento de resíduos nucleares, que constitui o foco principal do projeto anterior (Kolditz *et al.*, 2012).

Mais recentemente, o uso de processos biológicos na solução de problemas geotécnicos e geoambientais exige que, na sua modelação, se considere a acoplagem de fenómenos biológicos, químicos, hidrológicos e mecânicos. São exemplos desses esforços os modelos para previsão da distribuição espacial da calcite ou do comportamento mecânico de solos arenosos melhorados mediante a precipitação biologicamente induzida da calcite (MICP, *microbially induced calcite precipitation*). DeJong *et al.* (2013) descrevem o estado de desenvolvimento da aplicação de processos bioquímicos à resolução de problemas geotécnicos.

No que segue tecem-se breves considerações sobre algumas das limitações e dificuldades das análises numéricas. Seja como for, na sequência do que se tem vindo a verificar desde que as capacidades de cálculo aumentaram exponencialmente, vai certamente prosseguir o uso das metodologias numéricas em todos os aspetos da atividade geotécnica, associadas a ferramentas de recolha de informação e de visualização dos resultados cada vez mais poderosas, aspeto já abordado na secção 4.6.

Na secção 6.3 traça-se uma panorâmica do emprego coordenado de metodologias de análise distintas, procurando tirar partidos das vantagens de cada. Depois aborda-se com algum pormenor metodologias que o autor considera poder ser muito úteis para o aprofundamento da compreensão do comportamento dos solos e nessa medida poder dar um contributo significativo para os desafios fundamentais da geotecnia enunciados na secção 2.

6.2 – Breves considerações sobre limitações e dificuldades das análises numéricas

As análises numéricas são idealizações de situações reais que, naturalmente, envolvem simplificações, geralmente de duas naturezas: aproximações geométricas e das condições de fronteira e idealizações do comportamento dos materiais.

Uma fonte de erros potenciais é a inadequabilidade dos modelos empregues para simular o comportamento dos materiais ou a falta de compreensão sobre o modo como esses modelos devem ser usados e sobre os parâmetros que os definem.

A modelação numérica implica a divisão do domínio em análise num número finito de sub-regiões – discretização espacial -, o mesmo acontecendo com o tempo – discretização temporal. Depois adotam-se funções de aproximação das variáveis primárias (deslocamentos, pressões neutras, etc.) que definem o modo com variam em cada sub-região. Portanto, as metodologias numéricas introduzem aproximações e para se obter soluções precisas é necessário que as discretizações sejam feitas criteriosamente (sub-regiões de pequena dimensão em zonas de elevados gradientes das variáveis primárias, etc.). Estas questões são comuns a todos os métodos numéricos, qualquer que seja o modelo constitutivo adotado para os materiais, ainda que se o modelo for não linear a importância das discretizações aumenta (Carter *et al.*, 2000).

A outra fonte de erros das análises de problemas não-lineares tem a ver com a metodologia de integração das equações; mais uma vez têm que ser adotadas aproximações, havendo diversas estratégias alternativas possíveis, que exigem esforços de cálculo distintos e conduzem a níveis de erro também diferentes (Carter *et al.*, 2000).

Finalmente, refere-se uma limitação dos métodos numéricos de carácter diferente das 3 anteriormente referidas. Esta limitação não é fonte de erros como as anteriores, assume antes um carácter metodológico e é o contraponto da que o autor considera ser a principal vantagem dos métodos analíticos (*closed-form solutions*): a de estes métodos darem origem a expressões mais ou menos complexas mas que, em todo o caso, condensam de forma resumida os principais fatores envolvidos e a sua importância relativa para os fenómenos em causa; tal permite ainda a relativamente fácil elaboração de estudos paramétricos, em regra muito úteis para orientar decisões. Através das metodologias numéricas geralmente não se consegue este objetivo com a concisão e facilidade de utilização das expressões matemáticas (Cardoso, 2004).

6.3 – Acoplamento de diversas metodologias

Para análise de estruturas geotécnicas, tem-se assistido, nas últimas décadas, a uma generalização da utilização de métodos numéricos para a resolução de problemas com geometrias complexas. Destaque especial tem vindo a ser dado ao método dos elementos finitos (FEM), devido

à sua elevada versatilidade; sem embargo, métodos alternativos, como o método dos elementos de contorno (BEM) ou o método das soluções fundamentais (FSM), podem ser vantajosos em determinadas situações, nomeadamente para simulação de meios semi-indefinidos submetidos a ações dinâmicas.

A utilização de métodos numéricos discretizados, como o FEM ou o FDM (método das diferenças finitas), na análise de problemas de interação maciço de fundação – estrutura defronta-se sempre com a questão de como atender ao caráter infinito da realidade geométrica do maciço de fundação face à dimensão do modelo discretizado. De facto, os métodos numéricos referidos são especialmente vocacionados para a análise de meios confinados nos quais as condições de fronteira se encontrem totalmente definidas (Andersen *et al.*, 2007). Esta condição conceptual exige, portanto, a limitação do domínio geométrico de análise a dimensões compatíveis com a resolução através dos meios computacionais disponíveis. Em problemas estáticos, esta limitação é facilmente contornável, bastando para isso proceder à limitação do domínio discretizado a uma distância suficientemente afastada da zona de interesse, introduzindo assim uma fronteira artificial ao problema, na qual são impostas as condições de fronteira de Dirichlet ou de Neuman (Cook *et al.*, 2002), sendo estas condições usualmente designadas como condições de fronteira elementares. Embora este procedimento simples de truncatura do domínio se revele eficaz e eficiente, a dimensão do meio discretizado pode ser reduzida utilizando elementos especiais, designados por elementos infinitos estáticos, os quais permitem uma melhor simulação do meio para um menor esforço computacional (Couto Marques *et al.*, 2002).

Porém, os procedimentos simples indicados no parágrafo anterior não são, regra geral, aplicáveis a análises dinâmicas, pois não respeitam a condição de radiação de Sommerfeld (1949), a qual postula, para um meio homogéneo isotrópico e (semi-) indefinido, a impossibilidade de a energia radiada regressar ao domínio de análise, ou seja, o campo infinito absorve energia mas não constitui uma fonte energética.

Dada a sua génese, métodos alternativos, como o BEM ou o FSM, são especialmente adequados para simulação de espaços não confinados, dado o facto de se basearem em soluções fundamentais, as quais são, em algumas situações, avaliadas de forma analítica. Contudo, estes métodos apresentam também alguns inconvenientes, nomeadamente no que toca à simulação de geometrias complexas (François *et al.*, 2008; Sheng *et al.*, 2006).

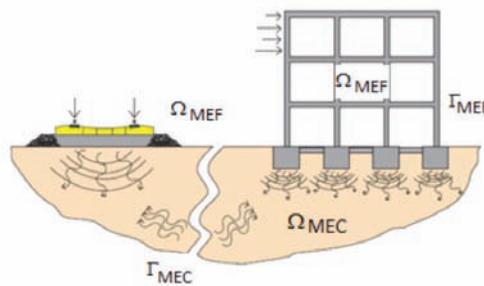


Fig. 8 – Representação esquemática de uma formulação híbrida [MEF = FEM; MEC = BEM].

Nestas circunstâncias, uma alternativa viável passa pelo recurso a modelos numéricos híbridos, nos quais a estrutura e o domínio próximo são simulados por recurso ao FEM, ao passo que o meio indefinido é modelado recorrendo ao BEM ou ao FSM (Andersen *et al.*, 2007; Sheng *et al.*, 2006; Estorff & Kausel, 1989; Andersen, 2002). Como é evidente, as duas partes do problema global estão ligadas e como tal, ao longo da fronteira de delimitação dos dois domínios, os

requisitos de equilíbrio de tensões e continuidade de deslocamentos têm obrigatoriamente de ser respeitados, tal como se ilustra esquematicamente na Figura 8. Este tipo de abordagem permite tirar partido do melhor de cada um dos métodos, atendendo à especificidade não só do meio mas também do método numérico em si.

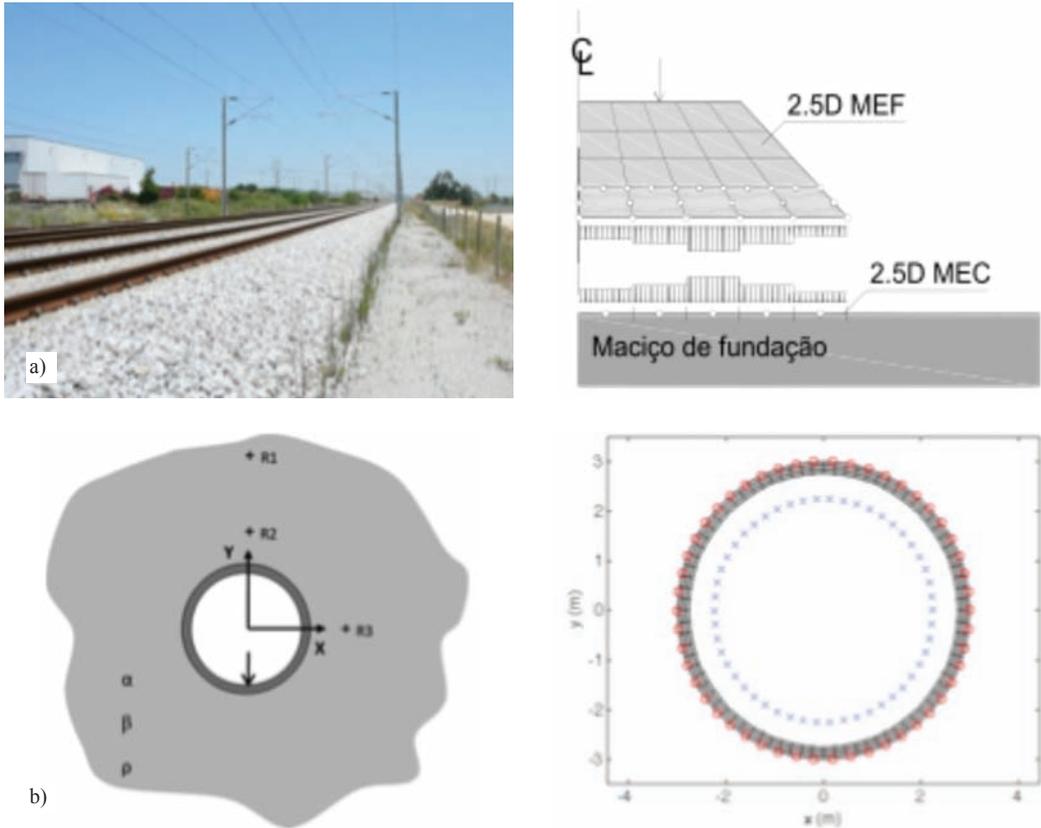


Fig. 9 – Métodos híbridos para simulação de: a) via férrea por um método 2.5D FEM-BEM (Alves Costa *et al.*, 2012); b) túnel por um método 2.5D FEM-FSM (Amado Mendes *et al.*, 2014).

Ainda neste âmbito deve ser destacada a combinação de soluções analíticas com formulações numéricas. Este tipo de abordagem é especialmente útil quando os problemas não implicam grandes incursões no regime não linear. Tal é o caso dos problemas de propagação de vibrações, onde os campos de deformação induzidos no maciço geotécnico correspondem praticamente a deformações elásticas. Nesse contexto, e quando as estruturas em estudo apresentam grande desenvolvimento longitudinal, como é o caso das infraestruturas de transporte, é possível recorrer a técnicas transformadas para a resolução dos sistemas de equações. Um desses métodos é designado por 2.5D, o qual permite obter a resposta tridimensional do meio recorrendo apenas à discretização da secção transversal, já que a geometria do mesmo se admite como invariante na direção perpendicular. Nesse caso o sistema de equações é simplificado através da resolução analítica de algumas operações de derivação e integração inerentes ao método numérico em causa. Este tipo de técnica tem sido vastamente utilizado na previsão de vibrações em infraestruturas de transporte (Alves Costa *et al.*, 2010, 2012; François *et al.*, 2010), tais como ferrovias ou túneis ferroviários (Lopes *et al.*, 2014; Amado Mendes *et al.*, 2014), podendo ser combinado tanto com o

FEM, como com o BEM ou o FSM. Nesses casos as geometrias complexas são simuladas pelo FEM, ao passo que os domínios não definidos são simulados através de método alternativo capaz de atender à especificidade do domínio em causa. Na Figura 9, apresentam-se dois casos de aplicação de métodos acoplados, um para a simulação de uma linha férrea e outro para a simulação de um túnel embestado num espaço indefinido.

6.4 – Método dos Elementos Discretos (DEM)

O método dos elementos discretos (ou dos elementos distintos ou de partículas) (DEM, *discrete element method*) é um método numérico que simula a resposta dos materiais granulares considerando as partículas individualmente e usando modelos relativamente simples para modelar a interação entre elas. Segundo Jiang e Yu (2006) a principal vantagem do DEM reside em o comportamento complexo de um conjunto discreto de partículas poder ser controlado por leis de contacto entre partículas muito simples.

Argumentando com o que entende serem as duas principais limitações das metodologias contínuas de análise – em primeiro lugar, a inexistência de adequadas leis tensão-deformação ou as leis excessivamente complicadas com parâmetros de significado obscuro e, em segundo lugar, a dificuldade de lidar com as superfícies de rotura que ocorrem naturalmente – Cundall (2001) sugere que a tendência futura para a modelação numérica de solos e rochas passa pela substituição das metodologias contínuas pelos métodos DEM. Isto porque, segundo Cundall, “(*...*) conjuntos de partículas (ligadas entre si para representar rochas ou desligadas para representar solos) captam o comportamento complexo do material real mediante a adoção a nível local de hipóteses simples e de alguns poucos parâmetros; o complexo comportamento global é, então, uma característica emergente do conjunto de partículas (*...*)”.

Com efeito, originalmente concebido para solos arenosos secos (Cundall e Strack, 1979) o DEM tem tido um forte desenvolvimento sobretudo desde o começo do presente século; é bem aceite como uma ferramenta importante para investigar o comportamento dos solos e os estudos realizados têm permitido concluir que muitos aspetos chave da resposta dos materiais às solicitações “emergem” da aplicação dos modelos DEM (O’Sullivan, 2011). Contudo, até ao presente, as maiores contribuições da aplicação dos métodos DEM em Geotecnia têm sido no âmbito da compreensão do comportamento fundamental (micromecânica) dos materiais granulares ou dos maciços compartimentados. No Quadro 6 resumem-se os levantamentos das aplicações mais comuns do DEM feitos por Jiang e Yu (2006) e O’Sullivan (2011), seguindo metodologias de agregação distintas.

Constata-se ser muito mais comum o uso do DEM em estudos fundamentais do comportamento dos solos, em que se modelam amostras (ensaio de elementos), do que nos relativos à resolução de problemas práticos, sendo que, entre estes, se destaca a simulação dos problemas de penetração (CPT e cravação de estacas). A aplicação de DEM a problemas reais implica necessariamente a consideração de fatores de escala de valor mais ou menos elevado (note-se que na simulação de ensaios de provetes também se tem que usar fatores de escala, embora de valores muito inferiores). Ainda assim o número de partículas envolvidas na simulação de problemas reais é enorme (centenas de milhares a milhões), o que torna a resolução numérica extremamente pesada. Mais adiante descreve-se um exemplo em que se põe em relevo estas questões.

Os métodos dos elementos distintos aplicam-se sobretudo a solos granulares e a maciços compartimentados. O’Sullivan (2011) considera que a dimensão mínima é 100 µm (areia fina), isto é, as partículas devem ser suficientemente grandes para que as forças atrativas superficiais sejam desprezáveis face às forças de inércia. Por isso, a simulação do comportamento de argilas é muito menos comum, visto ser muito mais complexa, não só por causa das forças superficiais, como também devido à forma das partículas.

Quadro 6 – Levantamento das aplicações de DEM.

Jiang e Yu (2006)	O’Sullivan (2011)
Ensaio de elementos (amostras)	
<p>Mecânica dos solos granulares:</p> <p>i) análise dos critérios de rotura;</p> <p>ii) leis de contacto</p> <p>Teoria da fluência:</p> <p>i) análises da teoria;</p> <p>ii) leis incorporando a fluência</p> <p>Anisotropia das argilas:</p> <p>i) comportamento anisotrópico das argilas;</p> <p>ii) leis de contacto</p> <p>Britagem de partículas:</p> <p>i) mecanismo de fraturação e esmagamento;</p> <p>ii) leis de contacto</p> <p>Localização das deformações:</p> <p>i) formação de bandas de corte;</p> <p>ii) leis de contacto atendendo à resistência à rotação dos materiais granulares</p> <p>Comportamento dinâmico ou liquefação – discos dispostos:</p> <p>i) regularmente;</p> <p>ii) aleatoriamente</p>	<p>Ensaio de compressão biaxial (2D):</p> <p>i) materiais não ligados incluindo a resistência à rotação;</p> <p>ii) partículas ligadas (maciços rochosos)</p> <p>Ensaio triaxiais / Ensaio de deformação plana</p> <p>Ensaio triaxiais “verdadeiros”: com fronteiras periódicas</p> <p>Ensaio de corte direto</p> <p>Ensaio de corte simples</p> <p>Ensaio de corte das interfaces</p>
Problemas práticos de campo em escala macro	
Mecanismos de penetração em terrenos granulares	<p>Penetração do CPT e de estacas</p> <p>Interação máquina-solo</p> <p>Efeitos de arco em escala de campo</p>

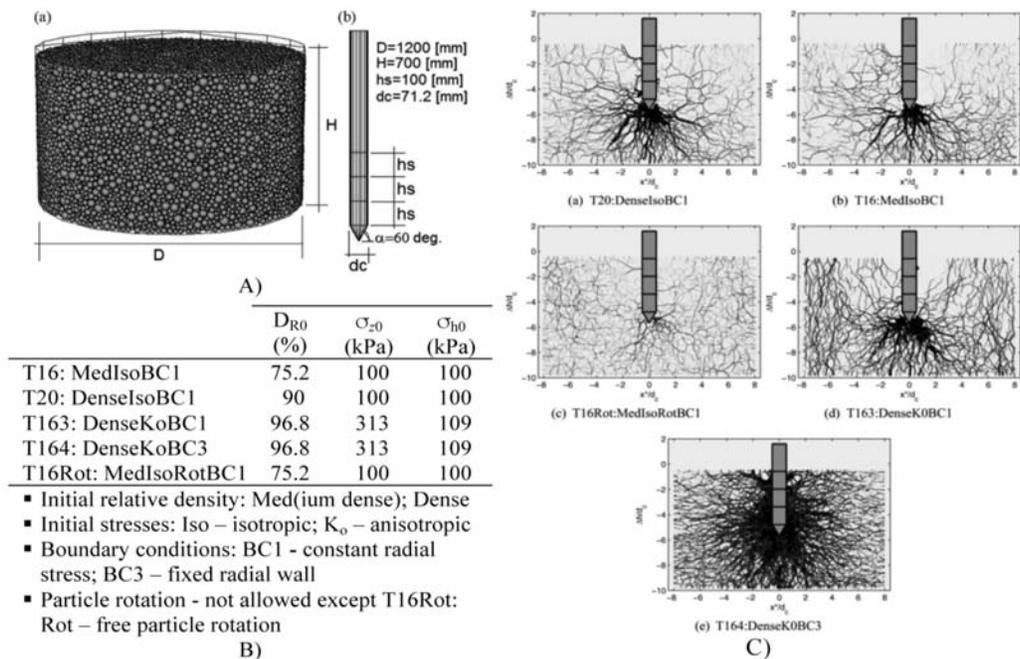


Fig. 10 – Estudo numérico baseado no DEM da execução de ensaios CPT numa câmara de calibração virtual. (A) Visualização dos componentes do modelo DEM e das suas dimensões: (a) câmara de calibração; (b) cone do CPT. (B) Características dos ensaios CPT realizados na câmara de calibração virtual. (C) Forças normais de contacto entre partículas pertencentes a uma secção vertical da câmara. (Butlanska *et al.*, 2014).

Os resultados das simulações DEM podem ser descritos usando variáveis discretas ou contínuas. As variáveis discretas são as diretamente relacionadas com as unidades básicas do modelo, ou seja, as partículas e os contactos; são exemplos as forças nos contactos, as orientações dos contactos, os deslocamentos das partículas, etc. As variáveis contínuas são as que também são empregues na mecânica dos meios contínuos: os tensores das tensões e das deformações são as mais comuns (Butlanska *et al.*, 2014). Nos estudos baseados em técnicas DEM há geralmente a preocupação de relacionar o que ocorre ao nível das partículas (escala micro), nomeadamente nos contactos entre as partículas, com a resposta global do conjunto (escala macro).

A maior parte dos estudos que têm sido publicados utilizam os códigos comerciais PFC 2D e PFC 3D (PFC, *Particle Flow Code*), que derivam do código inicial desenvolvido por Cundall e Strack (1979), ainda que comecem a aparecer alternativas (O'Sullivan, 2011).

A título de exemplo de aplicação do método dos elementos discretos considera-se um trabalho apresentado muito recentemente por Butlanska *et al.* (2014) sobre a simulação 3D de ensaios CPT realizados em câmara de calibração. A simulação foi feita com 59.986 partículas esféricas com um fator de escala de 50 (Figura 10 - A); um cálculo típico demorou cerca de 1 dia num PC (Intel Core 2 Quad, Q6600 @ 2.40 GHz, 3.25 GB of RAM). O estudo analisa a resposta na escala macro (resistência do cone em função da penetração), na escala intermédia (campos de tensão e de deformação obtidos por medianização e interpolação) e na escala micro (deslocamentos das partículas e distribuição das forças nos contactos). Foram estudados os efeitos das condições de fronteira radiais, do estado de tensão inicial, do estado de compactidade inicial e a influência da rotação das partículas. A Figura 10 sintetiza os ensaios realizados e mostra as forças normais de contacto entre partículas obtidas nos vários ensaios virtuais.

6.5 – Método dos Elementos/Partículas Finitas (PFEM)

O método dos elementos/partículas finitas (PFEM) tem vindo a ser desenvolvido sobretudo pelas equipas do *International Center for Numerical Methods in Engineering* (CIMNE) da Universidade Politécnica da Catalunha. Inicialmente foi concebido para resolver problemas de interação fluido-estrutura envolvendo grandes movimentos. O aspeto chave do PFEM reside na modelação do movimento dos nós (partículas) em ambos os domínios, fluido e estrutural; os nós são vistos como partículas que se podem mover livremente e podem mesmo separar-se do domínio principal, como acontece, por exemplo, com a queda de gotas de água. A malha liga os nós definindo o domínio discretizado onde as equações de governo são resolvidas, com acontece no FEM *standard*. Portanto, os meios contínuos são discretizados em partículas que se movem sujeitas às forças gravíticas e às forças de superfície, devidas à interação com as partículas vizinhas. Todas as propriedades físicas, tais como, a densidade, a viscosidade, a condutividade, etc., bem como as variáveis que definem o estado temporal, tais como, a velocidade e a posição, e ainda outras variáveis como a temperatura são atribuídas às partículas e são transportadas com os movimentos das partículas (Idelsohn *et al.*, 2004 e 2006; Oñate *et al.*, 2004 e 2006).

O método foi aplicado à resolução de problemas de interação fluido-estrutura (FSI, *fluid-structure interaction*) que implicam grandes movimentos de partículas sólidas ou de fluidos, nomeadamente da superfície livre (quebra de ondas, salpicamento, separação de partículas líquidas – queda de gotas –, etc.) ou que envolvem corpos submersos ou parcialmente submersos (hidrodinâmica de navios, estruturas offshore, descarregadores de barragens, escoamento em superfície livre (por exemplo, em canais), contentores de líquidos, etc.).

Mais recentemente o PFEM foi alargado para possibilitar a sua aplicação à análise de problemas complexos envolvendo a interação de fluidos com o solo e com a estrutura (FSSI, *fluid-soil-structure interaction*), tais como o movimento de pedras em correntes de água, a erosão das

margens de rios e junto a pilares de pontes, a estabilidade de quebra-mares, o estudo de escorregamentos de taludes e de avalanches, etc. (Oñate *et al.*, 2011). Nas Figuras 11 e 12 mostra-se alguns exemplos de aplicação do PFEM. Muito recentemente, Santos (2014) sugeriu a aplicação do PFEM ao estudo dos fenómenos de erosão interna.

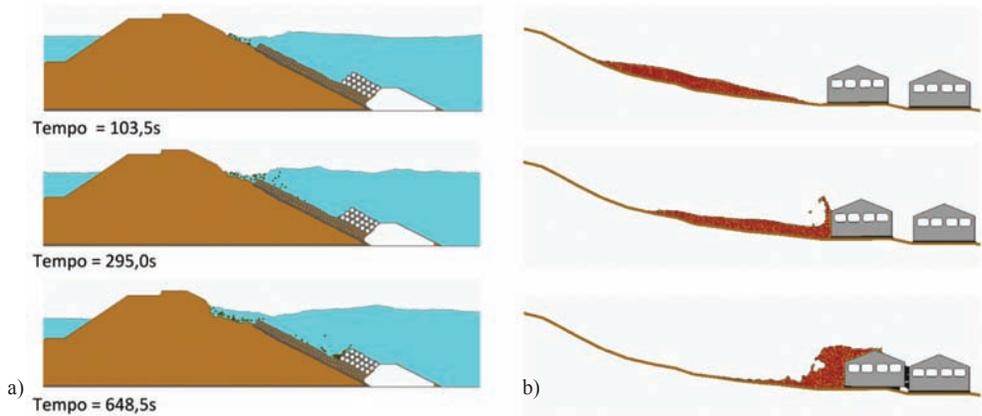


Fig. 11 – a) Evolução da erosão de uma zona não protegida de um quebra-mar devido à ondulação marítima; b) Deslizamento de terras sobre duas construções (Oñate *et al.*, 2011).

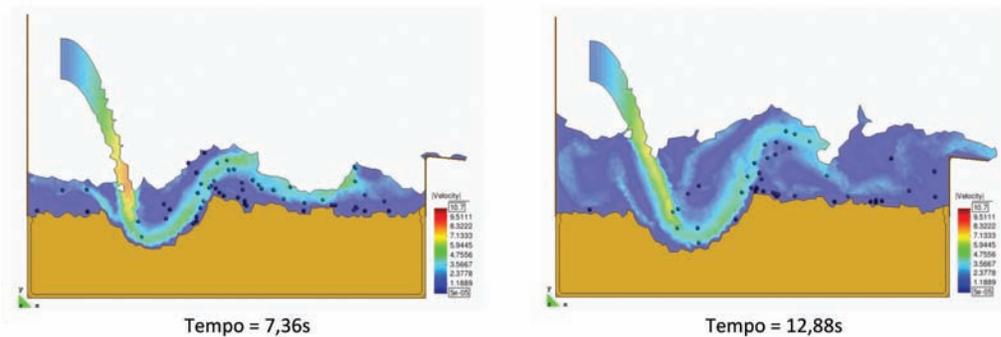


Fig. 12 –Erosão, transporte e deposição de partículas de solo na sequência do impacto de um jato de água (Oñate *et al.*, 2011).

6.6 – Método dos Elementos Finitos Aleatórios (RFEM)

O método dos elementos finitos aleatórios (RFEM, *Random Finite Element Method*) é uma extensão do método tradicional no qual se incorpora a incerteza de todas as variáveis principais. O método foi introduzido na década de 90 por Griffiths e Fenton (Griffiths & Fenton, 1993; Fenton & Griffiths, 1993), mas a sua aplicação tem aumentado a partir do início do presente século.

Um dos aspetos mais interessante do RFEM é o facto de permitir a consideração da variabilidade espacial dos terrenos, como se esquematiza na imagem inferior direita da Figura 13. Esta potencialidade pode ser usada para tratar questões com evidentes e importantes consequências

práticas. Para ilustrar esta possibilidade deita-se mão de um artigo apresentado muito recentemente pela equipe da Universidade Nova de Lisboa que tem vindo a trabalhar neste domínio (Simões *et al.*, 2014); foi estudado um problema clássico da Mecânica dos Solos – sapata corrida, de largura B, sujeita a uma carga vertical centrada e assente na superfície horizontal de um terreno com comportamento não drenado, definido pela resistência não drenada constante, c_u – mas com uma distribuição espacial aleatória de c_u , na senda do que fizeram muitos outros investigadores. Porém, os estudos anteriores eram 2D, não permitindo captar completamente a influência da variabilidade espacial (na 3ª direção); em contrapartida, Simões *et al.* (2014) usaram um modelo 3D que consiste na implementação do teorema da região superior da análise limite no quadro da formulação dos elementos finitos. As propriedades do terreno, definidas por um campo aleatório 3D, variam de elemento para elemento, sendo distribuídas por estes em função dos parâmetros da variável c_u , o valor médio, μ_{c_u} , e os que definem a incerteza, desvio padrão, σ_{c_u} , e a escala de flutuação (variabilidade espacial), θ_{c_u} . Considera-se que a variável c_u tem distribuição lognormal.

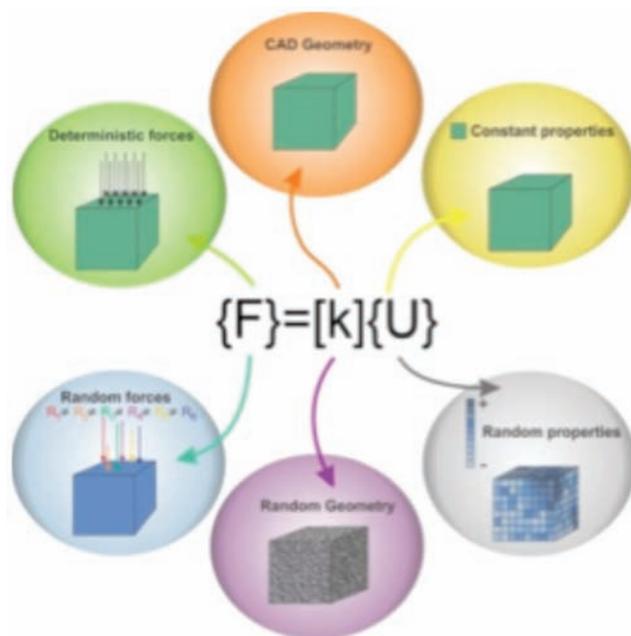


Fig. 13 –As imagens superiores representam a versão tradicional do FEM, determinística; as imagens inferiores representam o FEM aleatório (<http://randomfem.blogspot.pt/2013/02/what-is-random-finite-element-method.html?view=flipcard>).

A Figura 14 mostra os resultados da aplicação dos modelos 2D e 3D, sem se considerar a aleatoriedade do terreno. Em qualquer dos casos obteve-se para a capacidade de carga um valor praticamente coincidente com o conhecido valor teórico, que é $q_R = N_c c_u$, com $N_c = 2 + \pi$.

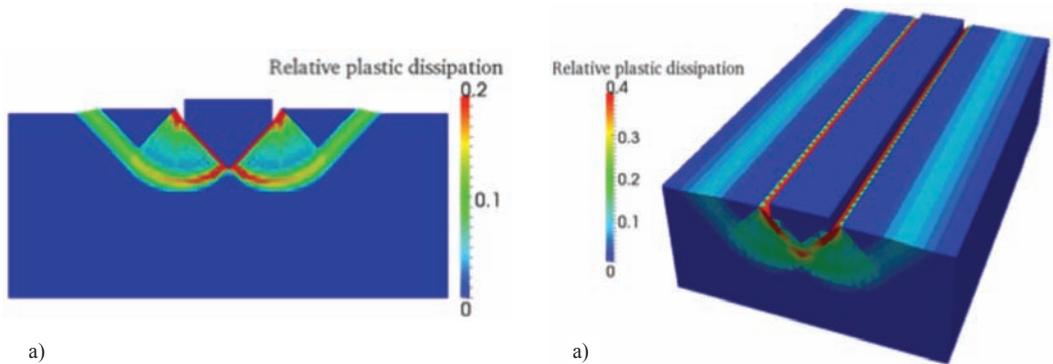


Fig. 14 – Mecanismo (de Prandtl) de colapso de uma sapata contínua sobre um solo homogêneo:
a) modelo 2D com 16.400 elementos triangulares de 6 nós;
b) modelo 3D com 428.544 elementos tetraédricos de 10 nós (Simões *et al.*, 2014).

A capacidade de carga foi analisada considerando a incerteza (caracterizada pela variância) e a heterogeneidade (variabilidade espacial, caracterizada pela escala de flutuações). Foram considerados dois casos, com os valores indicados no Quadro 7. Para cada caso foram consideradas 3 abordagens:

- modelo 2D (estado plano de deformação) com campo aleatório 2D, assumindo que a escala de flutuações na 3ª direção é infinita; esta abordagem segue as investigações anteriores;
- modelo 3D com campo aleatório 3D;
- modelo 2D com campo aleatório 3D, considerando em cada elemento o valor médio da propriedade ao longo da 3ª direção; esta abordagem é adiante referenciada por 2,5D.

Quadro 7 – Valores dos parâmetros estatísticos adotados nos cálculos [variável c_u (μ_{cu} - valor médio) com distribuição lognormal] (Simões *et al.*, 2014).

Desvio padrão, σ_{cu} (kPa)	Coefficiente de variação, $CV_{cu} = \sigma_{cu} / \mu_{cu}$ (m)	Escala de flutuações ⁽¹⁾ $\theta_{Incu} = \theta_{cu}$	$\Theta_{Incu} = \Theta_{cu} = \theta_{cu} / B$
50	0,5	2,0	2,0
100	1,0	8,0	8,0

(1) Distância de correlação

Foram executados para cada caso 2200 cálculos com o modelo 3D correspondentes a outras tantas amostragens da variabilidade espacial dos terrenos considerados. As Figuras 15 e 16 exemplificam graficamente os resultados obtidos.

Como se constata na Figura 17 os histogramas resultantes dos dois conjuntos de cálculos são muito bem modelados por distribuições lognormais, como seria expectável dado que se considerou que a resistência não drenada possui esse tipo de distribuição.

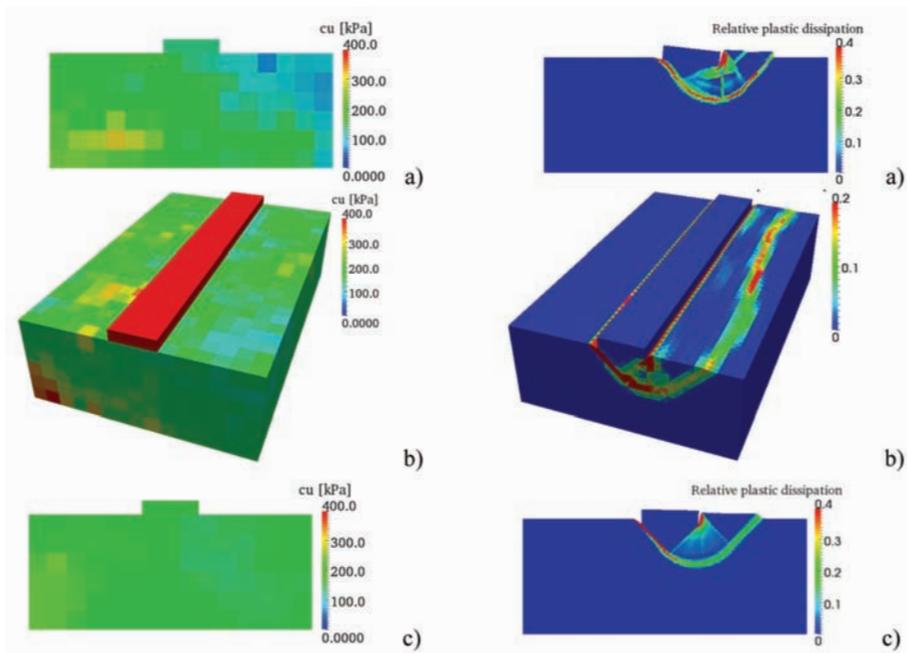


Fig. 15 – $CV_{cu} = 0,5$ e $\Theta_{incu} = \Theta_{cu} = 8$; mecanismo de colapso (lado direito) correspondente a uma amostra da distribuição espacial de c_u (lado esquerdo):
a) abordagem 2D; b) abordagem 3D; c) abordagem 2,5D (Simões *et al.*, 2014).

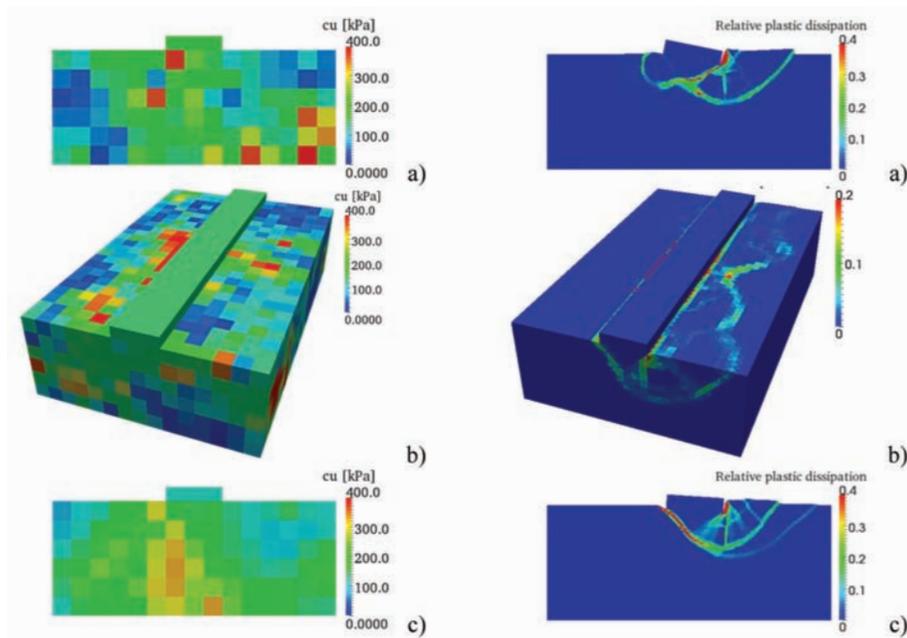


Fig. 16 – $CV_{cu} = 1,0$ e $\Theta_{incu} = \Theta_{cu} = 2$; mecanismo de colapso (lado direito) correspondente a uma amostra da distribuição espacial de c_u (lado esquerdo):
a) abordagem 2D; b) abordagem 3D; c) abordagem 2,5D (Simões *et al.*, 2014).

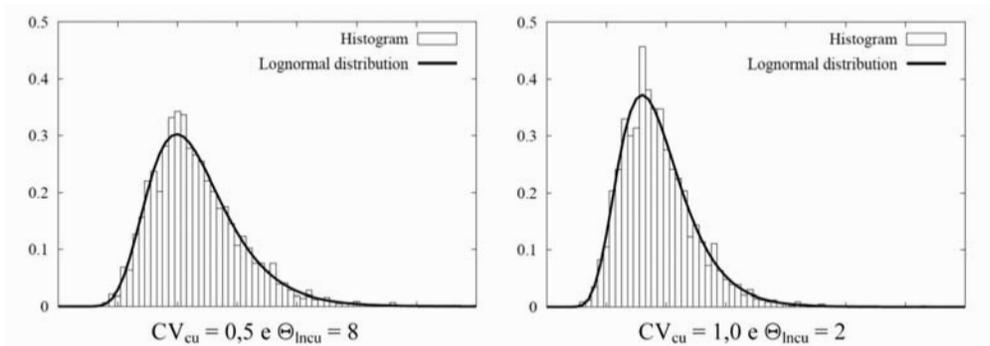


Fig. 17 – Distribuição probabilística da capacidade de carga – modelo 3D (Simões *et al.*, 2014).

No Quadro 8 apresentam-se os parâmetros (valor médio e desvio padrão) que caracterizam as distribuições lognormais resultantes dos 3 tipos de cálculos, 2D, 3D e 2,5D. Considerou-se a variável normalizada, definida do seguinte modo.

$$\Phi = F_{R\text{Nor.}} = \frac{F_R}{(2 + \pi) \mu_{cu} B L} = \frac{c_u^*}{\mu_{cu}} \quad (1)$$

Note-se que as variáveis c_u^* e c_u são diferentes, pois os respectivos parâmetros estatísticos são todos diferentes; a variável c_u^* coincide com c_u apenas quando não se considera a variabilidade espacial (1ª linha em ambos os casos). Acresce ainda que, enquanto a variabilidade de c_u é caracterizada por dois parâmetros, o coeficiente de variação, σ_{cu} , e a escala de flutuações normalizada, $\Theta_{cu} = \theta_{cu} / B$, a variabilidade de c_u^* é definida apenas pelo seu coeficiente de variação, que incorpora a variabilidade espacial. Portanto, a variabilidade espacial, modelada através dos cálculos, é refletida em c_u^* .

Quadro 8 – Parâmetros estatísticos das distribuições resultantes dos cálculos efetuados (mostradas na Figura 17 para as abordagens 3D) (adaptado de Simões *et al.*, 2014).

		$\mu_\Phi = \mu_{cu}^* / \mu_{cu}$	$\sigma_\Phi = \sigma_{cu}^* / \mu_{cu}$	$CV_\Phi = CV_{cu}^*$	k_Φ	$CVG_{cu}^{(1)}$	$E(\theta_{cu} / B)$
$CV_{cu} = 0,5$ $\Theta_{Incu} = \Theta_{cu} = 8$	s/var.esp.	1	0,5	0,5	0,411	0,5	1
	var.esp. - 2D	0,867	0,380	0,438	0,398	0,518	1,035
	var.esp. - 3D	0,927	0,327	0,353	0,497	0,395	0,789
	var.esp. - 2,5D	0,929	0,329	0,354	0,497	0,395	0,790
$CV_{cu} = 1,0$ $\Theta_{Incu} = \Theta_{cu} = 2$	s/var.esp.	1	1	1	0,180	1	1
	var.esp. - 2D	0,590	0,359	0,609	0,200	0,930	0,930
	var.esp. - 3D	0,723	0,239	0,331	0,404	0,510	0,510
	var.esp. - 2,5D	0,835	0,277	0,332	0,465	0,431	0,431

(1) $CVG_{cu} = CV_{cu} E(\theta_{cu} / B)$

Na Figura 18 mostra-se as distribuições probabilísticas da capacidade de carga normalizada traçadas usando os parâmetros do Quadro 8. Nas partes inferiores da figura, onde estão desenhados os trechos iniciais das funções de distribuição acumulada, pode-se apreciar a diferença que existe entre os valores característicos da capacidade de carga normalizada em função do tipo de abordagem. O valor característico, definido como sendo o valor de Φ para o qual existe uma probabilidade de 5% de ocorrer um valor menor, pode ser calculado pela expressão (2), o que é feito no Quadro 8:

$$k_{\Phi} = (\mu_{\Phi} / p_{\Phi}) \exp[-1,645 \sqrt{2} \sqrt{(\ln p_{\Phi})}] \quad \text{com} \quad p_{\Phi} = \sqrt{(1 + CV_{\Phi}^2)} \quad (2)$$

Os resultados do Quadro 8 ou da Figura 18 respeitantes a k_{Φ} mostram que o valor característico da capacidade resistente é fortemente afetado pela variabilidade espacial na 3ª direção. Quando se considera essa variabilidade (abordagem 3D) o valor característico aumenta mais de 20%, no 1º caso ($CV_{cu} = 0,5$ e $\Theta_{Incu} = \Theta_{cu} = 8$, distância de correlação relativamente elevada), e mais de 100%, no 2º ($CV_{cu} = 1,0$ e $\Theta_{Incu} = \Theta_{cu} = 2$, distância de correlação relativamente curta), em relação às abordagens em que não se considera a variabilidade espacial ou ela é considerada apenas em 2D. As abordagens 2,5D conduzem a resultados muito bons, se a escala de flutuações for relativamente elevada, e apenas razoáveis, se for relativamente curta.

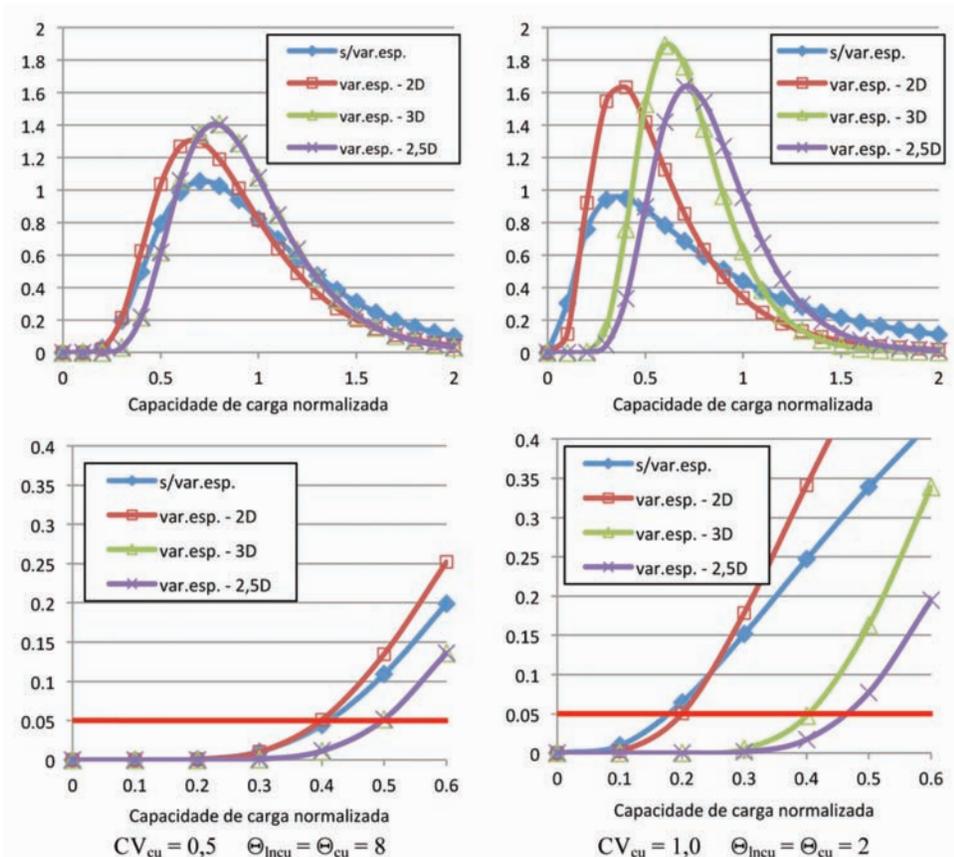


Fig. 18 – Distribuição probabilística da capacidade de carga normalizada (em cima, representa-se as funções de densidade de probabilidade, f_{Φ} , e em baixo a porção inicial das funções de distribuição acumulada, F_{Φ}).

Os resultados agora obtidos podem ser usados para melhorar a definição do valor característico do parâmetro inicial c_u . Para tal considere-se que a variabilidade global é definida por um coeficiente de variação global, CVG_{cu} , que, por hipótese, resulta do produto do contributo das duas variabilidades, a incerteza, através do coeficiente de variação CV_{cu} , e a heterogeneidade, através de uma função da escala de flutuações normalizada, $E(\theta_{cu} / B)$, ou seja

$$CVG_{cu} = CV_{cu} E(\theta_{cu} / B) \quad (3)$$

A função $E(\theta_{cu} / B)$ tem valor unitário quando a escala de flutuações é infinita (quer dizer, não se entra em linha de conta com a variabilidade espacial). Considerando o coeficiente de variação global, o valor característico de c_u (distribuição lognormal) é definido por

$$k_{cu} = (\mu_{cu} / p_{cu}) \exp[-1,645 \sqrt{2} \sqrt{(\ln p_{cu})}] \quad \text{com} \quad p_{cu} = \sqrt{(1 + CVG_{cu}^2)} \quad (4)$$

Considere-se agora que o valor característico da capacidade de carga da sapata calculada com os parâmetros μ_{cu} e CVG_{cu} é igual ao calculado com μ_{cu*3D} e CV_{cu*3D} , o que implica $k_{cu} = k_{cu*3D}$. Daqui conclui-se sequencialmente que

$$k_{cu} = k_{cu*} = k_{\phi} \mu_{cu} \rightarrow k_{\phi} = \exp[-1,645 \sqrt{2} \sqrt{(\ln p_{cu})}] / p_{cu} \quad \text{com} \quad p_{cu} = \sqrt{(1 + CVG_{cu}^2)} \quad (5)$$

Atendendo aos valores de k_{ϕ} do Quadro 8 e usando a expressão (5), calcula-se CVG_{cu} e, depois, $E(\theta_{cu} / B)$, o que está feito no mesmo quadro. Esta função tende para 1 quando a escala de flutuação tende para infinito, pelo que poderá ser do tipo hiperbólico; por outro lado, a função deve ser nula quando a escala de flutuações também o for. Calculou-se para a abordagem 3D o parâmetro da hipérbole que garante um melhor ajuste aos dois valores disponíveis e representa-se a curva correspondente na Figura 19.

$$E(\theta_{cu} / B) = \frac{\theta_{cu} / B}{\theta_{cu} / B + 2,028} \quad (6)$$

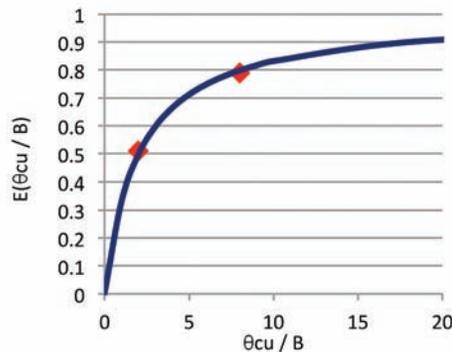


Fig. 19 – Função $E(\theta_{cu} / B)$ determinada com base nos resultados da abordagem 3D.

Em suma, demonstrou-se a utilidade prática do RFEM para orientar de forma bem sustentada a escolha dos valores dos parâmetros característicos das variáveis que afetam os dimensionamentos. É óbvio que o exemplo apresentado é muito simples e que ainda se dispõe de poucos resultados, pelo que o que se fez constitui pouco mais do que uma hipótese de trabalho. Terá que ser através da acumulação de resultados de experiências numéricas como as realizadas por Simões *et al.* (2014) que essa hipótese poderá ser validada ou não. Há igualmente que estudar quais os outros fatores que afetam a função $E(\theta_{cu} / B)$, designadamente, o tipo de problema em consideração.

Cada uma das experiências numéricas descritas implica um enorme volume de cálculos; por isso, é muito interessante a abordagem alternativa acima designada por 2,5D, proposta por Simões *et al.* (2014); o seu ajuste à abordagem “forte” (3D) deve, por isso, ser estudado.

7 – AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a cuidada revisão do texto feita pelo colega e amigo Professor José Couto Marques.

8 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alves Costa, P.; Calçada, R.; Couto Marques, J.; Cardoso, A.S. (2010). *A 2.5D finite element model for simulation of unbounded domains under dynamic loading*. Proceedings of the 7th European Conference on Numerical Methods in Geotechnical Engineering, T. Benz & S. Nordal (Eds.): Trondheim, pp. 782-790.
- Alves Costa, P.; Calçada, R.; Cardoso, A.S. (2012). *Track-ground vibrations induced by railway traffic: In-situ measurements and validation of a 2.5D FEM-BEM model*. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, **32**(1):111-128.
- Amado Mendes, P.; Godinho, L.; Alves Costa, P. (2014). *2.5D modeling of soil-structure interaction using a coupled MFS-FEM formulation*. Proceedings of the 11th World Congress on Computational Mechanics. E. Oñate, J. Oliver & A. Huerta (Eds.).
- Andersen, L. (2002). *Wave propagation in infinite structures and media*, Aalborg University.
- Andersen, L.; Nielsen, S.; Krenk, S. (2007). *Numerical methods for analysis of structure and ground vibration from moving loads*. Computers and Structures, **85**, pp. 43-58.
- Arroyo, K.; Bhattacharya, P.; Biljecki, F.; Kalpoe, D.; Muñoz, A.; Van der Torren, P.T.; Verlaar, S.; Yu, H.; Verbree, E.; Eleftherakis, D.; Van Zwieten, G.J.; Hanssen, R. (2009). *Satellite radar observation feasibility study for large infrastructural public works: A case study on the Delft train tunnel*. Final report. Geomatics Synthesis Project 4, Delft University of Technology.
- ASCE - American Society of Civil Engineers (2007). *The vision for Civil Engineering in 2025* (based on the Summit on the Future of Civil Engineering, June 21-22, 2006). Task Committee to Plan a Summit on The Future of the Civil Engineering Profession.
- Babu, G.L.S. (2012). *Emerging aspects in Microbial Geotechnology and Ground Improvement*. Indian Institute of Science, Bangalore. (<http://nptel.ac.in/courses/105108075/module9/Lecture39.pdf>)
- Barbour, S.L.; Krahn, J. (2004). *Numerical Modelling – Prediction or Process?* Geotechnical News, December 2004.

- Boyd, P.D. (2008). *Ranking geo-engineering schemes*. Nature Geoscience, 1: 722-724.
- Brandl, H. (2011). *Importance of geotechnics in today's and future civil engineering - Public image, risks and responsibilities and future aspects of civil/geotechnical engineering*. e-GFOS, Electronic Journal of the Faculty of Civil Engineering Osijek, no.3, pp. 120-136.
- Butlanska, J.; Arroyo, M.; Gens, A.; O'Sullivan, C. (2014). *Multi-scale analysis of cone penetration test (CPT) in a virtual calibration chamber*. Canadian Geotechnical Journal, 51(1): 51-66.
- Cardoso, A.S. (2004). *Modelação e segurança*. Conferência temática, 9º Congresso Nacional de Geotecnia, 19-23 abril, Aveiro.
- Cardoso, A.S. (2015). *Desenvolvimento da Geotecnia. Condicionantes gerais e específicas*. Revista Geotecnia, nº 135, pp. 05-39.
- Cardoso, A.S. (2016). *Desenvolvimento da Geotecnia. Necessidade infraestruturais e perspectivas genéricas*. Revista Geotecnia, nº 136, pp. 03-26.
- Carter, J.P.; Desai, C.S.; Potts, D.M.; Schweiger, H.F.; Sloan, S.W. (2000). *Computing and Computer Modelling in Geotechnical Engineering*. International Conference on Geotechnical and Geological Engineering, GeoEng 2000, 19-24 November 2000, Melbourne, Australia, 1157-1252.
- Cascini, L.; Peduto, D.; Reale, D.; Arena, L.; Ferlisi, S.; Verde, S.; Fornaro, G. (2013). *Detection and monitoring of facilities exposed to subsidence phenomena via past and current generation SAR sensors*. Journal of Geophysics and Engineering, 10, 6, 64001-64014. IOP Publishing.
- Chowdhury, R.; Flentje, P. (2007). *Perspectives for the future of Geotechnical Engineering*. Proceedings of the International Conference on Civil Engineering for the New Millennium: Opportunities and Challenges, Bengal Engineering College, Shibpur, India.
- Clough, G.W. (2006). *The Past and Future of Computing in Geotechnical Engineering: The Inside-out View*. Geo Institute's 2006 Geo Congress, Atlanta, Georgia.
- Cook, R.D.; Malkus, D.S.; Plesha, M.E.; Witt, R.J. (2002) *Concepts and Applications of Finite Element Analysis*, 4th edition. John Wiley & Sons.
- Couto Marques, J.; Alves Costa, P.; Monteiro, A. (2002). *Modelação numérica de maciços semi-indefinidos*. Atas do 8º Congresso Nacional de Geotecnia: Lisboa, pp. 959-968.
- Cundall, P.A. (2001). *A discontinuous future for numerical modelling in geomechanics?* Proc. Instit. Civ. Eng. Geotech. Eng., 149(1), 41-47.
- Cundall, P.; Strack, O. (1979). *A discrete numerical model for granular assemblies*. Géotechnique, 29(1), 47-65.
- DeJong, J.T.; Soga, K.; Kavazanjian, E.; Burns, S.; Van Paassen, L.A.; Al Qabany, A.; Aydilek, A.; Bang, S.S.; Burbank, M.; Caslake, L.F.; Chen, C.Y.; Cheng, X.; Chu, J.; Ciurli, S.; Esnault-Filet, A.; Fauriel, S.; Hamdan, N.; Hata, T.; Inagaki, Y.; Jefferis, S.; Kuo, M.; Laloui, L.; Larrahondo, J.; Manning, D.A.C.; Martinez, B.; Montoya, B.M.; Nelson, D.C.; Palomino, A.; Renforth, P.; Santamarina, J.C.; Seagren, E.A.; Tanyu, B.; Tsesarsky, M.; Weaver, T. (2013). *Biogeochemical processes and geotechnical applications: progress, opportunities and challenges*. Géotechnique, 63(4), 287-301.
- Estorff, O.V.; Kausel, E. (1989). Coupling of boundary and finite elements for soil-structure interaction problems. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 18, pp. 1065-1075.

- Fenton, G.A.; Griffiths, D.V. (1993). *Statistics of block conductivity through a simple bounded stochastic medium*. Water Resource Res., 29(6), 1825-1830.
- 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, Vol. 15, Issue 4, pp. 611-621.
- Francisca, F.M. (2011). *About the future of geotechnical engineering: a view from South America*. Proceedings of the 2011 Pan-Am CGS Geotechnical Conference (14th Pan-American Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering), Paper 1211.
- François, S.; Schevenels, M.; DeGrande, G.; Borgions, J.; Thyssen, B. (2008). *A 2.5D finite element-boundary element model for vibration isolating screens*. Proceedings of ISMA 2008 - International Conference on Noise and Vibration Engineering, P. Sas & B. Bergen (Eds), Leuven, pp. 2765-2776.
- François, S.; Schevenels, M.; Galvin, P.; Lombaert, G.; DeGrande, G. (2010). *A 2.5D coupled FE-BE methodology for the dynamic interaction between longitudinally invariant structures and a layered halfspace*. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 199 (23-24), pp. 1536-1548.
- Griffiths, D.V.; Fenton, G.A. (1993). *Seepage beneath water retaining structures founded on spatially random soil*. Géotechnique, 43(4), 577-587.
- Hijaj, M.; Lyamin, A.V.; Sloan, S.W. (2005). *Numerical limit analysis solutions for the bearing capacity factor N_γ* . Int. J. Solids and Structures, 42 (5-6), pp. 1681-1704.
- Idelsohn, S.R.; Oñate, E.; Del Pin, F. (2004). *The particle finite element method: a powerful tool to solve incompressible flows with free-surfaces and breaking waves*. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 61: 964-989.
- Idelsohn, S.R.; Oñate, E.; Del Pin, F.; Calvo, N. (2006). *Fluid-structure interaction using the particle finite element method*. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, Volume 195, Issues 17-18, pp. 2100-2123.
- Jardine, R. (2013). *Advanced laboratory testing in research and practice*. The 2nd Bishop Lecture. Proceedings of the 18th ICSMGE, Paris.
- Jardine, R. (2014). *Advanced laboratory testing in research and practice: the 2nd Bishop Lecture*. ICE - Geotechnical Research, Volume 1, Issue 1, pp. 2-31.
- Jiang, M.; Yu, H.-S. (2006). *Application of Discrete Element Method to Geomechanics*. Modern Trends in Geomechanics, W. Wu and H.-S. Yu (Eds.), Springer, 560 p.
- Kim, D.; Park, K.; Kim, D. (2014). *Effects of Ground Conditions on Microbial Cementation in Soils*. Materials 7, 143-156.
- Kolditz, O.; Bauer, S.; Bilke, L.; Böttcher, N.; Delfs, J.O.; Fischer, T.; Görke, U.J.; Kalbacher, T.; Kosakowski, G.; McDermott, C.I.; Park, C.H.; Radu, F.; Rink, K.; Shao, H.; Shao, H.B.; Sun, F.; Sun, Y.Y.; Singh, A.K.; Taron, J.; Walther, M.; Wang, W.; Watanabe, N.; Wu, Y.; Xie, M.; Xu, W.; Zehner, B. (2012). *OpenGeoSys: an open source initiative for numerical simulation of thermo-hydro-mechanical/chemical (THM/C) processes in porous media*. Environmental Earth Sciences 67(2): 589-599.

- Long, J.C.S. (2006). Preface of Geological and Geotechnical Engineering in the New Millennium. Opportunities for Research and Technological Innovation. Committee on Geological and Geotechnical Engineering in the New Millennium: Opportunities for Research and Technological Innovation, Committee on Geological and Geotechnical Engineering, Board on Earth Sciences and Resources, Division on Earth and Life Studies, National Research Council, The National Academies Press.
- Lopes, P.; Alves Costa, P.; Ferraz, M.; Cardoso, A.S. (2014). *Numerical modelling of vibrations induced by railway traffic in tunnels: from the source to the nearby buildings*. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 61-62, pp. 269-285.
- Misra, A.; Basu, D. (2011). *Sustainability in geotechnical engineering*. Internal Geotechnical Report 2011-2, Department of Civil and Environmental Engineering, University of Connecticut.
- Nelson, P.P. (2013). *Uncertainty and Resilience as Key Frameworks for the Future of Urban Geotechnical Engineering*. A Presentation to the Geotechnical Group of the ASCE Metropolitan Section, October 31, 2013.
- NRC - National Research Council (2006). *Geological and Geotechnical Engineering in the New Millennium. Opportunities for Research and Technological Innovation*. Committee on Geological and Geotechnical Engineering in the New Millennium: Opportunities for Research and Technological Innovation, Committee on Geological and Geotechnical Engineering, Board on Earth Sciences and Resources, Division on Earth and Life Studies, National Research Council, The National Academies Press.
- Oñate, E.; Celigueta, M.A.; Idelsohn, S.R.; Salazar, F.; Suárez, B. (2011). *Possibilities of the particle finite element method for fluid-soil-structure interaction problems*. Computational Mechanics, 48(3):307-318.
- Oñate, E.; Idelsohn, S.R.; Del Pin, F.; Aubry, R. (2004). *The particle finite element method. An overview*. International Journal of Computational Methods, Vol. 1 No. 2 (2004), 267-307.
- Oñate, E.; Idelsohn, S.R.; Celigueta, M.A.; Rossi, R. (2006). *Advances in the Particle Finite Element Method for Fluid-Structure Interaction Problems*. III European Conference on Computational Mechanics.
- O'Sullivan, C. (2011). *Particle-based discrete element modeling: geomechanics perspective*. International Journal of Geomechanics, ASCE, 11(6): 449-464.
- Perissin, D.; Wangb, Z.; Lin, H. (2012). *Shanghai subway tunnels and highways monitoring through Cosmo-SkyMed Persistent Scatterers*. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 73, 58-67.
- Randolph, M.F. (2005). *Challenges of Offshore Geotechnical Engineering*. 16th ICSMGE, Osaka, Japan.
- Randolph, M.F.; Gaudin, C.; Gourvenec, S.M.; White, D.J.; Boylan, N.; Cassidy, M.J. (2011). *Recent advances in offshore geotechnics for deep water oil and gas developments*. Ocean Engineering, 38, pp. 818-834.
- Rocca, R.J.; Redolfi, E.R.; Terzariol, R.E. (2006). *Características geotécnicas de los loess de Argentina*. Rev. Int. de Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil, 6(2), 149-166.
- Santamarina, J.C. (2012). *Energy Geotechnology: The Role of Geotechnical Engineers in the Energy Challenge*. The British Geotechnical Association BGA Touring Lecture 2012. (http://www.ice.org.uk/ICE_Web_Portal/media/northernireland/Santamarina---Energy-Geotechnology---BGA-2012---DISTRIBUTION.pdf)

- Santamarina, J.C. (2014). *Energy Geotechnology: Enabling New Insights into Soil Behavior*. Karl Terzaghi Lecture. Geo-Congress 2014, Geo-Characterization and Modeling for Sustainability, A.J. Puppala, P. Bandini and T.C. Sheahan (Eds.), Geotechnical Special Publication No. 235, Geo-Institute, ASCE.
- Santamarina J.C.; Cho, G.C. (2011). *Energy geotechnology*. KSCE Journal of Civil Engineering, 15(4): 607-610.
- Santos, R.N.C. (2014). *Experimental Investigation on Limitation of the Progression of Internal Erosion in Zoned Dams*. PhD Thesis, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa.
- Schlosser, F.; Plumelle, C.; Frank, R.; Puech, A.; Gonin, H.; Rocher-Lacoste, F.; Simon, B.; Bernardini, C. (2013). *Innovations Françaises en Géotechnique: les Projets Nationaux de Recherche*. Proceedings of the 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Paris.
- Shackelford, C.D. (2005). *Environmental Issues in Geotechnical Engineering*. Proceedings of the 16th Inter. Conf. on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Osaka, Millpress, Vol.1.
- Sheng, X.; Jones, C.; Thompson, D. (2006). *Prediction of ground vibration from trains using wavenumber finite and boundary element method*. Journal of Sound and Vibration, **293**: 575-586.
- Simões, J.T.; Neves, L.C.; Antão, A.N.; Guerra, N.M.C. (2014). *Probabilistic analysis of bearing capacity of shallow foundations using 3D limit analyses*. International Journal of Computational Methods, Volume 11, Issue 02.
- Simpson, B.; Tatsuoka, F. (2008). *Geotechnics: the next 60 years*. Géotechnique, 58(5): 357-368.
- Sommerfeld, A. (1949). *Partial Differential Equations in Physics*. New York: Academic Press.
- Tatsuoka, F. (2011). *Laboratory stress-strain tests for developments in geotechnical engineering research and practice*. The 1st Bishop Lecture. Proceedings of the 5th International Symposium on Deformation Characteristics of Geomaterials, Seoul.
- Terzaghi, K. (1936). *Relation between soil mechanics and foundation engineering*. In Proceedings of the International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Harvard University, Vol.3, pp. 13-18.
- Terzariol, R.E. (2009). *40 años de estudio de los suelos loessicos en Córdoba, Argentina*. Desafíos y avances de la geotecnia joven en Sudamérica (F.M. Francisca, Ed.), Alejandría, Córdoba, Argentina.
- Van Paassen, L.A. (2010). *Biological ground improvement. Predicting mechanical properties during biocementation?* Delft University of Technology (http://alertgeomaterials.eu/data/workshop/2010/Session%20III/05_VanPaassen.pdf)
- Van Paassen, L.A.; Harkes, M.P.; Van Zwieten, G.A.; Van der Zon, W.H.; Van der Star, W.R.L.; Van Loosdrecht, M.C.M. (2009). *Scale up of BioGrout: a biological ground reinforcement method*. Proceedings of the 17th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Alexandria, Egypt, M. Hamza *et al.* (Eds.), IOS Press, 2328-2333.
- Venda Oliveira, P.; da Costa, M.; Costa, J.; Nobre, M. (2015). *Comparison of the ability of two bacteria to improve the behavior of sandy soil*. Journal of Materials in Civil Engineering, ASCE, 27(1):06014025.
- Whiffin, V.S.; Van Paassen, L.A.; Harkes, M.P. (2007). *Microbial carbonate precipitation as a soil improvement technique*. Geomicrobiology Journal, 24: 417-423.