

DESENVOLVIMENTO DA GEOTECNIA. CONDICIONANTES GERAIS E ESPECÍFICAS

Emerging trends in geotechnical engineering – Part 1

António Silva Cardoso*

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

1 – INTRODUÇÃO

Nos últimos anos o rumo que o desenvolvimento da Geotecnia vai seguir tem suscitado o interesse de muitas instituições e indivíduos, adotando perspetivas muito diversas, pontuais ou globais, locais, regionais ou mundiais, mais ou menos relacionadas com a envolvente económica e social (ASCE, 2007; IITG / IGS, 2012; NRC, 2006; Cadden *et al.*, 2004; Clough, 2006; Hajra, 2012; Keaton, 2010; Lo e Wang, 2012; Marr, 2006; Matos Fernandes, 2010; Reddy, 2011; Shackelford, 2005; Brandl, 2011; Bredevelde, 2012; Chowdhury e Flentje, 2007; Francisca, 2011; Long, 2006; Nelson, 2013; Simpson e Tatsuoka, 2008; Tan e Chow, 2009).

A engenharia geotécnica é um dos primeiros domínios técnico-científicos a intervir em qualquer projeto de infraestruturas ou de desenvolvimento urbano, sendo, em muitos casos, o mais

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

importante. No decurso dos tempos muitas inovações metodológicas, analíticas, numéricas e tecnológicas foram sendo propostas 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 vastos: previsão do comportamento dos terrenos, problemas relacionados com os sismos, métodos de melhoramento e reforço de terrenos, aplicações geo-ambientais, utilização de sub-produtos, estruturas subterrâneas, estruturas marítimas (*offshore*), métodos de projeto e de construção sob condições especiais, pouco conhecidas ou de elevado risco, etc..

A globalização mundial - quer na vertente económica (produção e comércio), quer no tocante à circulação da informação -, a utilização não sustentável dos recursos, as alterações ambientais causadas por razões antrópicas, o aumento dos desastres naturais, sobretudo dos de natureza hídrica, a reconhecida carência de infraestruturas para dar resposta às necessidades das populações e também para proteção contra as consequências das alterações climáticas, criam um quadro que condiciona decisivamente a evolução da engenharia e, obviamente, também da engenharia geotécnica. Desde logo exige-se uma abordagem dos problemas e das suas soluções mais global, integrada e multidisciplinar.

Neste conjunto sequencial de artigos fornece-se uma perspetiva do desenvolvimento futuro da geotecnia, mas partindo de uma caracterização das condicionantes sociais, económicas e ambientais atuais e das necessidades das sociedades humanas. A este propósito é relevante o que, em 2011, disse Peter Hansford ao tomar posse como Presidente da *Institution of Civil Engineers*: “(...) *Continuamos a precisar de mais infraestruturas de transporte, (...) de mais capacidade de geração de energia, de melhores instalações hidráulicas e de recolha e tratamento de resíduos e de todos os outros ingredientes essenciais para apoiar a nossa economia. Em todo o mundo, as comunidades humanas precisam desesperadamente de novas infraestruturas ou de melhoramento das existentes para suportar uma população mundial em crescimento para 9 mil milhões de pessoas em 2050 (...)*”. Mas Peter Hansford também realçou que os engenheiros, no desenvolvimento da sua atividade, têm que atender às condicionantes sociais, económicas e ambientais cada vez mais estritas, incluindo o escrutínio social a que, em todo o mundo, a indústria da construção e das obras públicas está crescentemente sujeita. Ou seja, os engenheiros enfrentam o desafio de “(...) *fazerem mais por menos (...)*”, de procurarem “(...) *alcançar o benefício máximo - para a sociedade ou para os investidores - a partir dos recursos de que dispõem; trata-se de fazer com que cada euro conte; trata-se de fazer com que cada molécula de carbono conte; e trata-se de fazer com que todas as tarefas contem (...)*”.

A perspetiva que se desenvolve neste conjunto de textos é, naturalmente, parcelar e incompleta, não pretendendo mais do que, por um lado, enunciar um conjunto de fatores, tanto sociais, económicos e ambientais, como próprios da disciplina, isto é, geotécnicos, e, por outro lado, apontar vias de desenvolvimento futuro que ao autor parecem, umas (as condicionantes) e outras (as vias de desenvolvimento), das mais relevantes. Por isso, como não podia deixar de ser, é uma perspetiva pessoal, condicionada pelos interesses e pela experiência do autor.

Depois deste primeiro artigo, onde se trata as questões de enquadramento, procede-se a uma breve caracterização das necessidades infraestruturais mundiais, utilizando dados elaborados por organizações nacionais e internacionais que incluem estimativas quantificadas, e enuncia-se perspetivas genéricas para a evolução da geotecnia. Nos dois últimos artigos aponta-se rumos focalizados em certos temas, que ao autor parecem interessantes e úteis para o futuro.

2 – ENQUADRAMENTO. QUESTÕES GERAIS

2.1 – Assuntos abordados

Neste capítulo aborda-se questões de caráter muito diversificado que se entende serem fatores que condicionam a evolução da geotecnia, tanto por razões societais, de enquadramento, como por razões tecnológicas, de meios disponíveis para o desenvolvimento disciplinar. Entendeu-se pertinente abordar os seguintes temas:

- a) as alterações climáticas e as suas implicações, nomeadamente, o aumento dos desastres naturais, sobretudo de natureza hidrológica;
- b) o aumento da população mundial e o crescimento da urbanização;
- c) a preocupação social com o modo como se aplica o investimento público e o exercício do escrutínio social sobre a questão do cumprimento de estimativas de custos e de prazos;
- d) as disponibilidades tecnológicas; para as ilustrar selecionou-se o domínio tecnológico que provavelmente maior evolução experimentou, até porque afetou decisivamente todos os outros; assim analisa-se brevemente a evolução dos meios de cálculo e do seu custo;
- e) a complexidade que cada vez mais afeta os projetos e as obras, quer a complexidade intrínseca, quer a que resulta dos fatores de enquadramento.

Como não podia deixar de ser, a visão apresentada é limitada e resumida na argumentação. Pretende-se, essencialmente, apresentar algumas das grandes tendências de evolução social do mundo (o aumento da população e da urbanização, a preocupação com o ambiente, o aumento do escrutínio social) e alguns dos fatores que condicionam essa evolução, quer naturais (alterações climáticas e desastres naturais), quer tecnológicos, sendo que é nestes que repousa a possibilidade de se encontrar as respostas adequadas aos problemas existentes, respostas essas enquadradas e limitadas pelos fatores sociais pertinentes, nomeadamente a questão da sustentabilidade.

2.2 – Mudanças climáticas e aumento de desastres naturais

2.2.1 – *Preâmbulo*

A quantidade e qualidade dos dados que têm vindo a ser recolhidos e a profundidade dos estudos efetuados pelos mais diversos organismos fazem com que, atualmente, haja um cada vez mais alargado consenso em duas questões fundamentais para o futuro da Terra e das populações que nela habitam: i) o clima está a mudar por razões que se prendem com as atividades humanas; ii) as mudanças climáticas produzem efeitos, nomeadamente estão associadas ao aumento dos desastres naturais, sobretudo, dos de natureza hidrológica.

2.2.2 – *Mudanças climáticas*

Ainda que a compreensão do clima da Terra continue a suscitar incertezas, existe já um poderoso e credível conjunto de evidências, obtidas a partir de múltiplos e diferentes processos de registo e de investigação, que documentam que o clima está a mudar e que essas mudanças são, em larga medida, causadas pelas atividades humanas (NRC, 2010). As evidências científicas mostram também que as mudanças climáticas acarretam riscos significativos para muitos sistemas naturais e humanos. Os estudos que têm sido realizados chegam a conclusões semelhantes, partilhadas por muitos organismos nacionais e internacionais, as quais adquiriram já um elevado grau de confiança (NRC, 2010; USGCRP, 2009; IPCC, 2007; IPCC, 2000; etc.):

- A Terra está a aquecer. Observações detalhadas da temperatura superficial (tanto nos oceanos como em terra) mostram que a temperatura média da superfície do planeta durante a primeira década do século XXI foi 0,8°C mais elevada no que na primeira década do século XX, tendo o aquecimento mais pronunciado ocorrido nas últimas 3 décadas. A Figura 1 mostra a variação anual da temperatura média superficial em relação à temperatura média do século XX (1901-2000), estabelecida pelo *National Climatic Data Center*. [O NCDC, sedado na Carolina do Norte, USA, mantém o maior arquivo mundial de dados climáticos.]

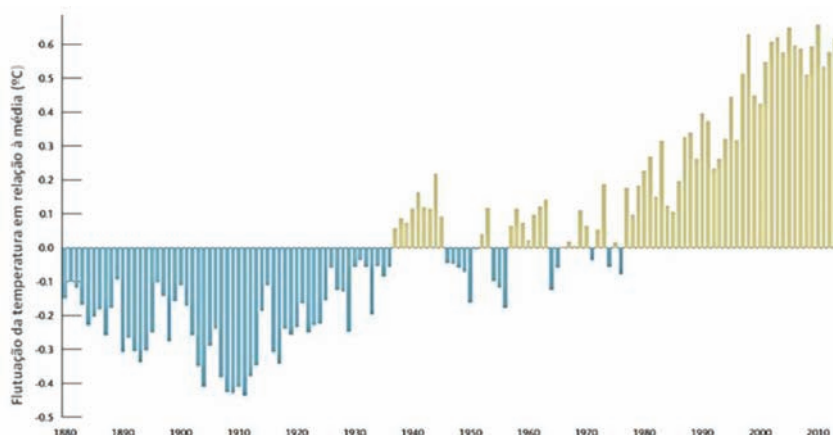


Fig. 1 – Anomalias anuais, de 1880 a 2013, das temperaturas médias à superfície (em terra e nos oceanos) em relação à temperatura média superficial do século XX (Aon Benfield, 2014).

- A maior parte do aquecimento nas últimas décadas pode ser atribuído às atividades humanas que libertam para a atmosfera dióxido de carbono (CO_2) e outros gases causadores do efeito de estufa – GHGs, *greenhouse gases*. A queima de combustíveis fósseis (carvão, petróleo e gás natural) para produção de energia é a causa principal das alterações climáticas, mas a agricultura, a desflorestação e certas atividades industriais também contribuem significativamente. A Figura 2 mostra a evolução das emissões mundiais de CO_2 desde 1860.

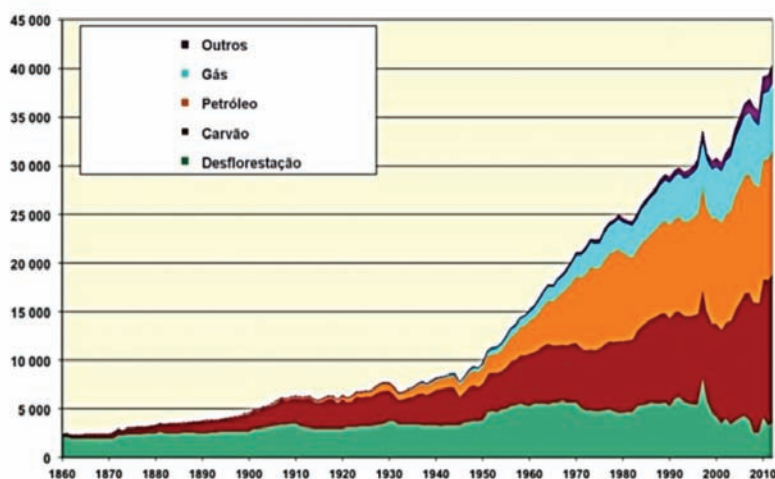


Fig. 2 – Evolução das emissões mundiais de CO_2 desde 1860, em milhões de toneladas. (Fonte: http://www.manicore.com/anglais/documentation_a/greenhouse/evolution.html)

- Ao aquecimento global estão associadas outras alterações climáticas, como sejam o aumento da frequência de chuvadas intensas, a redução da cobertura de neve e de gelo nos pólos, mais frequentes e intensas ondas de calor, subida do nível do mar e acidificação dos oceanos.
- Individual e coletivamente, essas alterações colocam em risco um largo espectro de sistemas ambientais e humanos, incluindo os recursos de água doce, o ambiente costeiro, os ecossistemas, a agricultura, a pesca, a saúde humana, etc..
- As alterações climáticas induzidas pelas atividades humanas e os seus impactos far-se-ão sentir durante muitas décadas e, em alguns casos, durante séculos. Acresce que, em vez de câmbios suaves e graduais, pode dar-se o caso de o sistema terrestre exceder certos valores limite, donde resultem alterações climáticas abruptas, aumentando enormemente o nível dos riscos; a probabilidade da ocorrência desse tipo de eventos não é ainda bem conhecida.
- A concentração atual de CO₂ na atmosfera é aproximadamente de 380 ppm (partes por milhão). Os estudos realizados sugerem que 550 ppm pode constituir um limiar a partir do qual se desencadeiem efeitos climáticos severos (IPCC, 2000). Estima-se que se venha a atingir 550 ppm em 2050, a não ser que sejam levadas a cabo ações decisivas pela comunidade internacional. Os esforços para manter as variações da temperatura global num nível considerado aceitável exige que o crescimento das emissões de CO₂ seja controlado por forma a que a concentração na atmosfera permaneça inferior a 380 a 450 ppm. Alcançar estes objetivos requer a redução das emissões previstas de CO₂ para a atmosfera em muitas gigatoneladas nas próximas décadas (Fragaszy *et al.*, 2011).
- Em qualquer caso, a magnitude que as alterações climáticas assumirão e a severidade dos seus impactos vão depender decisivamente das ações que as sociedades humanas empreenderem em resposta aos riscos.

Tenha-se presente que apesar do acordo internacional para a estabilização da concentração de GHGs “(...) *em níveis que evitem uma perigosa interferência humana com o sistema climático* (...)” (UNFCCC 1992, 2009), as emissões globais de CO₂ e de outros GHGs continuam a aumentar. Previsões de câmbios climáticos futuros, baseadas em modelos numéricos que permitem avaliar a resposta do sistema climático a diferentes cenários da atividade humana futura, antecipam a possibilidade de ocorrência de um aquecimento adicional de 1,1 a 6,4°C até ao final do século XXI (Meehl *et al.*, 2007).

2.2.3 – *Desastres naturais*

A frequência de ocorrência de desastres naturais tem vindo a aumentar, como se pode verificar na Figura 3. O acentuado aumento do número de eventos pode ser parcialmente explicado pelo incremento das atividades e das capacidades de observação e registo. Seja como for, os eventos catastróficos de carácter hidrológico parece claramente que têm vindo a sofrer um incremento continuado.

Os desastres naturais afetam todos os países, mas nos países menos desenvolvidos causam impactos desproporcionados, matando milhares de vítimas e ameaçando o modo de vida dos que sobrevivem. No Quadro 1 indica-se a probabilidade de ocorrência de impactos adversos decorrentes de desastres naturais em países pouco e medianamente desenvolvidos em comparação com os países com desenvolvimento elevado a muito elevado. [O índice de desenvolvimento humano, com base na educação, na esperança de vida e no PIB *per capita*, atribui aos diversos países os níveis de desenvolvimento baixo, médio, elevado e muito elevado – UNDP, 2010.]

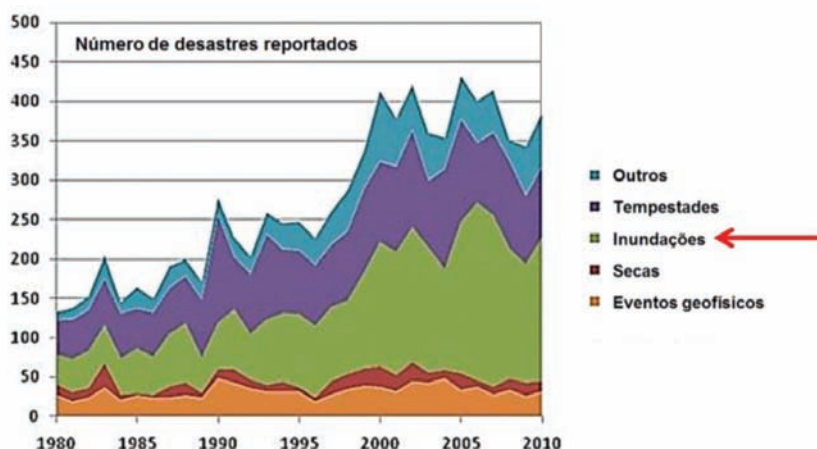


Fig. 3 – Número de eventos registados por ano (CRED, 2014).

Quadro 1 – Efeitos dos desastres naturais em função do nível desenvolvimento dos países, comparados com os efeitos nas regiões com elevado desenvolvimento humano (WEF, 2011).

Nível de desenvolvimento	Probabilidade de perda de vida	Probabilidade de ser afetado	Possibilidade de diminuição do PIB
Médio	3×	14×	2×
Baixo	14×	15×	4×

Num texto recente (Lo e Wang, 2012) em que se procura extrair ensinamentos das consequências de sismos ocorridos recentemente (entre 2004 e 2011; 3 sismos gerados em zonas de subducção e 3 ocorridos na crosta; os sismos afetaram tanto países desenvolvidos como países em desenvolvimento) conclui-se que a quantidade de pessoas feridas ou mortas e o grau de destruição estrutural e infraestrutural, em geral, reflete o modo e a qualidade com que se pratica a engenharia na área afetada (existência de códigos de construção adequados, contemplando regras antissísmicas, métodos e processos construtivos e qualidade da mão de obra, etc.).

2.2.4 – Ritmo de implementação de medidas adequadas

Além de um corpo sólido de investigações sobre as causas e consequências das mudanças climáticas, há um cada vez maior e mais diversificado corpo de conhecimentos sobre as políticas, as metodologias e as tecnologias que podem ser usadas para limitar/controlar as mudanças climáticas futuras (Fragaszy *et al.*, 2011). Quanto à implementação dessas medidas, isto é, quanto aos passos que devem ser dados, o ritmo ainda é pequeno, mas está em crescimento, até porque o aspeto essencial para que essa implantação se desencadeie, ou seja, o reconhecimento de que as mudanças climáticas devem ser consideradas nas decisões e ações que sejam tomadas num largo espectro de setores e de interesses, tem vindo indubitavelmente a crescer.

2.3 – Crescimento da população e das cidades

2.3.1 – Preâmbulo

Tendo por base, nomeadamente, documentos das Nações Unidas e do Banco Mundial (UN, 2010; WDR, 2009; WB/UN, 2010), em seguida resume-se aspetos cruciais do crescimento da população e das cidades e argumenta-se que a evolução ocorrida e a que se prevê que venha a ocorrer favorecem o aumento da vulnerabilidade aos fenómenos naturais.

2.3.2 – Importância económica das cidades e crescimento populacional

As cidades ocupam apenas 1,5 por cento da área terrestre mundial mas produzem metade do PIB. A prosperidade das cidades deriva da elevada produtividade propiciada pela divisão do trabalho, consequência da densidade de pessoas e de bens, e do menor custo de aquisição de informações e de tecnologias (“know-how”) (WB / UN, 2010). Por outro lado, a prosperidade das cidades é um íman económico: atrai pessoas e investimentos.

Historicamente, a produção cresceu cerca de 1-2 pontos percentuais mais do que a população, de modo que a renda *per capita* tem aumentado em quase todo o mundo. Grande parte do crescimento tem sido nas cidades, onde a renda *per capita* é superior, em média, o dobro da rural. Isto não é novidade: há muito tempo que se sabe que as cidades concentram a prosperidade (WDR, 2009).

A população das cidades também tem aumentado continuamente. A população mundial atual é da ordem dos 7,3 mil milhões, vivendo nas cidades um pouco mais de metade; a população deve atingir os 9,5 mil milhões em 2050, altura em que a população urbana mundial deverá aumentar para 70% do total. Cerca de metade deste crescimento é “natural”, devido à fertilidade dos habitantes urbanos, e o restante é devido à expansão (núcleos populacionais vizinhos crescem até constituírem uma única entidade) e à migração. A Figura 4 e o Quadro 2 resumem as tendências das últimas dezenas de anos e apontam as perspetivas atuais para as próximas décadas. No período de 100 anos contado a partir de 1950 a população mundial deve aumentar 3,6 vezes, sendo que a população rural deve aumentar 1,6 vezes e a urbana 8,6 vezes. A Europa é o continente com menores variações: crescimento da população em apenas 30%, em resultado da duplicação da população urbana acompanhada pelo decréscimo para menos de metade da população rural. A África é o continente que experimenta as mais dramáticas alterações: a população total aumenta cerca de 9 vezes, cerca de 4 vezes a rural e 37 vezes a urbana.

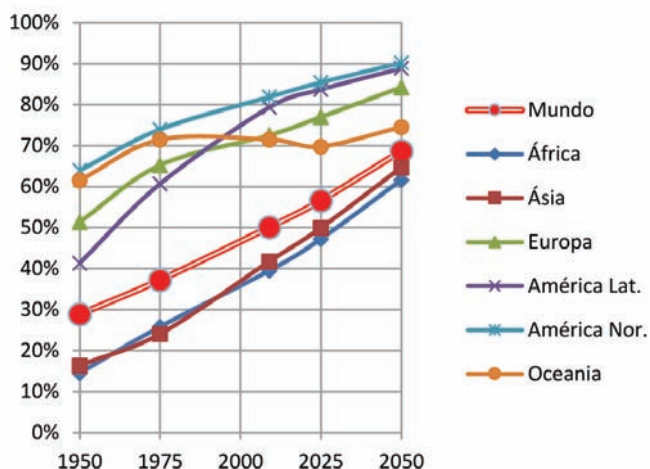


Fig. 4 – Aumento da percentagem da população urbana, por continente.

Quadro 2 – Variação da população total, urbana e rural em relação a 1950.

Ano	Mundo			África - continente com maiores variações			Europa - continente com menores variações		
	Total	Rural	Urbana	Total	Rural	Urbana	Total	Rural	Urbana
1950	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
1975	1,6	1,4	2,1	1,8	1,6	3,3	1,2	0,9	1,6
2009	2,7	1,9	4,7	4,4	3,1	12,1	1,3	0,8	1,9
2025	3,2	1,9	6,2	6,2	3,8	20,0	1,3	0,6	2,0
2050	3,6	1,6	8,6	8,8	3,9	37,3	1,3	0,4	2,1

Um outro aspeto que caracteriza a evolução da população é o seu envelhecimento, sobretudo na Europa. A previsão da distribuição da população europeia pelos vários escalões etários indica que, entre 1990 e 2060, a população ativa (20 a 64 anos, tal como é definida atualmente pela Comissão Europeia) deverá diminuir de 59,5% para 51,1% e a população reformada deverá mais do que duplicar. Tal evolução terá certamente consequências a todos os níveis e, particularmente, no desenvolvimento das cidades, visto que a população europeia é essencialmente urbana.

Face ao forte e continuado aumento da urbanização, em muitas cidades estão esgotadas ou a caminho de ficar esgotadas as capacidades das vias de circulação, de abastecimento de água e dos sistemas de tratamento de esgotos. Os serviços não mantiveram os níveis adequados em grande parte porque essas cidades não investiram o suficiente em infraestruturas. O congestionamento, a poluição e a frustração podem eventualmente sufocar o crescimento contínuo de tais cidades, mas os seus habitantes já hoje estão expostas a riscos naturais.

2.3.3 – Aumento da vulnerabilidade

A maioria das cidades foi fundada em pontos de interseção de vias de comunicação, ou na proximidade de locais adequados à implantação de portos ou de pontos de atravessamento de rios. Alguns portos naturais resultam de atividade tectónica. Terrenos planos perto da água constituem locais propícios mas, em muitos casos, refletem a existência de sedimentos recentes não consolidados; esses locais são vulneráveis às inundações e à amplificação dos movimentos sísmicos. Por exemplo, São Francisco, na sua origem, era constituída principalmente por prédios de madeira, em grande parte destruídos pelos incêndios que se seguiram ao terremoto de 1906; os destroços do terremoto foram usados nos aterros realizados para conquistar terra ao mar, onde se desenvolveu o *Marina District*, que, no terremoto de 1989, sofreu importantes assentamentos de terrenos e elevados níveis de danos.

Este tipo de crescimento das cidades – muito usual – aumenta a exposição e a vulnerabilidade aos riscos, a menos que se tomem medidas adequadas para os prevenir. Estima-se que o número de pessoas expostas a ciclones tropicais e terremotos em grandes cidades em 2050 mais do que duplique, passando de 310 milhões em 2000 para 680 milhões em 2050, no caso dos ciclones tropicais, e de 370 para 870 milhões, no caso dos terremotos. Podem resumir-se as razões que justificam o aumento da vulnerabilidade das sociedades aos desastres naturais do seguinte modo (WEF, 2011): 1) aumento da população: em consequência, aumento do número de pessoas residentes em locais mais vulneráveis; 2) localização: o crescimento da população ocorreu em áreas mais propensas a desastres naturais, como são as zonas costeiras e as margens ribeirinhas; 3) urbanização: a falta de planeamento urbano adequado e a falta de qualidade dos empreendimentos

e das construções são fatores de exacerbamento dos efeitos dos desastres naturais; 4) valor económico: o desenvolvimento económico acarretou o aumento do valor das infraestruturas, tendo como consequência o aumento das possíveis perdas económicas; 5) mudanças climáticas.

2.4 – Escrutínio social. Custos e prazos

2.4.1 – Preâmbulo

Hansford (2011) refere as carências infraestruturais existentes em todo o mundo e salienta o papel dos engenheiros na busca e implementação de soluções para acudir a essas necessidades. Sem embargo, em sua opinião, o atual enquadramento económico tem fatores condicionantes sem precedentes, os quais “(...) conduziram a cortes maciços nos gastos do setor público e ao inevitável escrutínio dos planos de investimento em infraestrutura (...) para níveis que a nossa indústria da construção nunca tinha visto anteriormente (...)”. Provavelmente, as razões principais que justificam o crescente escrutínio social têm a ver com custos e prazos das obras, particularmente das de carácter público, e com a percepção da existência de corrupção no setor da construção.

2.4.2 – Custos e prazos das obras: discrepância entre as previsões e a realidade

Lambe (1973) salientou que “(...) as previsões constituem um passo chave no processo de criação e manutenção de infraestruturas, isto é, na prática da engenharia civil (...)”. Nessas previsões incluem-se aquelas sobre as quais assentam as decisões de se avançar com investimentos mais ou menos importantes, a saber, as previsões de custos e de impactes de diversa natureza, como sejam os ambientais, o nível de utilização (tráfico, etc.), os benefícios económicos, etc..

As imprecisões nas previsões de custos, de procura e de outros impactos de projetos de que recorrentemente a comunicação social dá conta, são muito mais comuns e generalizadas do que, à partida, se possa pensar (Cardoso, 2013). Flyvbjerg (2006, 2014) tem vindo a construir uma importante e informada base de dados referentes a obras executadas em todo o mundo, cuja análise permitiu constatar ser comum, por um lado, a subavaliação de custos e, por outro, a estimativa otimista dos níveis de utilização das infraestruturas construídas, ou seja, dos seus resultados. Flyvbjerg (2006) concluiu ainda que não se verifica um melhoramento da qualidade das previsões com o passar do tempo. Quando as previsões de custos e de procura se combinam, por exemplo, nas análises custo-benefício que são normalmente utilizadas para justificar investimentos em grandes infraestruturas, a consequência é a imprecisão ser do segundo grau. Os rácios custo-benefício estão muitas vezes errados, não apenas numa pequena percentagem, mas em grau elevado, o que leva a que as estimativas de viabilidade sejam em muitos casos enganosas. Isto é, as informações sobre que assentam as decisões de investimentos em novos projetos podem ser altamente imprecisas e tendenciosas, o que conduz a projetos de alto risco.

Nos Quadros 3 e 4 apresentam-se dois exemplos de projetos internacionais bem conhecidos em que as previsões falharam num grau muito importante. As razões destas, em alguns casos, profundas desconformidades foram diversas, desde causas económicas, políticas e sociais (inflação, problemas laborais, etc.) até razões de ordem técnica (insuficiência dos programas preliminares, deficiência dos projetos, situações imprevistas, sobretudo de carácter geotécnico, etc.). Flyvbjerg e outros (2002, 2004a, 2004b, 2005, 2006) têm vindo a estudar o assunto profundamente (Cardoso, 2013, faz um breve resumo destes estudos); entendem que mais do que por razões técnicas, as imprecisões das previsões explicam-se por duas ordens de razões principais:

- Razões psicológicas - têm a ver com o viés otimista com que são feitas as previsões, ou seja, com a predisposição cognitiva encontrada na maioria das pessoas que as leva a julgar acontecimentos futuros a luz mais positiva do que o que garante a experiência real.

- Razões políticas - explicam as imprecisões em termos de falsas declarações estratégicas. De acordo com estas explicações, quando procedem à estimação dos resultados dos projetos, os analistas e os gestores, deliberada e estrategicamente, sobrestimam os benefícios e subestimam os custos, a fim de aumentar a probabilidade de os seus projetos, e não os da concorrência, serem aprovados e financiados. A deturpação estratégica pode ser atribuída a pressões políticas e organizacionais; por exemplo, à competição por fundos escassos ou à disputa de posições.

Propensão otimista e deturpação estratégica, ambas envolvem engano, mas enquanto esta tem por trás uma intenção a primeira não; a propensão otimista repousa no autoengano. Embora os dois tipos de explicação sejam diferentes, o resultado é o mesmo: previsões imprecisas e inflação dos rácios custo-benefício. Seja como for, as imprecisões nas estimativas conduzem a sobrecustos e a redução dos resultados derivados da utilização das infraestruturas construídas. Além disso, é também bastante comum o alargamento dos prazos de construção, o que eventualmente pode acarretar sobrecustos e/ou perda de resultados. Para resolver estas situações torna-se inevitável a alocação de novos recursos, que deixam de poder ser usados noutros projetos. Esta inadequada alocação de recursos tem obviamente consequências económicas e sociais, cuja expressão maior ou menor depende da dimensão do projeto e do grau das imprecisões.

Quadro 3 – Artéria Central de Boston.

A construção da Artéria Central (*Central Artery / Tunnel Project, Boston Big Dig*) contemplou sobretudo obras subterrâneas: i) a Artéria Central existente (Interestadual 93), uma autoestrada elevada com seis pistas passando pelo centro da cidade, foi substituída por uma extensa rodovia subterrânea (5,6 km) e por duas pontes com 14 pistas para atravessamento do rio Charles; ii) a Interestadual 90 foi prolongada, através de um túnel sob o porto de Boston, até ao aeroporto.

O projeto começou em 1982 e a construção em 1991, prevendo-se a sua finalização para 1998 com um custo US\$ 2.800 milhões (custos de 1982). Efetivamente a obra concluiu-se em 2006 – isto é, demorou o dobro do prazo previsto – com um custo de US\$ 14.600 milhões (preços de 2006, ou seja, US\$ 8.08 milhões de 1982), o que significa quase o triplo do custo estimado. Alguns técnicos estimam que, atendendo aos custos financeiros, o custo final global seja de US\$ 22.000 milhões e que o pagamento do investimento não termine antes de 2038.



Quadro 4 – “Calle 30” em Madrid.

A M-30, agora chamada Calle 30, é uma via de circunvalação que rodeia o centro de Madrid, com 300.000 veículos diários em média nos seus 32,5km de comprimento. O projeto de renovação da M-30 consistiu em diversas atuações e alterações ao longo do seu curso, iniciadas no começo de 2003, sendo as mais relevantes o enterramento do troço próximo do rio Manzanares e a construção do *by-pass* sul. Diversas fases do projeto foram inauguradas em 2007, tendo ficado por concretizar diversas obras na zona norte. Depois da construção dos túneis sob o rio Manzanares os terrenos libertados à superfície foram transformados em zonas de lazer – Parque Madrid Río –, concluídas entre os anos 2010 e 2011.

Em 2004 o custo estimado foi da ordem dos € 1,7 a 2,0 mil milhões. No final, em 2008, o custo fixou-se entre € 5,6 e 6,0 mil milhões, sendo o primeiro número avançado por fontes governamentais e os outros por outras fontes. O pagamento das obras deve prolongar-se até 2040, devendo situar-se o custo final, incluindo juros, em valores superiores a € 10,0 mil milhões.



Com efeito, tornam-se cada vez menos socialmente aceitáveis os custos entendidos como excessivos e não suficientemente justificados de certas intervenções, quer diretos, quer indiretos (Long, 2006), e, sobretudo, a falta de controlo desses custos, divergindo em relação às estimativas que suportaram a decisão de se avançar. Há que reconhecer que a consciência da importância económica, social e política destas questões tem vindo a aumentar e que, a partir da segunda metade da década anterior, os estados, sobretudo os europeus e os EUA, foram adotando medidas visando o controlo deste problema. Enfim, tem havido uma evolução positiva (Flyvbjerg, 2014).

2.4.3 – Perceção da existência de corrupção no setor da construção

Numa reunião cimeira organizada pela ASCE (2007) para refletir sobre o futuro da engenharia civil, os participantes discutiram os problemas e tendências que condicionam o setor, tendo identificado entre outros a “(...) *occurrence of corruption in the global engineering and construction industry* (...)”. Este problema tem vindo a ser tratado em relatórios e estudos conduzidos por agências internacionais (Kenny, 2009; WB/UN, 2010; Hardoon e Heinrich, 2011).

Muito recentemente foram realizados dois inquéritos internacionais sobre a corrupção. O primeiro foi elaborado pela *Transparency International* (Hardoon e Heinrich, 2011) com o objetivo de atribuir, pela 5ª vez, o Índice de Pagamento de Subornos (*Bribe Payers Index*) baseado no Inquérito sobre o Pagamento de Subornos de 2011. O índice classifica as 28 maiores economias mundiais de acordo com a probabilidade percecionada pelas empresas, representadas pelos seus executivos, de terem que pagar subornos nos países estrangeiros com que se relacionam. Os países e territórios cobertos pelo índice distribuem-se por todas as regiões do mundo e representam 80% do total de produtos, serviços e investimentos que circulam no mundo. Na parte superior do Quadro 5 apresentam-se os resultados relativos aos diversos países, enquanto a parte inferior mostra os valores do índice de suborno obtido pelos diferentes setores. O setor dos contratos públicos e da construção é o que obtém o pior valor, distanciado dos restantes. No relatório da *Transparency International* considera-se que a maior vulnerabilidade do setor dos contratos públicos e da construção ao suborno é devido às suas características particulares: i) os contratos são usualmente grandes e os projetos de construção são únicos (protótipos) e portanto mais difíceis de ser sujeitos

Quadro 5 – Índice de Pagamento de Subornos 2011 por países/territórios e por setores
(Hardoon e Heinrich, 2011).

Pontuação	País / Território
8,5 - 8,8	Holanda, Suíça, Bélgica, Alemanha, Japão, Austrália, Canadá (287)
8,0 - 8,3	Singapura, Reino Unido, Estados Unidos, França, Espanha (416)
7,5 - 7,9	Coreia do Sul, Brasil, Itália, Malásia, África do Sul, Taiwan, Índia, Turquia (195)
7,0 - 7,4	Arabia Saudita, Argentina, Emiratos Árabes Unidos, Indonésia, México (137)
6,5	China (608)
6,1	Rússia (172)
7,8	Média
Pontuação	Setor
7,0 - 7,1	Agricultura, Manufatura ligeira, Aeroespacial civil, Tecnologia informática
6,8 - 6,9	Setor bancário e financeiro, Setor florestal, Serviços ao consumidor
6,6 - 6,7	Telecomunicações, Transportes e logística, Armamento, defesa e militar, Pescas
6,4 - 6,5	Manufatura pesada, Farmacêuticas e saúde, Geração e transporte de energia
6,3 - 6,2	Minas, Petróleo e gás
6,1	Bens imóveis, Propriedades, Serviços jurídicos e financeiros, Serviços públicos
5,3	Contractos de obras públicas e construção
6,6	Média

Nota 1: (xxx) = N.º de observações por país, em média.

Nota 2: Os países/territórios ou os setores são classificados numa escala 0-10, sendo atribuído 10 quando se considera que as empresas do país/território ou do setor em análise nunca utilizam o suborno e 0 quando utilizam sempre.

a comparações no que respeita a custos e prazos; ii) é uma indústria fragmentada, envolvendo empreiteiros e subempreiteiros, o que dificulta o controlo dos pagamentos e a difusão de boas práticas é mais complexa.

O segundo estudo refere-se ao inquérito que, pela 2ª vez, o *Chartered Institute of Building* (CIOB, 2013) levou a cabo sobre a corrupção na indústria da construção. Responderam ao inquérito 701 profissionais da construção, cerca de 60% dos quais eram diretores, gestores séniores e consultores e cerca de 30% gestores intermédios e de base; quase todos trabalhavam em organizações/empresas com mais de 200 colaboradores. Resume-se em seguida as principais conclusões do inquérito:

- A conclusão principal indica que 49% dos participantes acredita que a corrupção é comum na indústria de construção britânica, 2% menos do que no 1º inquérito publicado em 2006;
- Os intervenientes apontam as seguintes como as principais razões que estão por trás da prevalência da corrupção: i) 26,7% razões culturais (por exemplo, o que é corrupção para uma pessoa é prática comum para outra); ii) 23,3% razões económicas (por exemplo, praticar a corrupção é necessário se se quer sobreviver); iii) 17,5% falta de políticas anticorrupção e antissuborno dentro das organizações;

- 42,5% dos participantes sugerem que a corrupção pode ocorrer em qualquer fase de desenvolvimento de uma construção, enquanto 35% consideram mais propícia as fases de pré-qualificação e de apresentação de propostas;
- Praticamente todos os intervenientes consideram importante ou muito importante enfrentar o problema da corrupção.

2.4.4 – Desafio para os engenheiros

Muitos projetos do tipo dos que têm sido criticados, e mesmo postos em causa, por não terem cumprido o que estava previsto quando foram lançados serão necessários nas nossas cidades, mas teremos a capacidade de os fazer se não conseguirmos reduzir significativamente os custos, os prazos e os riscos, para não mencionar a nossa capacidade de os gerir adequadamente, onde se inclui a combate à corrupção? Long (2006) opina que se não se encontrar melhores maneiras – mais fiáveis, com menores custos e com períodos de perturbação social menores – de resolver os problemas tradicionais, sobretudo nas cidades, as condicionantes sociais, económicas e ambientais vão tornar as soluções cada vez mais inacessíveis. Na mesma linha Hansford (2011) entende que os engenheiros enfrentam o desafio de “(...) *fazer mais por menos* (...)”.

2.5 – Evolução da capacidade de cálculo e do seu custo

A notável evolução da informática e dos computadores afetou decisivamente todas as atividades humanas e também, obviamente, a evolução da geotecnia. Com efeito pode-se afirmar que muito do significativo progresso alcançado na compreensão do comportamento dos geomateriais não teria sido possível sem o uso dos métodos numéricos. Em particular, o desenvolvimento dos modelos constitutivos está fortemente relacionado com os avanços conseguidos no campo da análise numérica, cuja rápida evolução se ficou a dever ao aumento das capacidades de cálculo. Por outro lado, as atuais capacidades de análise e de previsão do comportamento de estruturas geotécnicas dos mais diversos tipos, tanto em condições de serviço, como em situações de colapso ou, ainda, em casos mais limitados, em situações pós-colapso, fundamentam-se no desenvolvimento de métodos de análise com caráter universalista (no sentido de poderem contemplar quaisquer condições iniciais, geométricas ou de contorno), os quais não podem deixar de ser numéricos e, portanto, dependentes das capacidades de cálculo disponíveis.

A Figura 5 narra de forma concentrada a história da evolução dos computadores, que se pode resumir nas 3 seguintes frases: 1) o número de transístores (*transistor count*) dos microprocessadores tem aumentado mais de 30 vezes cada 10 anos; o ritmo de aumento dos transístores das GPUs (*graphics processing unit*) tem sido ainda superior, cerca de 100 cada 10 anos; 2) a velocidade de processamento dos supercomputadores, medida em FLOPS (*FL*oating-*point* *O*perations *P*er *S*econd) tem crescido cerca de 600 vezes cada 10 anos; 3) o custo da operação dos supercomputadores tem diminuído cerca de 400 vezes cada 10 anos.

A partir da década de 90 o aumento da capacidade dos computadores e os avanços no desenvolvimento de programas muito potentes para o cálculo geotécnico permitiram que o engenheiro geotécnico passasse a ter disponível a possibilidade de executar análises numéricas avançadas por um custo que se foi tornando cada vez mais pequeno. Por outro lado, o desenvolvimento de interfaces “amigáveis” para o utilizador facilitou ainda mais o incremento da utilização das análises numéricas. Atualmente há programas comerciais com um nível de sofisticação bastante elevado, incorporando, por exemplo, diversos tipos de modelos elásto-plásticos mais ou menos complexos ou a possibilidade de realização de análises acopladas hidro-mecânicas ou mesmo com outros aspetos físicos (como os térmicos) ou de outra natureza.

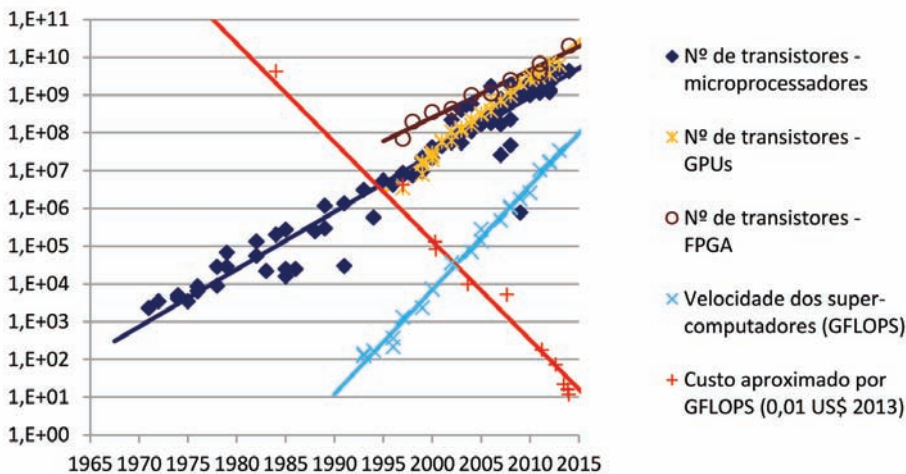


Fig. 5 – Evolução dos computadores. (Fontes: http://en.wikipedia.org/wiki/Transistor_count; http://en.wikipedia.org/wiki/History_of_supercomputing; <http://en.wikipedia.org/wiki/FLOPS>)

Presentemente, a possibilidade de utilização mais generalizada de análises 3D, mais ajustadas à realidade de boa parte das obras geotécnicas, ou, pelo menos, de certos aspetos condicionantes do seu comportamento, torna-se cada vez mais viável e acessível de um ponto de vista financeiro. As análises 3D, ainda mais do que as 2D, levantam o problema da qualidade dos dados em que se baseia o cálculo e, posteriormente, o das maiores dificuldades de interpretação.

Não pode, no entanto, deixar de se pôr em relevo que para levar a cabo cálculos complexos e obter bons resultados é, sem dúvida, necessário um bom conhecimento de métodos numéricos, mas também de mecânica ou de outras áreas da física (e, eventualmente, da química) e, sobretudo, de mecânica dos solos e/ou das rochas. Isto é, por vezes, esquecido na prática, considerando-se erradamente que obter resultados fiáveis é tão fácil quanto o for operar o programa de cálculo que se está a utilizar. Ora, sabe-se bem que não é assim, talvez ainda mais em geotecnia do que em qualquer outra área, dado o caráter complexo e incerto quer das propriedades dos geomateriais quer dos processos para as determinar.

2.6 – Complexidade

2.6.1 – *Preâmbulo*

O mundo atual, cada vez mais globalizado e em que a informação, sobre seja o que for que ocorra seja onde for, é disponibilizada de forma praticamente imediata, caracteriza-se igualmente por um permanente aumento da complexidade, isto é, os procedimentos e as atuações são condicionadas por fatores cada vez mais diversos, aumentando as interdependências, logo a complexidade. O aumento da complexidade resulta também de os humanos enfrentarem desafios cada vez mais difíceis e globais que, há anos atrás, simplesmente não eram considerados.

2.6.2 – *Sistemas complexos. Método Observacional*

O nível de complexidade pode fazer com que o uso das metodologias tradicionais de estudo do comportamento dos sistemas através da análise independente das suas componentes vá sendo cada vez menos possível; a dificuldade dos sistemas complexos está em que frequentemente as suas partes interagem entre si, no tempo e no espaço, tornando o sistema não linear. O melhor exemplo

de um sistema não-linear é um organismo vivo, no qual os processos moleculares ocorridos dentro das células não podem ser claramente separados dos processos que ocorrem em níveis mais macroscópicos; outros exemplos de sistemas complexos são o clima e a economia.

No domínio das infraestruturas, Nelson (2013) considera que o sistema formado pelas diversas redes urbanas que interagem entre si atinge níveis de complexidade cada vez mais elevados, isto porque: i) os sistemas físicos, construídos em alguns casos há dezenas de anos, estão envelhecidos; ii) as redes interconectadas possuem dimensões cada vez maiores; iii) as interdependências entre redes são pouco conhecidas e compreendidas; iv) a redução das redundâncias por razões de economia torna os sistemas mais sensíveis e menos fiáveis.

A geotecnia é geneticamente uma disciplina complexa, uma vez que a prática da engenharia geotécnica, assim como a de outras engenharias que lidam com os terrenos, requer que se trabalhe com um conjunto muito limitado de informações sobre materiais complexos cujas condições se podem alterar radicalmente em distâncias curtas e com o tempo (Marr, 2006). Por isso, a colaboração de especialistas de diferentes subáreas disciplinares é, muitas vezes, necessária.

A complexidade inerente à própria disciplina acrescenta-se a que resulta da envolvente social e económica, que afeta igualmente as metodologias e as opções. O aumento do conjunto de fatores – económicos, sociais e ambientais – que há que levar em linha de conta na elaboração dos projetos e no desenvolvimento das construções e o incremento da preocupação social com o desenvolvimento e as consequências (nomeadamente, de caráter ambiental) das obras, introduzem níveis de complexidade cada vez mais elevados, que exigem um imprescindível envolvimento multidisciplinar.

A melhor estratégia para sobreviver e prosperar sob condições complexas consiste em desenvolver a adaptabilidade a condições perpetuamente em mutação (Rzevski e Skobelev, 2014). Este tipo de estratégia não é, de modo algum, estranho aos geotécnicos, pois o Método Observacional está concebido de forma a potenciar a adaptabilidade a condições complexas e, por isso, não completamente conhecidas à partida. Com efeito o Método Observacional em geotecnia *“(...) é um processo contínuo, orientado e integrado de projeto, controlo da construção, instrumentação, observação e revisão que visa a que, se necessário, as alterações previamente definidas sejam incorporadas, durante ou após a construção, consoante o próprio processo definir como mais apropriado. O objetivo é conseguir uma maior economia global sem comprometer a segurança”* (Nicholson *et al.*, 1999).

Portanto, os sistemas complexos caracterizam-se por frequentemente mudarem, sendo necessário, para os estudar, dispor de metodologias capazes de reagir rapidamente e positivamente às mudanças, em tempo real e permanentemente (Rzevski e Skobelev, 2014).

2.6.3 – Complexidade dos projetos e sua gestão

Tradicionalmente, os 3 principais intervenientes no processo construtivo – o dono da obra, o projetista e o construtor –, em geral, assumem as suas responsabilidades de forma essencialmente independente: i) ao dono da obra são atribuídas as responsabilidades pelo financiamento, pela obtenção dos fundos necessários e pela gestão dos fatores de contexto (constrangimentos legais e ambientais, limitações impostas por necessidades de preservação histórica, relação com intervenientes externos, etc.); ii) o projetista é o responsável pela qualidade, dando resposta ao estipulado em códigos e normas, e pela funcionalidade; iii) o construtor assume a responsabilidade pelo cumprimento dos orçamentos e dos prazos. As responsabilidades primárias do projetista e do construtor – técnica/qualidade, custos e prazos – constituem tradicionalmente a preocupação da gestão do projeto.

Num documento recente, Shane *et al.* (2012) salientam que atualmente a complexidade dos projetos implica um elevado grau de incerteza e origina interações dinâmicas entre as atividades de

gestão dos vários intervenientes; estas novas circunstâncias obrigam a que o quadro 3-D (qualidade, custo e prazo) da gestão de projetos tradicional se expanda para enquadramento 5-D, elevando-se o financiamento e o contexto ao mesmo nível das 3 dimensões tradicionais. Dito de outro modo: os projetos de infraestruturas são geralmente geridos procurando o equilíbrio adequado entre custo, prazo e qualidade; nos anos mais recentes, tem-se dado uma atenção crescente aos efeitos do contexto e do financiamento no projeto técnico, no custo e no prazo, resultando uma matriz de inter-relações com 5 dimensões. Portanto, segundo Shane *et al.* (2012) os projetos complexos diferenciam-se por implicarem um processo de desenvolvimento com mais do que as tradicionais 3 dimensões. Por exemplo, um projeto pode ser tecnicamente complicado mas não ser complexo se as questões de financiamento e de contexto não tiverem um impacto apreciável na solução técnica final ou não condicionarem o custo e o prazo de execução do projeto.

2.7 – Conclusão

A acelerada evolução do mundo, em termos de crescimento da população e de utilização de recursos perecíveis, bem como os desequilíbrios que ela provoca, tiveram a sua origem há relativamente pouco tempo. Com efeito, os dados recolhidos pelos economistas históricos mostram que até cerca de 1750 tanto a população como os meios disponíveis para as pessoas viverem tiveram uma evolução muito lenta ao longo dos tempos, como se pode ver na Figura 6. Ou seja, até ao advento da revolução industrial, a população e o rendimento médio das pessoas (rendimento *per capita*) mantiveram-se quase estacionários ao longo de centenas de anos, evoluindo muito lentamente, e o rendimento não apresentava grandes diferenças entre as várias regiões do globo (ver Figura 6). A partir da Revolução Industrial (a Revolução Industrial consistiu na introdução de novos processos de manufatura no período entre 1760 e 1820-40 e teve o seu início na Grã-Bretanha) observa-se o seguinte: 1) a população mundial inicia um crescimento cada vez mais acelerado; 2) o PIB *per capita* começa a crescer rapidamente em certas regiões do globo; 3) noutras regiões a evolução é muito mais lenta ou faz-se com um desfaseamento temporal em relação às primeiras, pelo que vai aumentando paulatinamente a diferenciação entre os vários países e zonas do globo.

O fator crucial para o acentuado e rápido crescimento do PIB *per capita* foi o progresso tecnológico (Clark, 2007). A Revolução Industrial consistiu no aparecimento pela primeira vez de

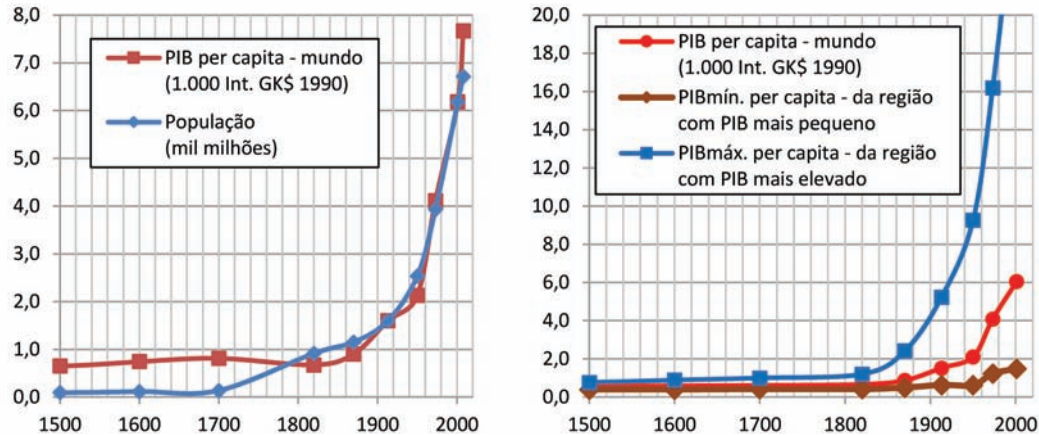


Fig. 6 – Evolução da população e do PIB per capita mundiais (PIB: calculado em Int. GK\$ 1990 - *International Geary-Khamis dollars* 1990) (Madison, 2014).

um rápido crescimento económico alimentado por uma eficiência produtiva possibilitada por avanços no conhecimento. É de salientar que o ritmo da evolução tecnológica e cultural desencadeada pela Revolução Industrial deixou de ter qualquer relação com os ritmos naturais, com o da adaptação biológica e, muito menos, com o da evolução geológica.

Como já se salientou o mundo atual continua com enormes carências, que se fazem sentir de forma mais acentuada nos países menos desenvolvidos, mas essas carências têm de ser enfrentadas usando metodologias e processos distintos dos empregues nos períodos anteriores, muito mais condicionados pelos fatores de sustentabilidade. Em qualquer caso, se foi a tecnologia que permitiu os avanços verificados desde a Revolução Industrial, será também pela tecnologia – agora desenvolvida de forma a garantir a sustentabilidade – que se poderá encontrar soluções para os problemas atuais. As tecnologias e os conhecimentos científicos são imprescindíveis para a identificação e resolução de problemas, a elaboração de projetos robustos e de baixo custo, a execução eficiente e segura das construções, a garantia de manutenção de longo prazo, a proteção contra riscos naturais e o respeito continuado pelo meio ambiente. Estas tarefas são a essência da engenharia moderna (NRC, 2006).

Na mesma linha se pronuncia Javier Solana (2014), físico e político (antigo alto representante europeu para os negócios estrangeiros e para a segurança): “(...) *Graças à inovação tecnológica o mundo começou a mover-se para além da mera subsistência, permitindo que algumas economias, com o Reino Unido à cabeça, descolassem durante a Revolução Industrial. Nesta hora crítica em que os mesmos combustíveis fósseis que nos trouxeram a prosperidade poderiam levar-nos à perdição, é de novo a inovação e a ciência que poderão fazer mudar o rumo (...)*”.

3 – ENQUADRAMENTO. QUESTÕES GEOTÉCNICAS

3.1 – Assuntos abordados

O objetivo central do presente capítulo é enunciar as que se entende serem as atuais lacunas dos conhecimentos e da prática geotécnicas, apesar dos muitos e notáveis avanços já alcançados; isso é feito na última secção do capítulo. Na próxima secção salienta-se que, se bem que do ponto de vista teórico muitos fenómenos estejam bem dominados e sejam conhecidos os métodos adequados de bem proceder, na prática continuam a acontecer acidentes nos mais diversos tipos de estruturas geotécnicas, alguns deles com gravíssimas consequências, de que se apresentam alguns exemplos ocorridos recentemente. A secção seguinte ilustra, mediante a apresentação de dois casos concretos, a dificuldade, que perpassa a geotecnia, de proceder a previsões quantitativamente fiáveis. Se, no aspeto qualitativo, o conhecimento do comportamento das estruturas geotécnicas é, ou pode ser, bem conhecido (existem poderosas ferramentas numéricas para que tal seja possível), já no que se refere aos aspetos quantitativos a capacidade de se prever valores que se ajustem razoavelmente à realidade é ainda, para muitos tipos de estruturas geotécnicas, bastante deficiente, como mostram os exemplos apresentados.

3.2 – O estado da prática e o estado da arte. Acidentes

3.2.1 – Preâmbulo

Em muitos aspetos, a geotecnia é um domínio científico maduro, que atingiu a maioria nos últimos 50 anos. Para além de uma compreensão já muito desenvolvida do comportamento fundamental dos terrenos, os avanços técnico-científicos permitiram encontrar soluções para muitos problemas importantes e complexos (Long, 2006): sabemos como se constroem fundações adequadas, barragens seguras e estradas e túneis estáveis; possuímos um conhecimento razoável

sobre o comportamento das águas subterrâneas e de como as proteger, sobre como extrair os recursos petrolíferos e sobre como se desenvolve um campo geotérmico; compreendemos bastante bem quais os fatores que conduzem à liquefação dos solos no decurso de sismos ou à ocorrência de deslizamentos de terras; etc.. O maior problema que subsiste é que “(...) *o estado da prática no mundo não coincide com o estado da arte* (...)”. Mesmo quando o conhecimento existe, razões de ordem económico-financeira ou a ignorância conduzem, com alguma frequência, a práticas perigosas.

3.2.2 – Acidentes em túneis

Recentemente, Pau e Chau (2012) fizeram o levantamento das roturas – colapsos ou deformações excessivas – notáveis, isto é, publicitadas de alguma forma, ocorridas em túneis. O catálogo baseou-se primordialmente em informação publicada, mas os autores realçaram que, por razões contratuais ou outras, há relativamente poucos casos reportados nas publicações técnicas e que, usualmente, só foram publicados os que atingiram uma escala ou acarretaram consequências de dimensões de tal modo importantes que os tornaram objeto de atenção pública. Mesmo nestes casos, geralmente só estão disponíveis informações limitadas. No Quadro 6 apresenta-se de forma muito resumida o catálogo de Pau e Chau (2012). Aparentemente, o número de roturas tem vindo a aumentar, tanto nos países mais desenvolvidos como nos em desenvolvimento, apesar dos muito importantes avanços científicos e tecnológicos ocorridos nas últimas décadas no domínio das obras subterrâneas. Esse aumento pode ser consequência de a utilização de obras subterrâneas se ter vindo a generalizar, tendo aumentado muito rapidamente o número de obras, da maior complexidade das obras mais recentes ou, simplesmente, do facto de a divulgação dos acidentes se ter tornado mais comum.

Quadro 6 – Levantamento de acidentes ocorridos em túneis (adaptado de Pau e Chau, 2012).

Data	N.º	Europa, América, Austrália, Japão	N.º	Ásia (excluindo o Japão) e África
65-69	3	Londres (2), Southend (UK)	–	—
70-74	1	Rørvikskaret (Noruega)	2	África do Sul (2)
75-79	–	—	1	Hong Kong
80-84	2	Munique, Holmestrand (Noruega)	3	Hong Kong (3)
85-89	1	Roménia	1	Istambul
90-94	3+?	Áustria, Heathrow (UK), Munique, Atenas (vários)	5+?	Seoul (5), Hsuehshan (Taiwan, muitos)
95-99	5+?	Lærdal (Noruega), Áustria, Londres, Hull (UK), Los Angeles, Atenas (vários)	?	Hsuehshan (Taiwan, muitos)
00-04	7	Oslofjord (Noruega, 3), Oslo, Paris, UK, Japão	4+?	Taegu (Coreia), Singapura, Shanghai, Guangzhou (China), Kaoshiung (Taiwan, vários), Malásia (muitos), Hsuehshan (Taiwan, muitos)
05-09	12	Noruega (4), Lausanne, Barcelona, Colónia, Seattle (2), Toronto, São Paulo, Austrália	9+?	Cairo (2), Singapura, Kaoshiung (Taiwan), Hong Kong (2), Hangzhou (China), Guangzhou (China), Malásia (muitos)
10-12	–	—	4	Xiameilin (China, 3), Macau

3.2.3 – Exemplos de alguns colapsos de diverso tipo ocorridos recentemente

No dia 3 de março de 2013, a poucos meses do começo dos XXII Jogos Olímpicos de Inverno (7 a 23 de fevereiro de 2014), em Sochi, o colapso da frente de um túnel rodoviário teve as consequências descritas na Figura 7 para o prédio implantado à superfície. O prédio parece ter mantido a sua integridade estrutural mas o seu aproveitamento terá sido problemático.



Fig. 7 – O colapso da frente de um túnel, ocorrido em março de 2013, em Sochi, provocou um grande assentamento do prédio à superfície.

A Figura 8 mostra o colapso de um prédio de 13 pisos ocorrido em Xangai, no dia 27 de junho de 2009. A parte c) da figura esquematiza a explicação que foi avançada para tão aparatoso e incomum colapso. De qualquer modo pela observação das partes a) e b) da figura parece poder-se concluir que as estacas não tinham armadura ou estavam muito pouco armadas.

A Figura 9 diz respeito ao colapso de uma parede diafragma ancorada que ocorreu no dia 3 de março de 2009, em Colónia. O colapso da parede provocou o derrube do edifício de 7 pisos que albergava um dos mais importantes arquivos históricos alemães, que foi possível evacuar antes do acidente, e de dois edifícios contíguos, num dos quais (no nº 230) viviam as duas vítimas mortais. A rotura ocorreu no decurso da última fase da escavação com 28m de profundidade e terá sido devida a fenómenos de percolação de água e de materiais soltos para dentro da escavação, os quais provocaram o assentamento diferencial dos prédios e, sequentemente, o seu colapso.

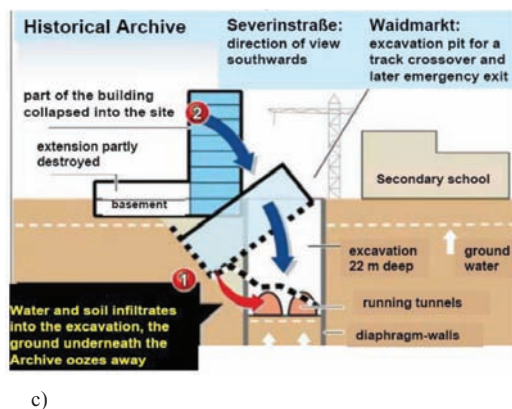
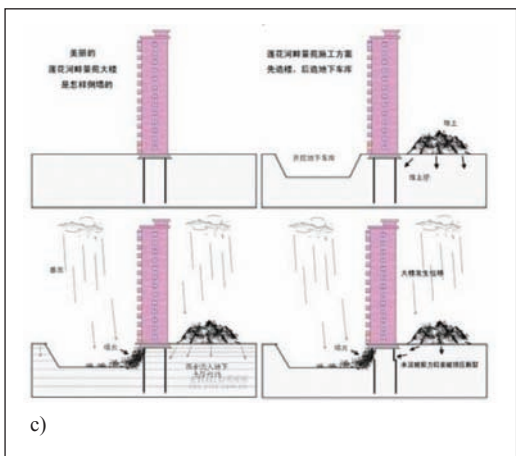
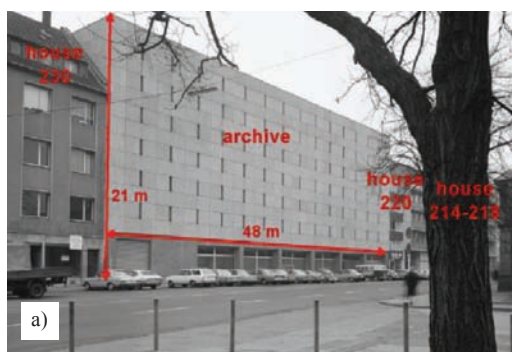


Fig. 8 – Prédio colapsado em Xangai, em junho de 2009.

Fig. 9 – Acidente em Colônia:
a) o arquivo e os edifícios adjacentes;
b) fotografia após o colapso;
c) interpretação das causas do colapso (Haack, 2009).

A Figura 10 inclui duas fotografias que ilustram o escorregamento ocorrido em 2 de abril de 2013, perto de Guimarães, e que afetou de forma grave uma urbanização de construção recente. Aparentemente a construção terá sido feita numa zona de acumulação de águas sem que a própria construção previsse medidas adequadas (canalização de caudais, drenagem, aterros com características ajustadas à situação, etc.). Como se pode ver nas fotografias, o deslizamento assumiu proporções importantes (o que sugere a existência de uma camada com fracas características mecânicas, particularmente, se saturada) mas, ao contrário do caso de Xangai, as estacas parecem ter-se comportado inesperadamente bem; com efeito, atendendo às ações horizontais que o movimento dos terrenos se poderia esperar que induziriam nas estacas, e não devendo estas estar armadas para tal ação inesperada, pareceria que o mais provável é que as estacas tivessem colapsado.



Fig. 10 – Aspectos do escorregamento ocorrido em abril de 2013, perto de Guimarães.

A Figura 11 refere-se a um deslizamento de terras ocorrido em março de 2014, em Oso, EUA. Este deslizamento teve consequências dramáticas - causou 43 mortes, o mais mortal da história dos EUA. Note-se os indícios claros de instabilidade da encosta, bem visíveis na fotografia tirada antes do acidente.



Fig. 11 – Deslizamento de terras em Oso, EUA, ocorrido em março de 2014.
A fotografia da esquerda é anterior ao deslizamento e a da direita posterior.

O último caso refere-se à rotura da barragem de rejeitados da mina *Mount Polley* da *Imperial Metals* (ver Figura 12). Trata-se de uma mina a céu aberto de cobre e ouro, localizada na *British Columbia*, Canadá. A 4 de agosto de 2014 a barragem sofreu uma rotura de grandes dimensões, tendo sido largados no sistema de lagos naturais existentes nas redondezas 25 milhões de metros cúbicos de água contaminada e de resíduos de mina.



Fig. 12 – Rotura da barragem de rejeitados da mina *Mount Polley* (Canadá), em 4/8/2014.
As fotos das figuras a) foram tomadas da mesma posição, antes e depois do acidente.

3.2.4 – Causas dos colapsos

Delatte (2006) estudou alguns casos bem documentados de roturas de estruturas e concluiu que os seguintes aspetos são comuns a muitas delas: i) ter levado ao limite os conhecimentos e as boas práticas existentes na altura; ii) não atender aos sinais iniciais de mau comportamento; iii) problemas de supervisão durante a construção; iv) projeto pouco robusto e com falta de redundância; v) problemas de manutenção e de inspeção.

No âmbito especificamente geotécnico, Chowdhury e Flentje (2007) avançam as seguintes explicações de âmbito muito alargado: compreensão parcelar do problema ou dos princípios geomecânicos, investigação inadequada das propriedades dos materiais, modelação defeituosa, análise imprecisa, conceção pobre e inadequada, construção deficiente, falta de observação e de monitorização adequadas.

Ainda no âmbito especificamente geotécnico, Day (2009) é mais pormenorizado nas razões que apresenta para explicar as roturas; estudou diversos casos históricos de colapso publicados na bibliografia da especialidade e concluiu que as causas principais das roturas ou maus comportamentos verificados são as indicadas no Quadro 7. Constatou ainda que frequentemente os

comportamentos indesejados são devidos à conjugação de duas ou mais das razões apontadas. Seja como for, nas roturas das estruturas geotécnicas a água e/ou a pressão da água constituem dos fatores que mais frequentemente contribuem para a sua ocorrência.

Quadro 7 – Causas mais comuns de rotura de obras geotécnicas (Day, 2009).

Causa	Descrição
Investigação geotécnica inadequada	Investigação insuficiente para modelar adequadamente as condições locais pode ser devida a restrições de programa ou orçamentais. De qualquer modo, mesmo investigações cautelosas podem não revelar aspetos críticos.
Parâmetros incorretos	Devido a: i) procedimentos inadequados de amostragem e ensaio; ii) seleção imprópria de parâmetros para situações de projeto particulares (por exemplo, valores médios ou característicos, etc.) iii) subestimação da variabilidade.
Modelo de análise impróprio	Incapacidade de identificar o mecanismo de rotura crítico, por exemplo, rotura drenada/não drenada de taludes ou fundações, estabilidade externa/interna de aterros reforçados.
Estimativa das ações por defeito	Avaliação incorreta da grandeza, distribuição e combinação das ações (forças ou deslocamentos).
Níveis freáticos inesperados ou alterações do teor em água	Alterações dos níveis freáticos podem causar aumento das solicitações ou diminuição da resistência. As forças de percolação podem ter um efeito adverso. Alterações do teor em água de solos parcialmente saturados podem causar amolecimento, expansão ou colapso.
Falta de qualidade da mão de obra e dos materiais	Incumprimento (sequência e cadência) dos procedimentos construtivos e das especificações, emprego de técnicas construtivas inadequadas e materiais com propriedades em desacordo com as prescrições do projeto.
Eventos anormais	Eventos meteorológicos extremos (temperatura, precipitação ou vento), impactos acidentais, erros de construção ou de uso da estrutura.

3.3 – Capacidade de previsão do comportamento das estruturas geotécnicas

3.3.1 – *Preâmbulo*

Apesar dos muito importantes avanços já conseguidos, dadas as dificuldades envolvidas, quer de caracterização, quer de compreensão qualitativa e, sobretudo, quantitativa do comportamento dos geomateriais, a capacidade de previsão do comportamento das obras reais permanece relativamente limitada. Com efeito, os resultados da maioria dos *benchmarks* que têm sido levados a cabo têm conduzido a resultados relativamente pobres. Apresentam-se em seguida dois exemplos muito distintos, quer pelo tipo de obras em causa, quer pelos terrenos envolvidos.

3.3.2 – *Estacas construídas num maciço de solos residuais*

Embora a preparação tenha começado 2 ou 3 anos antes, em 2004, por ocasião da ISC'2 (*2nd International Conference on Site Characterization*), que decorreu na Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, foi lançado um campo experimental em terrenos da própria faculdade. Com base nesse campo experimental, uma equipa coordenada e orientado por Viana da Fonseca e Jaime

Santos organizou o *International Prediction Event – Behaviour of Bored, CFA and Driven Piles in Residual Soils*, com o objetivo de estimar a capacidade de carga de estacas executadas por diferentes métodos em solo residuais do granito da cidade do Porto. Todos os elementos relativos ao evento, bem como algumas interpretações posteriores foram reunidos num volume publicado em 2008 (Viana da Fonseca e Santos, 2008).

A caracterização da zona onde foram construídas as estacas foi feita de forma cuidadosa e usando ensaios de diversos tipos, quer de campo, quer de laboratório. Resumidamente foram executados os seguintes trabalhos de caracterização geotécnica: i) 4 furos de sondagem com comprimentos superiores a 19m, 2 deles, e a 11m, os outros dois; ii) ensaios SPT nos 4 furos, espaçados de 1,5m; iii) 9 ensaios CPT com comprimentos entre os 5 e os 9m; 3 foram realizados depois da cravação das estacas C1 e C2; iv) 3×3 ensaios pressiométricos PMT; v) 9 ensaios com o dilatómetro de Marchetti DMT com comprimentos entre os 4 e os 10m; 4 foram realizados depois da cravação das estacas C1 e C2; vi) ensaios de refração sísmica; vii) ensaio sísmico entre furos (*crosshole*); viii) ensaios de laboratório em amostras de elevada qualidade; foram realizados 6 ensaios triaxiais CK₀D – 4 em compressão e 2 em extensão – com medição local das deformações, 2 ensaios de coluna ressonante e 1 ensaio edométrico.

No campo experimental foram executados 3 pares de estacas com 6m de comprimento, 1 par de estacas cravadas pré-fabricadas (C1 e C2) de secção quadrada com 350mm de lado, 1 par de estacas moldadas com revestimento provisório dos furos (E0 e E9) com 600mm de diâmetro e 1 par de estacas moldadas em furos abertos com trado contínuo (T1 e T2), com o mesmo diâmetro. Foram ainda executadas 8 estacas do tipo E (E1 a E8), com comprimentos da ordem dos 22m, para servirem de reação para os ensaios estáticos. As estacas C2, E0 e T2, com 6m de comprimento, bem como as estacas E2 e E6, com 22m, foram sujeitas a ensaios (verticais) dinâmicos de elevada deformação. As estacas C1, E9 e T1, com 6m de comprimento, foram ensaiadas estaticamente (na vertical). As estacas E9 e T1 foram instrumentadas com 6 extensómetros colocados em tubos de PVC instalados no centro das estacas e ancorados com espaçamentos de 1,02m entre eles; esta instrumentação permitiu estudar a mobilização da resistência lateral. Na base da estaca E9 foi instalada uma célula de carga.

Tendo-lhes sido enviada toda a documentação relativa à caracterização do campo experimental, solicitou-se aos participantes a estimativa de um valor para a capacidade de carga de cada um dos 3 tipos de estacas ensaiadas estaticamente, para posterior comparação com os resultados dos respetivos ensaios de carga. Participaram 32 equipas, 9 das quais portuguesas. O Quadro 8 mostra o número de previsões que foram apresentadas.

Quadro 8 – Previsões apresentadas e métodos usados.

Métodos		Estacas moldadas (E9)	Estacas a trado (T1)	Estacas cravadas (C1)
Analíticos baseados em fórmulas de capacidade de carga usando os parâmetros fundamentais, c' , ϕ' , etc.		15	15	16
Empíricos baseados nos resultados de ensaios “ <i>in situ</i> ”	- SPT	19	11	18
	- CPT	35	18	54
	- PMT	8	8	6

Seja $R_Q = Q / Q\text{-SPLT}$ ($s/b=10\%$) a razão entre a resistência prevista, Q , pelos diferentes participantes no evento e a resistência medida no ensaio para um assentamento de 10% do diâmetro da estaca, $Q\text{-SPLT}$ ($s/b=10\%$). As previsões efetuadas, em termos dos respetivos valores de R_Q , são reunidas nas seguintes figuras:

- Figura 13: para as estacas T1 (lado 1, esquerdo) e E9 (lado 2, direito) apresentam-se, para todas as previsões, os valores de R_Q relativos a: a) resistência da estaca; b) resistência lateral (SR – *shaft resistance*; c) resistência de ponta (BR – *base resistance*);
- Figura 14: para a estaca C1 apresentam-se, para todas as previsões, os valores de R_Q relativos à resistência da estaca.

No que respeita às estacas moldadas T1 e E9 verifica-se que: 1º) as previsões relativas à resistência das estacas situam-se na sua maioria do lado não seguro, isto é, são demasiado otimistas; 2º) as previsões das resistências totais, globalmente pouco ajustadas às resistências medidas, em ambos os casos resultam da “conjugação estranha” de duas previsões completamente erradas; com efeito, em termos praticamente unânimes, todos os métodos sobrestimam muito acentuadamente

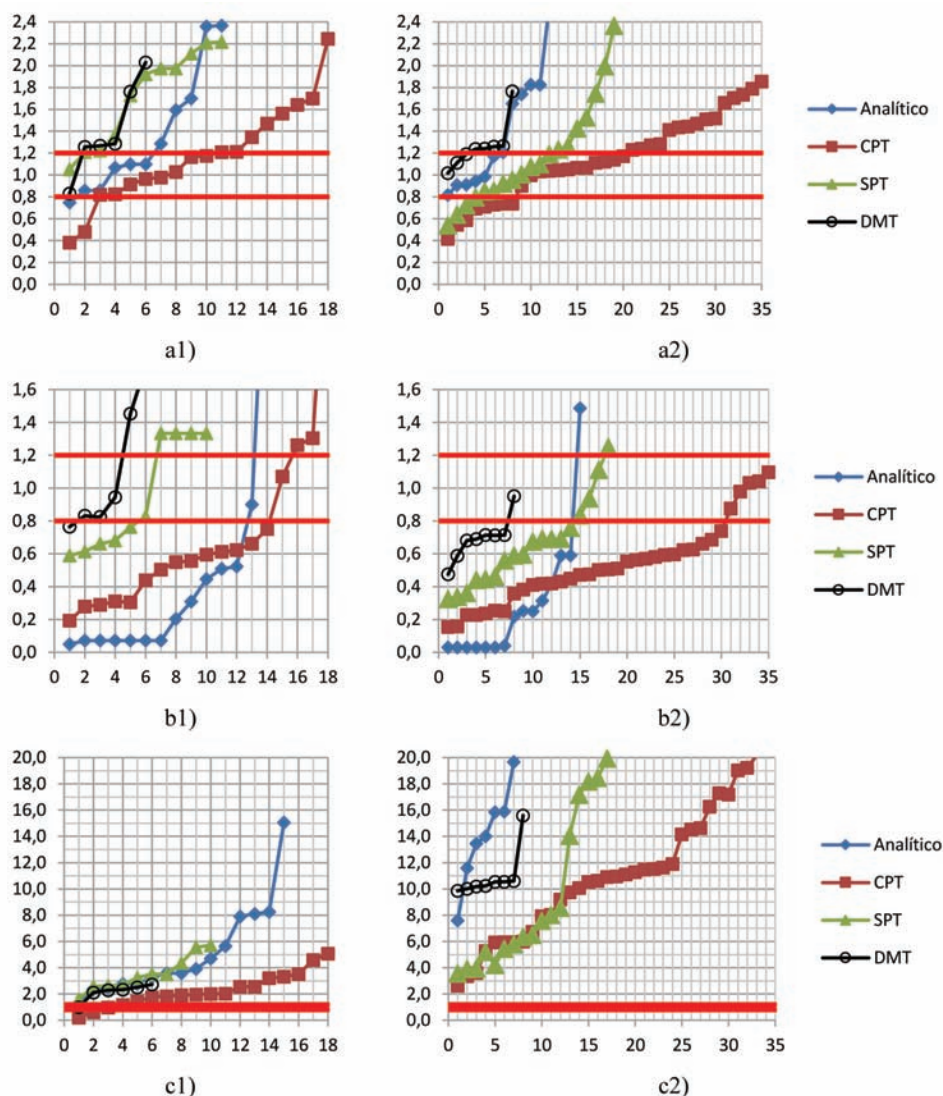


Fig. 13 – Estacas T1 (lado 1, esquerdo) e E9 (lado 2, direito). Todos os valores previstos das razões R_Q relativas a: a) resistência da estaca; b) resistência lateral; c) resistência de ponta.

(mais na estaca E9) a resistência de ponta e, em compensação, embora menos unanimemente e não tão acentuadamente, subestimam (mais na estaca E9) a resistência lateral; portanto, pode dizer-se que, de uma forma genérica, o mecanismo de mobilização das resistências não é adequadamente captado pelas metodologias empregues pelos participantes no evento; pode-se mesmo enfatizar dizendo que está muito longe de o ser.

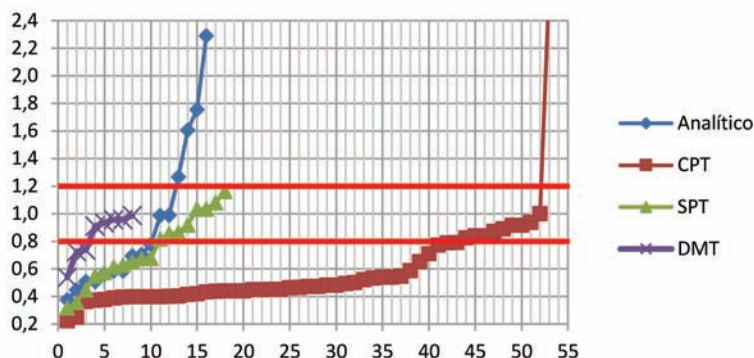


Fig. 14 – Estaca C1. Todos os valores previstos da razão R_Q relativa à resistência da estaca.

No que concerne à estaca pré-fabricada cravada constata-se que a maioria das previsões subestima a resistência da estaca.

A ideia geral com que se fica do cuidadoso exercício de previsão efetuado é que os métodos empregues – provavelmente a maior parte deles desenvolvidos para maciços sedimentares – não conseguem captar as características específicas dos solos residuais.

Com efeito, poder-se-á argumentar que a má qualidade genérica destas previsões é consequência do facto de se tratar de solos residuais. Apesar da cuidada caracterização dos materiais existentes no campo experimental, a complexidade do comportamento dos solos residuais, o desconhecimento que ainda existe sobre as características desse comportamento e a falta de experiência suficiente da aplicação a solos residuais de metodologias essencialmente desenvolvidas para solos sedimentares, sem as necessárias adaptações – as quais só são passíveis de ser as adequadas após a obtenção de um lastro experimental suficiente – não permitem que, no estado atual dos conhecimentos, se obtenham resultados mais encorajadores.

3.3.3 – Escavação suportada por cortina ancorada em maciço arenoso

O segundo caso, descrito por Schweiger (2002), é completamente distinto do anterior: i) refere-se ao comportamento em serviço de uma escavação ancorada; ii) envolve um maciço arenoso (as areias de Berlim) relativamente bem conhecido das equipas que participaram na previsão; iii) não se procedeu a uma caracterização especial do sítio da obra. De acordo com Schweiger (2002) entendeu-se que o exercício de previsão devia, o mais possível, emular as metodologias habitualmente usadas nos projetos da engenharia prática da mesma tipologia. Assim, o exercício teve as seguintes características (ver Figura 15):

- Apenas foi fornecido um conjunto limitado de dados relativos às propriedades das areias de Berlim; isto porque, na prática, dificilmente os dados requeridos pelas análises numéricas são fornecidos nos relatórios geotécnicos; assim, foram indicados valores de referência dos parâmetros de deformabilidade e resistência frequentemente usados no dimensionamento de escavações nas areias de Berlim: i) $E_s \approx 20\,000 \sqrt{z}$ kPa, para $0 < z < 20$ m, e $E_s \approx 60\,000 \sqrt{z}$

kPa, para $z > 20$ m; ii) $\phi' = 35^\circ$ (compactidade média); iii) $\gamma = 19 \text{ kN/m}^3$, $\gamma' = 10 \text{ kN/m}^3$ e $K_0 = 1 - \sin \phi'$;

- Disponibilizaram-se os resultados de ensaios edométricos (em amostra soltas e compactas) e de ensaios triaxiais (de amostras compactas e com tensões de confinamento de 100, 200 e 300 kPa); contudo foi deixado ao critério dos participantes a avaliação cuidadosa, face à sua experiência, dos valores da deformabilidade a usar nos cálculos;
- Para a parede de betão armado propuseram-se as seguintes propriedades (elástico linear): $\gamma = 24 \text{ kN/m}^3$, $E = 30 \text{ MPa}$ e $\nu = 0,15$;
- O problema emula uma obra real na qual se mediram os deslocamentos horizontais da parede; foram fornecidas as forças de pré-esforço aplicadas às ancoragens; a sequência construtiva é a seguinte: estado de tensão inicial; 1ª fase – rebaixamento do nível freático até -17,90 m; 2ª fase – escavação até -4,80 m; 3ª fase – pré-esforço das ancoragens do 1º nível (-4,30 m); 4ª fase – escavação até -9,30 m; 5ª fase – pré-esforço das ancoragens do 2º nível (-8,80 m); 6ª fase – escavação até -14,35 m; 7ª fase – pré-esforço das ancoragens do 3º nível (-13,85 m); 8ª fase – escavação até -16,80 m;
- Considera-se que o problema é de deformação plana, que o efeito da construção da parede pode ser desprezado e que o *cut off* hidráulico instalado à profundidade de 33m (ver Figura 15) não constitui um suporte estrutural;
- Não se impôs qualquer restrição quanto ao modelo constitutivo, à discretização, ao tipo de elementos, etc.; sugeriu-se o uso de elementos de interface entre a parede e o solo (com resistência $\phi' / 2$) e as dimensões do domínio, a considerar nos cálculos, indicadas na Figura 15.

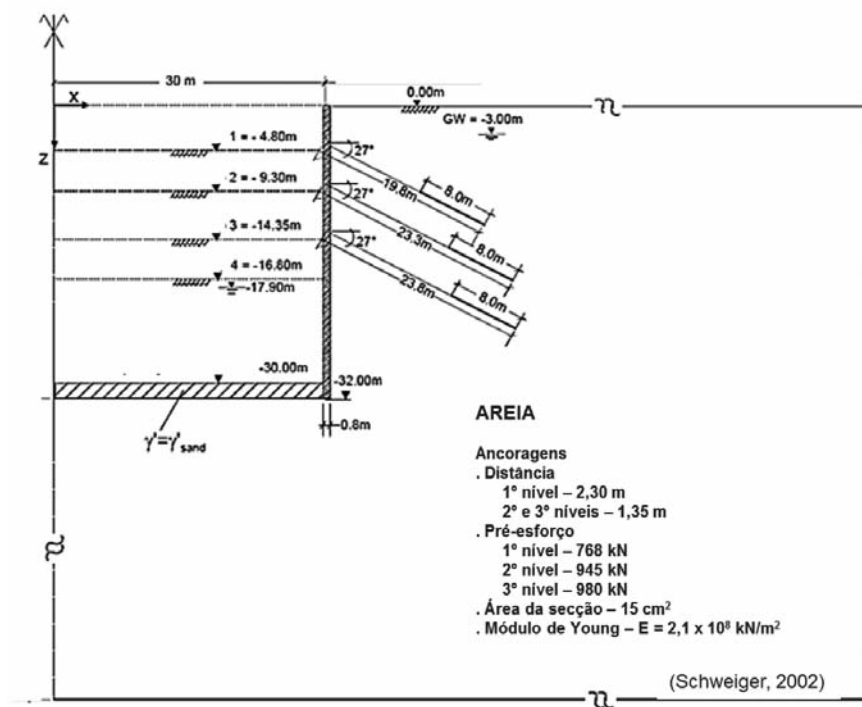


Fig. 15 – Características da escavação ancorada em areias de Berlim (Schweiger, 2002).

Foram apresentadas 20 previsões do comportamento da parede elaboradas por engenheiros geotécnicos ou equipas de universidades e de empresas de consultoria. Foi usada uma larga variedade de programas e de leis constitutivas; a maioria usou modelos elástico-plástico perfeitos (8 análises) e com endurecimento (6 análises); foram ainda usadas formulações hipoplásticas (3 previsões). Os vários participantes não divergiram significativamente nos valores dos parâmetros de resistência do terreno que admitiram mas discrepam na dilatação, havendo valores entre 0 e 15°. Como seria de esperar houve um leque mais aberto de opções no que respeita à deformabilidade, sendo que a maioria dos analistas adotou valores muito suportados na sua própria experiência. As opções respeitantes às interfaces, ao tipo de elementos, às dimensões do domínio analisado, ao processo de modelação das ancoragens, aos detalhes da implementação dos modelos constitutivos e ao processo de resolução do sistema não linear também foram diversas.

Na Figura 16 a) e b) mostram-se os deslocamentos finais obtidos em 14 dos 20 cálculos: i) os deslocamentos horizontais máximos da parede previstos variam entre 8 e 67mm; ii) os assentamentos máximos da superfície do terreno previstos situam-se entre -16 (levantamento) e 45mm. Note-se que Schweiger (2002) entendeu não considerar 6 dos 20 cálculos: i) em 5 deles obtiveram-se deslocamentos muito superiores (deslocamentos horizontais máximos entre 75 e 230mm e assentamentos entre 70 e 275mm) porque, ao contrário de todos os restantes analistas, adotaram para o terreno parâmetros de deformabilidade baseados nos resultados dos ensaios edométricos, muito inferiores aos recomendados na bibliografia; ii) no outro obteve-se um resultado muito pouco razoável e, por isso, pouco expectável, visto que, no final da construção, a parede se deslocava contra o terreno 30mm e a superfície se levantava cerca de 50mm.

Em relação aos deslocamentos horizontais medidos da parede (no topo ± 20 mm, máximo de ± 31 mm, a cerca de 10m de profundidade, e ± 28 mm, na base da escavação a 16,8m de profundidade), verifica-se o seguinte: a) duas estimativas (B15, sobretudo, e B11) ajustam-se muito razoavelmente ao medido; b) um cálculo (B9) prevê deslocamentos na zona central cerca de 40% superiores aos medidos, mas afasta-se muito tanto no topo como no pé da parede; c) os restantes cálculos afastam-se muito dos valores medidos, sendo que a maioria prevê deslocamentos horizontais superiores (1,5 a 2,5 $\times$) ou muito superiores (até 8 $\times$) aos medidos; d) em contrapartida, alguns cálculos preveem deslocamentos muito inferiores (menos de metade) aos medidos.

Também no que respeita às forças nas ancoragens (Figura 16 c) a flutuação das previsões é muito acentuada. O mesmo se verifica no tocante à previsão dos momentos flectores da parede.

Esta grande discrepância dos resultados dos cálculos é devida, entre outras razões, a que os vários participantes usaram modelos numéricos diversos. Nessa medida, poder-se-á argumentar que devido a essa diversidade a comparação dos resultados não faz sentido. Ora, como muito bem refere Schweiger (2002), não se pode ignorar o facto de que isso é o que acontece na prática e que o objetivo do exercício é testar as metodologias aplicadas na prática profissional. Ademais, segundo Schweiger (2002) a maioria dos analistas fez opções razoáveis quer no que concerne aos valores assumidos para os parâmetros fundamentais quer no tocante aos pormenores da modelação. Uma vez que não parece ser razoável que os resultados de análises efetuadas por pessoas capazes e com experiência mostrem uma variação “dependente do autor” de 100% ou mais, conclui-se que a complexidade dos problemas geotécnicos exige um aprofundamento dos conhecimentos e das metodologias, o que passa também pelo estabelecimento de recomendações e de normas, quando for possível.

3.4 – Lacunas

As dificuldades em determinar os parâmetros geotécnicos apropriados, particularmente os que caracterizam a deformabilidade, configuram uma situação indesejável mas representam o que se passa na prática corrente atual. Como bem ilustra o primeiro caso relatado na secção anterior, tal

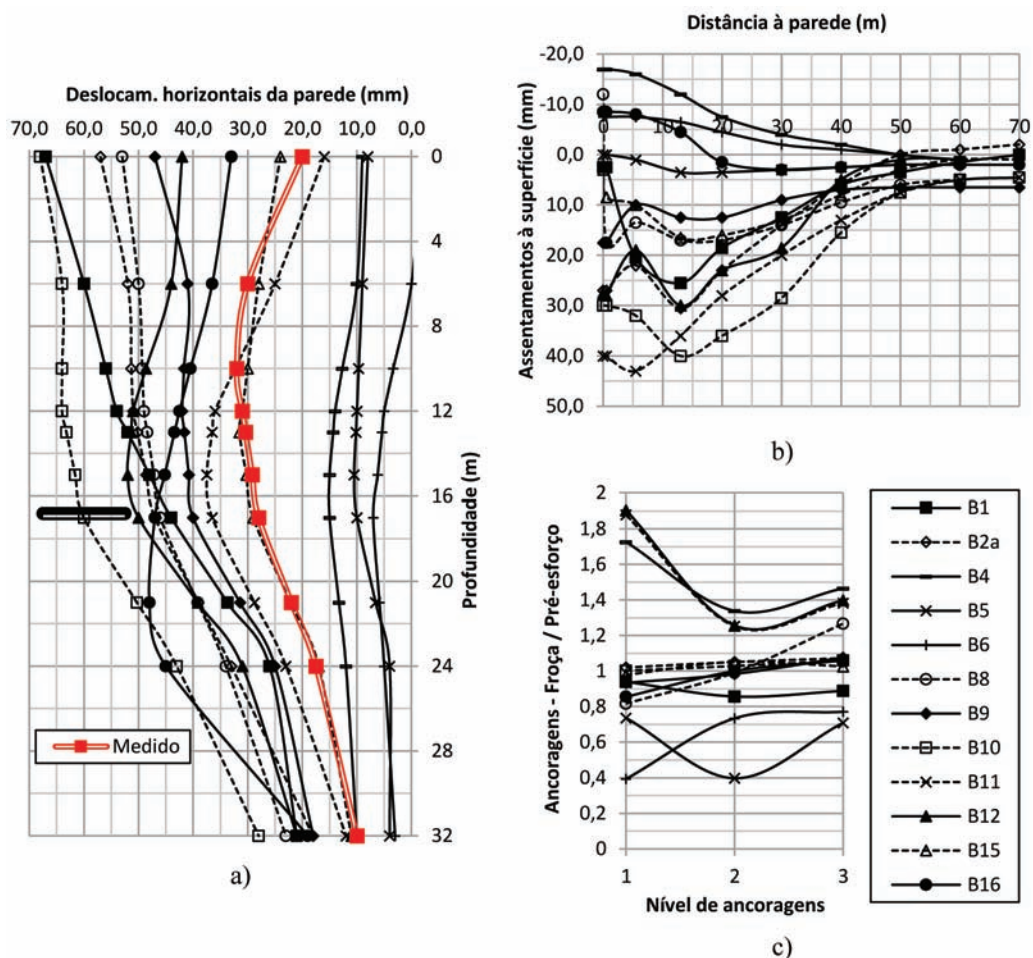


Fig. 15 – Valores finais calculados: a) deslocamentos horizontais da parede; b) assentamentos da superfície do terreno; c) forças nos 3 níveis de escoras (Schweiger, 2002).

não se deve apenas a que, na maioria dos casos práticos, as investigações e os relatórios geotécnicos não têm a profundidade que é imprescindível para “alimentar” adequadamente os modelos numéricos mais sofisticados. Com efeito, no estado atual dos conhecimentos e da prática, há inequivocamente claras carências nos seguintes domínios:

- Capacidade de explorar e caracterizar adequadamente os maciços terrosos e as suas incertezas; realmente melhorar as capacidades de “ver dentro da Terra” constitui talvez a necessidade atual mais importante da geoengenharia, seja qual for o problema específico a ser resolvido; há necessidade de técnicas de caracterização do subsolo mais rápidas, com melhores relações custo-benefício, mais precisas e menos invasivas (NRC, 2006);
- Metodologias para a adequada consideração das heterogeneidades dos maciços e as eventuais descontinuidades;
- Melhorar a capacidade de caracterizar a variabilidade espacial das propriedades dos maciços, a incerteza dessas propriedades e do comportamento dos mesmos e, consequentemente, a fiabilidade dos sistemas;

- Caracterização e compreensão do comportamento dos maciços que não se enquadram nos paradigmas em que se fundam as Mecânicas dos Solos e das Rochas clássicas; caracterização dos materiais que estão na faixa entre os solos duros e as rochas brandas (xistos, argilitos, granitos decompostos e outros materiais naturais frequentes);
- Aprofundar o conhecimento dos efeitos da não saturação no comportamento dos maciços terrosos e da sua importância na compreensão do desempenho de estruturas geotécnicas;
- Compreender o comportamento das estruturas geotécnicas, tendo em atenção as trajetórias de tensão reais e a sua influência no comportamento dos solos;
- Subsiste uma grande necessidade de definir procedimentos e normas relativas à aplicação fiável de modelos numéricos na prática da engenharia geotécnica (Schweiger, 2002).

Para além destas, identificam-se ainda as seguintes lacunas (NRC, 2006):

- Melhorar os métodos de deteção e de monitorização, incluindo melhores tecnologias geofísicas e de controlo remoto, instrumentação mais confiável e precisa, técnicas mais avançadas de aquisição, processamento e armazenamento de dados e de incorporação dos dados recolhidos em sistemas de informação adequados.
- Entender e prever o comportamento a longo prazo das edificações e das estruturas geotécnicas, incluindo os efeitos do tempo nos maciços afetados pelas construções. As propriedades e os fatores condicionantes mudam com o tempo, mas a nossa capacidade de prever com precisão o que vai acontecer é limitada, mesmo no decurso de períodos de tempo curtos.
- Compreender os processos biogeoquímicos dos solos e rochas, visando dois propósitos: (1) uma melhor compreensão da composição e das propriedades dos solos e das rochas e do modo como elas podem mudar com o tempo; (2) esse maior conhecimento pode abrir as portas a novos processos de remediação para aplicações ambientais e a aplicações inovadoras e sustentáveis de técnicas de estabilização e de melhoramento dos maciços terrosos.
- Melhorar os métodos e técnicas de estabilização e de melhoramento dos solos. Mais do que nunca há que lidar com locais e condições de subsolo que são inadequados, especialmente nas áreas urbanas e nas megacidades, tanto de países desenvolvidos como em desenvolvimento. São necessários métodos de tratamento menos dispendiosos e mais eficazes para melhorar os solos e as rochas, para uso como suporte de fundações e como materiais de construção.
- Melhorar a compreensão e a capacidade de previsão do comportamento dos terrenos sob cargas extremas e em ambientes extremos. Compreender e prever o comportamento sob cargas extremas é essencial no âmbito dos esforços visando a mitigação de riscos. Entender o comportamento dos terrenos em ambientes extremos, incluindo o fundo do oceano, as regiões polares, a Lua ou Marte, proporciona novas oportunidades e desafios técnicos e científicos.
- Desenvolver as bases de dados e os modelos relativos ao subterrâneo, incluindo dados geológicos e geotécnicos, informações sobre o ambiente construído (por exemplo, localização dos serviços públicos subterrâneos), elementos relativos aos recursos naturais, dados ambientais e resultados de monitoração de riscos naturais e das condições ambientais.
- Aplicar tecnologias avançadas de computação e de informação e sistemas de comunicação. Estas tecnologias vão condicionar o que pode ser investigado e como, pois delas depende a

possibilidade, por um lado, de articulação dos equipamentos, potenciando as capacidades disponíveis, e, por outro, de integração, em tempo real, das análises e das observações complementares de carácter experimental, computacional e prototípico.

Por fim, saliente-se que no âmbito do melhoramento das capacidades de previsão dos comportamentos das obras reais, o *benchmarking* dos modelos e das metodologias é muito importante na engenharia geotécnica, provavelmente mais do que em outras áreas da engenharia, porque (adaptado de Schweiger, 2002): i) o domínio a analisar geralmente não está bem definido; ii) nem sempre é claro se se devem usar modelos contínuos ou descontínuos; iii) existem muitos modelos constitutivos mas não existe um “modelo aprovado” para cada tipo de solo; iv) em muitos casos os detalhes da construção não podem ser modelados muito rigorosamente no espaço e no tempo; v) a interação solo-estrutura é em geral importante e exige a adoção de tratamentos particulares; vi) os pormenores da implantação e as metodologias de solução (de problemas não lineares, como, em geral, são os geotécnicos) podem afetar os resultados de certos problemas.

4 – AGRADECIMENTOS

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

5 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aon Benfield (2014). *Annual Global Climate and Catastrophe Report - Impact Forecasting 2013*.
- 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*. Electronic Journal of the Faculty of Civil Engineering Osijek, e-gfos, no. 3, December 2011, pp.120-136.
- Breedevel, J. (2012). *Future position of Geotechnical Engineering*. (http://www.kiviniirja.nl/eygec/papers/keynote_breedevel.pdf)
- Cadden, A.; Gomez, J.; Bruce, D.; Armour, T. (2004). *Micropiles: recent advances and future trends*. Current Practices and Future Trends in Deep Foundations, edited by J.A. DiMaggio and M.H. Hussein, ASCE Geotechnical Special Publication 125.
- Cardoso, A.S. (2013). *Questões de segurança*. Revista Geotecnia, nº 127.
- 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.
- CIOB – The Chartered Institute of Building (2013). *Corruption in the UK Construction Industry*.
- Clark, G. (2007). *A Farewell to Alms – A Brief Economic History of the World*. Princeton University Press. Traduzido em 2008 para português com o título “Um Adeus às Esmolas – Uma Breve Historia Económica do Mundo”, Editorial Bizâncio.
- 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.

- Day, P. (2009). *What is failure*. Chapter 2 of Forensic Geotechnical Engineering, edited by V.V.S. Rao, TC40 - Forensic Geotechnical Engineering, Int. Soc. for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering.
- Delatte, N. (2006). *Learning from failures*. Civil Engineering Practice Fall/Winter 2006, Boston Society of Civil Engineers Section/ASCE, pp.21-38.
- CRED – Centre for Research on the Epidemiology of Disasters (2014). *Emergency Events Database EM-DAT*. The OFDA / CRED International Disaster Database – www.emdat.be – Université Catholique de Louvain, Brussels, Belgium (consultada em 2014).
- Flyvbjerg, B. (2005). *Policy and Planning for Large Infrastructure Projects: Problems, Causes, Cures*. World Bank Policy Research Working Paper 3781.
- Flyvbjerg, B. (2006). *From Nobel prize to project management: getting risks right*. Project Management Journal, Vol. 37, No. 3, pp. 5-15.
- Flyvbjerg, B. (2014). *What You Should Know About Megaprojects and Why: An Overview*. Project Management Journal, Vol. 45, No. 2, pp.6–19.
- Flyvbjerg, B.; COWI. (2004). *Procedures for dealing with optimism bias in transport planning: Guidance document*. UK Department for Transport, London.
- Flyvbjerg, B.; Holm, M.K.S.; Buhl, S.L. (2002). *Underestimating costs in public works projects: Error or lie?* Journal of the American Planning Association, 68(3), pp.279-295.
- Flyvbjerg, B.; Holm, M.K.S.; Buhl, S.L. (2004). *What causes cost overrun in transport infrastructure projects?* Transport Reviews, 24(1), pp.3-18.
- Flyvbjerg, B.; Holm, M.K.S.; Buhl, S.L. (2005). *How (in)accurate are demand forecasts in public works projects? The case of transportation*. Journal of the American Planning Association, 71(2), pp.131-146.
- 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.
- Haack, A. (2009). *Construction of the North-South-Metro Line in Cologne and the accident on March 3rd*. International Symposium on Social Management Systems (SSMS).
- Hajra, M.G. (2012). *Sustainability in geotechnical engineering: current and future trends in research, education & professional practice*. Louisiana Civil Engineering Conference and Show 2012, Pontchartrain Center Kenner.
- Hansford, P. (2011). *Delivering value*. Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Civil Engineering, Vol. 164, Issue 1.
- Hardoon, D.; Heinrich, F. (2011). *Bribe Payers Index 2011*. Report of the Transparency International – The Global Coalition Against Corruption.

- IITG/IGS – Indian Institute of Technology Guwahati/Indian Geotechnical Society (2012). Proceedings of the National Workshop on Emerging Trends in Geotechnical Engineering, edited by A. Murali Krishna.
- IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Changes (2000). *Emissions Scenario*. Special Report. Summary for Policymakers.
- IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Changes (2007). *Climate Change 2007, Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*:
- 1) Synthesis Report, Contribution of Working Groups I, II and III, Core Writing Team, R.K. Pachauri, & A. Reisinger, eds., Geneva, 104 p.
 - 2) The Physical Science Basis, Contribution of Working Group I, S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor & H.L. Miller, eds., Cambridge University Press, Cambridge, 996 p.
 - 3) Impacts, Adaptation and Vulnerability, Contribution of Working Group II, M.L. Parry, O.F. Canziani, J.P. Palutikof, P.J. van der Linden, & C.E. Hanson, eds., Cambridge University Press, Cambridge, 976 p.
 - 4) Mitigation, Contribution of Working Group III, B. Metz, O.R. Davidson, P.R. Bosch, R. Dave, & L.A. Meyer, eds., Cambridge University Press, Cambridge, 851 p.
- Keaton, J.R. (2010). *Modern trends in engineering geology*. Environmental and Engineering Geology – Encyclopedia of Life Support Systems, Vol. 1: 1-10.
- Kenny, C. (2009). *Why Do People Die in Earthquakes? The Costs, Benefits and Institutions of Disaster Risk Reduction in Developing Countries*. Policy Research Working Paper 4823, WPS4823, Sustainable Development Network, Finance Economics & Urban Department, The World Bank, January 2009.
- Lambe, T.W. (1973). *Predictions in soil engineering*. Géotechnique 23, No. 2, pp.149-202.
- Lo, R.C.; Wang, Y. (2012). *Lessons learned from recent earthquakes – geoscience and geotechnical perspectives*. Chapter 1 of Advances in Geotechnical Earthquake Engineering – Soil Liquefaction and Seismic Safety of Dams and Monuments, edited by Abbas Moustafa, publisher InTech, 436 pages.
- 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.
- Maddison, A. (2014). Maddison Historical GDP Data.
(<http://www.worlddeconomics.com/Data/MadisonHistoricalGDP/Madison%20Historical%20GDP%20Data.efp>)
- Marr, W.A. (2006). *Geotechnical Engineering and Judgment in the Information Age*. Proceedings of the GeoCongress 2006, Geotechnical Engineering in the Information Technology Age, edited by D.J. DeGroot, J.T. DeJong, J.D. Frost & L.G. Baise, the Geo-Institute of the American Society of Civil Engineers, pp.1-17.

- Matos Fernandes, M. (2010). *Deep urban excavations in Portugal: practice, design, research and perspectives*. Manuel Rocha Lecture, Soils and Rocks, Issue No.3.
- Meehl, G.A.; Stocker, T.F.; Collins, W.D.; Friedlingstein, P.; Gaye, A.T.; Gregory, J.M.; Kitoh, A.; Knutti, R.; Murphy, J.M.; Noda, A.; Raper, S.C.B.; Watterson, I.G.; Weaver, A.J.; Zhao, Z.-C. (2007). *Global Climate Projections*. Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- 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.
- Nicholson, D.; Tse, C.; Penny, C. (1999). *The Observational Method in ground engineering – principles and applications*. Report 185, CIRIA, London.
- 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.
- NRC – National Research Council (2010). *Advancing the Science of Climate Change - America's Climate Choices*. Panel on Advancing the Science of Climate Change, Board on Atmospheric Sciences and Climate, Division on Earth and Life Studies, National Academies Press.
- Pau, L.Y.; Chau, K.S. (2012). *Catalogue of Notable Tunnel Failure Case Histories (up to October 2012)*. 3rd edition. Prepared by Mainland East Division Geotechnical Engineering Office, Civil Engineering and Development Department, The Government of the Hong Kong Special Administrative Region, October 2012.
- Reddy, K.R. (2011). *Emerging trends in remediation of contaminated sites in the United States*. Proceedings of the US-Japan Workshop on Geoenvironmental Engineering, Kyoto, Japan.
- Rzevski, G.; Skobelev, P. (2014). *Managing Complexity*. WIT Press.
- Schweiger, H.F. (2002). *Benchmarking in geotechnics 1 – Part I: Results of benchmarking*. Computational Geotechnics Group, CGG_IR006_2002.
- 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.
- Shane, J.; Strong, K.; Gransberg, D. (2012). *Project management strategies for complex projects*. Guidebook, Resources, and Case Studies. Prepared for the Strategic Highway Research Program 2 (SHRP 2 Renewal Project R10), Transportation Research Board of the National Academies.
- Simpson, B.; Tatsuoka, F. (2008). *Geotechnics: the next 60 years*. Géotechnique 58, No.5, pp.357-368.

- Solana, J. (2014). *Las grietas del cambio climático*. El País, 15 de agosto de 2014.
- Tan, Y.-C.; Chow, C.-M. (2009). *Current and future trends of geotechnical engineering in Malaysia*. (http://www.gnpgeo.com.my/download/publication/2007_04.pdf)
- UN – United Nations (2010). *World Urbanization Prospects - The 2009 Revision – Highlights*. Department of Economic and Social Affairs, Population Division, ESA/P/WP/215.
- UNDP – United Nations Development Programme (2010). *Human Development Report 2010*.
- UNFCCC – United Nations Framework Convention on Climate Change (1992). United Nations Conference on Environment and Development (UNCED). Rio de Janeiro. (<http://unfccc.int/resource/docs/convkp/conveng.pdf>.)
- UNFCCC – United Nations Framework Convention on Climate Change (2009). *National Adaptation Programmes of Action*. (http://unfccc.int/national_reports/napa/items/2719.php.)
- USGCRP – US Global Change Research Program (2009). *Global Climate Change Impacts in the United States*. New York, Cambridge University Press.
- Viana da Fonseca, A.; Santos, J. (2008). *International Prediction Event – Behaviour of Bored, CFA and Driven Piles in Residual Soil*. ISC'2 Experimental Site, 670p.
- WB/UN – The World Bank/The United Nations (2010). *Natural hazards, unnatural disasters: the economics of effective prevention*. The International Bank for Reconstruction and Development/The World Bank.
- WDR – World Development Report (2009). *Reshaping Economic Geography*. The International Bank for Reconstruction and Development / The World Bank.
- WEF – World Economic Forum (2011). *A vision for managing natural disaster risk - Proposals for public/private stakeholder solutions*.