AMBIENTE E SUSTENTABILIDADE: DESAFIOS E PERSPETIVAS PARA A GEOTECNIA

Environment and sustainability: challenges and perspectives for geotechnics

António José Roque*

RESUMO – A Geotecnia Ambiental e a Geotecnia Sustentável são duas subdisciplinas recentes da Geotecnia e estão diretamente relacionadas com o desenvolvimento de soluções para a proteção da saúde pública e do ambiente. Encontram-se, por isso, na vanguarda dos desafios da engenharia da construção no século XXI, onde a sustentabilidade é um dos imperativos mais importantes. Por outro lado, estando inseridas num dos mercados de maior crescimento atual a nível mundial, perspetivam-se excelentes oportunidades económicas para as empresas geotécnicas. As prioridades emergentes nas duas subdisciplinas são diversas e requerem estreita cooperação com outras disciplinas (ambiente, geologia, química, biologia, ciência dos materiais, entre outras), para os avanços serem mais rápidos e com melhores resultados e os desafios vencidos. Os tópicos selecionados para este trabalho são reunidos nestas quatro áreas: alterações climáticas, economia circular, remediação de terrenos contaminados, e sustentabilidade e mineração dos aterros de resíduos.

SYNOPSIS – Environmental Geotechnics and Sustainable Geotechnics are two subdisciplines of Geotechnics and are directly related to the development of solutions for the protection of public health and the environment. They are, therefore, at the forefront of the challenges of construction engineering in the 21st century, where sustainability is one of the most important imperatives. On the other hand, being inserted one of the markets of greatest actual growth worldwide, there are excellent economic opportunities for geotechnical companies. Emerging priorities in the two sub-disciplines are diverse and require close cooperation with other disciplines (environment, geology, chemistry, biology, materials science, among others), to the advances being faster and with better results and the challenges overcome. The topics selected for this work are gathered in these four areas: climate change, circular economy, remediation of contaminated soils, and sustainability and landfill mining.

Palavras Chave – Alterações climáticas, economia circular, solos contaminados.

Keywords – Climate changes, circular economy, contaminated soils.

1 – INTRODUÇÃO

Ao iniciar este trabalho entende-se relevante definir o entendimento subjacente aos termos *desafio* e *perspetiva*, do título, pela sua relevância na organização e nos conteúdos a seguir apresentados.

Assim, o termo *desafio* é aqui usado no pressuposto que existem dificuldades científicas e técnicas a ultrapassar, as quais, de alguma forma, não vêm fazendo parte das preocupações geotécnicas ou estão para além das suas capacidades atuais. Tendo presente, citando Niels Bohr, que a "Prediciton is very difficult, especially about the future" (Simpson e Tatsuoka, 2008), a *perspetiva* é sobretudo um ponto de vista do autor deste trabalho, ainda que estruturada e fundamentada a partir da análise da informação recolhida.

* Investigador Principal, Departamento de Geotecnia, Laboratório Nacional de Engenharia Civil. orcid. org/0000-0003-4467-0164 E-mail: aroque@lnec.pt

http://dx.doi.org/10.24849/j.geot.2018.143.04 – © 2018 Sociedade Portuguesa de Geotecnia

Dada a abrangência do título foi prioritário identificar os temas a desenvolver, tendo por ponto de partida a sua importância atual, e sobretudo futura (NRC, 2006; Chowdhury e Flentje, 2007; Simpson e Tatsuoka, 2008; Keaton, 2010; Brandl, 2011; Francisca, 2011; Breedeveld, 2012; Hajra, 2012; Jefferis, 2014; Reddy, 2014; Rowe, 2015; Tripathy, 2015; Reddy e Adams, 2015; e Benson, 2016), mas também os conhecimentos e as áreas de interesse do autor.

A Geotecnia Ambiental e a Geotecnia Sustentável são as duas subdisciplinas da Geotecnia que mais se relacionam com o desenvolvimento de soluções para a proteção da saúde pública e do ambiente e que estão, por isso, na vanguarda dos desafios da sustentabilidade da engenharia da construção no século XXI. Para além disso, as tecnologias que oferecem soluções para os problemas ambientais são um dos mercados com maior crescimento a nível mundial, tendo alcançado aproximadamente 678 biliões de euros em 2013 (Weinberger *et al.*, 2012). A expressão *tecnologias ambientais* abarca não só os produtos, mas também os conceitos, as técnicas e os serviços que podem mitigar os danos ambientais ou ajudar à recuperação de áreas afetadas.

A lista de prioridades atuais e emergentes em Geotecnia Ambiental e em Geotecnia Sustentável, compilada a partir da bibliografia consultada, é extensa, tendo-se procurado sintetizá-las nestas áreas: a) Medidas de Mitigação e de Adaptação às Alterações Climáticas; b) Transformação de Resíduos num Recurso; c) Remediação de Terrenos Contaminados; d) Segurança Estrutural e Risco Ambiental dos Resíduos Mineiros (rejeitados e escombros); e) Redução do Consumo de Energia e Produção de Energia Recorrendo a Fontes Sustentáveis Alternativas aos Combustíveis Fósseis; f) Exploração Sustentável dos Aterros de Resíduos; g) Mineração dos Aterros de Resíduos; e h) Melhoramento de Terrenos com Técnicas Inovadoras (por exemplo, a biotecnologia e a nanotecnologia).

Em todos estes temas emergentes só serão possíveis avanços mais rápidos, maiores e com melhores resultados através de uma estreita cooperação entre várias disciplinas, nomeadamente, a engenharia civil, a engenharia do ambiente, a geologia, a química, a biologia e a ciência dos materiais.

Os tópicos selecionados para uma discussão mais aprofundada neste trabalho foram agrupados nestas quatro áreas: a) Alterações Climáticas; b) Economia Circular; c) Remediação de Terrenos Contaminados; e d) Sustentabilidade e Mineração dos Aterros de Resíduos. A próxima secção descreve brevemente a formação e a evolução da Geotecnia Ambiental e da Geotecnia Sustentável.

2 – GEOTECNIA AMBIENTAL E GEOTECNIA SUSTENTÁVEL

Até finais dos anos 70, a **Geotecnia Ambiental** não fazia parte do vocabulário geotécnico. As subdisciplinas então existentes eram a Mecânica dos Solos, a Mecânica das Rochas e a Geologia de Engenharia (Figura 1a). Foi apenas depois de aparecerem os primeiros casos de contaminação em Love Canal (Niagara Falls, New York) e em Valley of the Drums (Bullitt County, Kentucky), nos Estados Unidos da América (EUA), com graves consequências para a saúde pública e para o ambiente, que os americanos ficaram alertados para a necessidade de uma melhor gestão dos resíduos (Reddy, 2014 e Rowe, 2015). Até aí, o interesse pelas questões ambientais focava-se nos problemas da poluição da água e do ar (Reddy, 2014). Refletindo a crescente necessidade e interesse das questões ambientais no meio geotécnico, a Sociedade Internacional de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica (ISSMGE) criou o "TC215 – Environmental Geotechnics" em 1992 (Fratalocchi, 2008), passando a Geotecnia Ambiental a constituir a quarta subdisciplina da Geotecnia (Figura 1b).

A conceção e a construção de infraestruturas adequadas à eliminação de resíduos e a avaliação e remediação de terrenos contaminados por práticas industriais inadequadas, são associadas à entrada da geotecnia na área ambiental (Shackelford, 2005 e Rowe, 2015).

Nos aterros de resíduos, entre os primeiros avanços com relevância, estão, o desenvolvimento de especificações para a construção de barreiras argilosas compactadas, a demonstração da compatibilidade a longo prazo entre os materiais argilosos e os lixiviados e a proteção das barreiras

0379-9522 – Geotecnia nº 143 – julho/julio/july 2018 – pp. 55-83
http://dx.doi.org/10.24849/j.geot.2018.143.04 – © 2018 Sociedade Portuguesa de Geotecnia

argilosas compactadas a fenómenos de dessecação, quer durante quer após a fase de execução. Estas preocupações técnicas foram responsáveis pelo aparecimento das barreiras compósitas, com a colocação de materiais conhecidos à data como poliméricos, as geomembranas atuais, em contacto direto com o topo da camada argilosa compactada (Shackelford, 2005). Na década de 90, começou a haver preocupação com a compressibilidade dos resíduos sólidos urbanos (RSU) e com a previsão dos assentamentos destes resíduos, e aumentou o interesse pela utilização de um grande número de geossintéticos, como os geotêxteis e as geogrelhas. Por esta altura, também se assistiu à introdução no mercado dos geocompósitos bentoníticos (Shackelford, 2005 e Rowe, 2015). Com o domínio das técnicas construtivas da cobertura final e do confinamento basal dos aterros de resíduos, os principais esforços da geotecnia ambiental foram direcionados para o melhoramento dos aspetos associados com os sistemas de recolha e remoção dos lixiviados, a previsão dos assentamentos dos RSU, e o conhecimento das propriedades e da durabilidade a longo-prazo dos geossintéticos (Shackelford, 2005).

Os esforços dos geotécnicos para tratar os problemas relacionados com a avaliação e a remediação de locais contaminados envolveram a cooperação com outras áreas científicas, como a geologia, a química e a engenharia do ambiente (Shackelford, 2005). Os geotécnicos desempenharam um papel fundamental no desenvolvimento e na implementação dos métodos e das tecnologias de remediação dos solos *in situ*, em resultado dos seus conhecimentos sobre o comportamento dos solos (Shackelford, 2005) e a heterogeneidade e anisotropia do subsolo. Estes conhecimentos foram adquiridos nos projetos de engenharia geotécnica clássicos (Reddy, 2014), onde se utilizam, e desde longa data, as ferramentas de campo necessárias quer à caracterização dos terrenos quer à determinação do tipo e da extensão da área contaminada. A longa experiência dos geotécnicos com o comportamento das argilas, deu o impulso necessário para a considerável investigação nos anos 90 sobre a aplicação dos campos elétricos na remoção dos contaminantes nas argilas (por exemplo, via eletroosmose) (Shackelford, 2005). Os conhecimentos dos geotécnicos sobre técnicas de tratamento dos terrenos, também foram rapidamente adaptados na resolução de problemas ambientais relacionados com a remediação dos solos contaminados, nomeadamente através da estabilização e da solidificação dos contaminantes (por exemplo, via mistura dos solos, a maior ou menor profundidade, com os estabilizadores cimento e cal). Os geotécnicos também têm uma longa história com a utilização de paredes verticais impermeáveis com funções estruturais, facilitando a sua adaptação para a construção de paredes verticais impermeáveis em solo-bentonite ou cimento-bentonite com funções de confinamento *in situ* de águas subterrâneas contaminadas (Shackelford, 2005).

Em particular a partir do início do século XXI, os geotécnicos vêm procurando incorporar os resíduos numa grande variedade de aplicações em engenharia civil, em substituição dos solos e dos agregados ou misturados com estes (Reddy, 2014). O mesmo autor afirma que os esforços iniciais se focaram no escoamento das cinzas volantes, e que a necessidade de minimizar a eliminação dos resíduos nos aterros tem gerado crescente interesse na reutilização e na reciclagem de outros resíduos, tais como as areias de fundição, o vidro, os plásticos, os pneus, e os produtos da combustão do carvão. Vários procedimentos de ensaio padrão têm sido desenvolvidos para utilizar estes materiais em várias aplicações. Os princípios e os métodos utilizados em geotecnia no estudo dos solos vêm-se aplicando, apenas com algumas exceções, aos resíduos, estando os maiores desafios associados, ao estudo da lixiviabilidade e da durabilidade destes novos materiais (Reddy, 2014).

As causas ambientais têm sido o principal motor do surgimento e da implantação da sustentabilidade, como sejam, as relacionadas com as preocupações do aumento do dióxido de carbono na atmosfera e da temperatura global, do acelerado esgotamento dos recursos naturais e dos riscos ambientais e ecológicos (Basu *et al.*, 2013). De acordo com os mesmos autores, a indústria da construção é responsável por cerca de 40 % do consumo global da energia, usa grandes quantidades de matérias-primas primárias todos os anos, contribui para a desertificação, desmatamento e erosão do solo e é causadora da poluição do solo, da água e do ar. A adoção de práticas sustentáveis, pela geotecnia, na conceção e construção das obras, pode contribuir para a

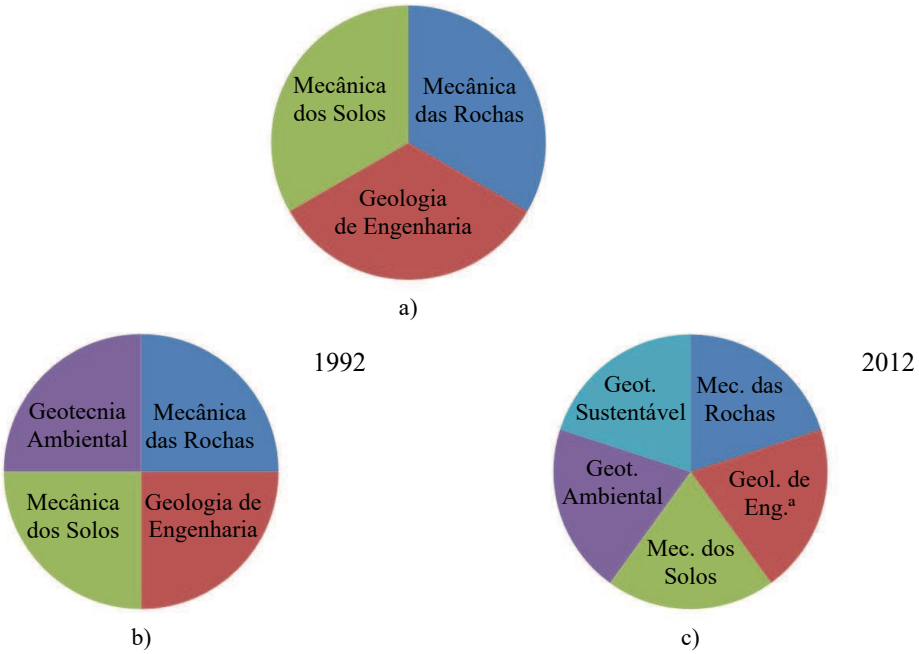


Fig. 1 – Subdisciplinas da Geotecnia.

resolução dos problemas da sustentabilidade do nosso planeta. Refletindo a crescente importância da geotecnia no desenvolvimento sustentável, a Sociedade Internacional de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica criou em 2012, ou seja vinte anos depois do "TC215 - Environmental Geotechnics", o "TC307 - Sustainability in Geotechnical Engineering", e, com isso, uma nova subdisciplina da Geotecnia, a **Geotecnia Sustentável** (Figura 1c).

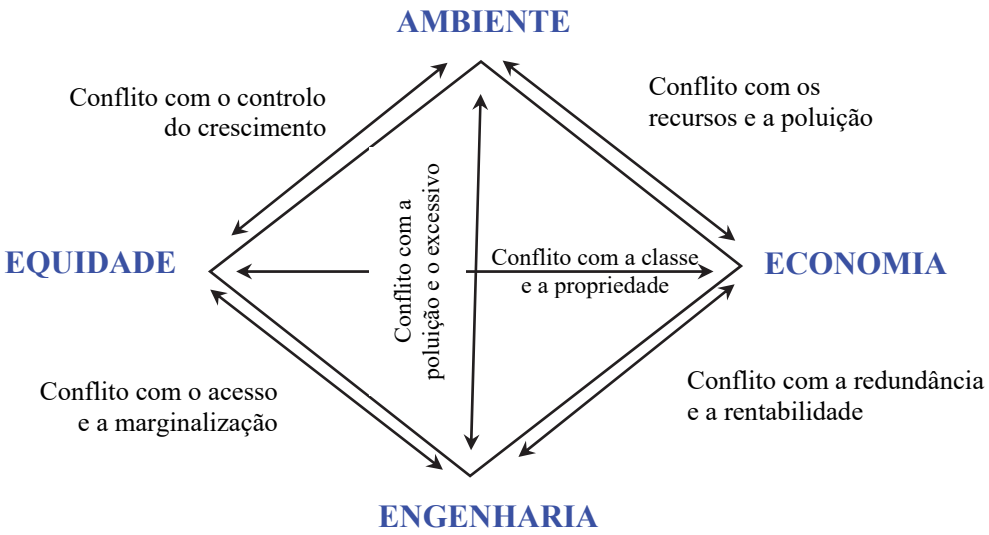


Fig. 2 – Representação dos 4 Es da engenharia sustentável (adaptado de Basu e Puppala, 2015).

0379-9522 – Geotecnia nº 143 – julho/julio/july 2018 – pp. 55-83
http://dx.doi.org/10.24849/j.geot.2018.143.04 – © 2018 Sociedade Portuguesa de Geotecnia

Como no mundo atual, desenvolvimento e engenharia são indissociáveis e a sustentabilidade defende uma abordagem equilibrada que mantenha a harmonia entre o ambiente, a sociedade e a economia, o desenvolvimento sustentável pode ser visto como a interação entre 4 Es – Ambiente (cf. "Environment"), Economia, Equidade e Engenharia (Basu e Puppala, 2015). A Figura 2 mostra os 4 Es da sustentabilidade em engenharia e a relação entre si. Alcançar o equilíbrio entre eles não constitui uma tarefa fácil porque são muitas vezes conflituosos entre si e envolve compensações e otimizações. O conflito mais comum é entre o crescimento económico e a proteção do ambiente, mas também há frequentemente um conflito entre a economia e a equidade, que se manifesta por uma distribuição desigual da riqueza. Sustentabilidade, por conseguinte, representa uma solução de compromisso aceitável para um determinado problema, mas não sendo a melhor solução para todos os Es individualmente.

Vem a propósito mencionar o pensamento expresso por Long (2006). Segundo este, a capacidade para construir estruturas como barragens, autoestradas e sistemas de fornecimento de água seguros foi um imperativo da engenharia do último século, mas talvez o mais importante imperativo para este século seja a sustentabilidade.

3 – ALTERAÇÕES CLIMÁTICAS

Existe atualmente um consenso cada vez mais alargado sobre duas questões fundamentais para o futuro da Terra e das populações que nela habitam: a) o clima está a mudar por razões que se prendem com as atividades humanas; e b) as mudanças climáticas produzem efeitos, nomeadamente, os associados ao aumento dos desastres naturais, sobretudo, os de natureza hidrológica (Cardoso, 2015). É importante, mesmo assim, prosseguir e incrementar a sensibilização dos cidadãos e dos decisores, políticos e técnicos, para o problema, de modo a ocorrerem modificações significativas nos comportamentos e a serem aceites as medidas necessárias de mitigação e de adaptação às alterações climáticas.

O Global Risk Report 2016 (WEF, 2016), por exemplo, considerou as Alterações Climáticas como o risco com maior impacte potencial para os próximos 10 anos. Desde que o relatório começou a ser publicado, em 2006, esta é a primeira vez que um risco ambiental ficou no topo da classificação. Os 750 especialistas que avaliaram 29 riscos globais por impacte e probabilidade na próxima década, consideraram que as alterações climáticas têm um maior potencial de danos que as armas de destruição em massa (2º lugar), as crises de água (3º lugar), a migração involuntária em grande escala (4º lugar) e o choque grave do preço da energia (5º lugar).

A temperatura média do globo está atualmente cerca de 0,8 °C acima da correspondente aos níveis pré-industriais (1850-1900), tendo o aquecimento mais pronunciado ocorrido nas últimas 3 décadas (Figura 3). A temperatura do território terrestre europeu durante a última década (2002-2011) foi, em média, 1,3 C superior à do nível pré-industrial, o que significa um aumento mais rápido que o da média mundial (Comissão Europeia, 2014).

Antes do Acordo de Paris de 2015 sobre o clima, o objetivo era a temperatura média global não aumentar, em relação ao período pré-industrial, mais que 2 ºC até 2100. Após a Cimeira de Paris, o compromisso é manter o aumento da temperatura média global inferior a 2 ºC em relação à dos níveis pré-industriais e prosseguir com os esforços para limitar o aumento da temperatura a 1,5 ºC. Reconheceu-se que esta alteração reduz significativamente os riscos e os impactes das alterações climáticas. O Acordo de Paris já reuniu as condições para entrar em vigor em 2020, uma vez que pelo menos 55 países representando pelo menos 55 % das emissões de Gases com Efeito de Estufa (GEE) depositaram os respetivos instrumentos de ratificação, aceitação, aprovação ou acessão. A aprovação pelo Parlamento Europeu teve lugar a 4 de outubro de 2016.

http://dx.doi.org/10.24849/j.geot.2018.143.04 – © 2018 Sociedade Portuguesa de Geotecnia

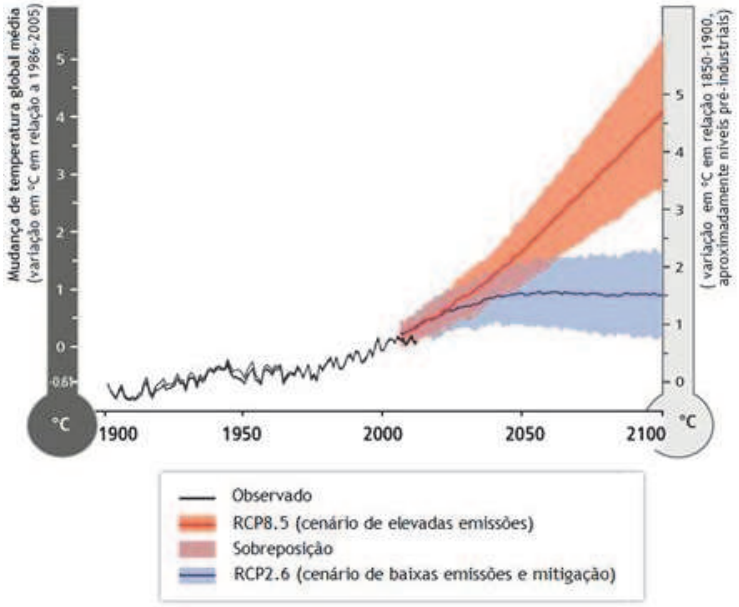
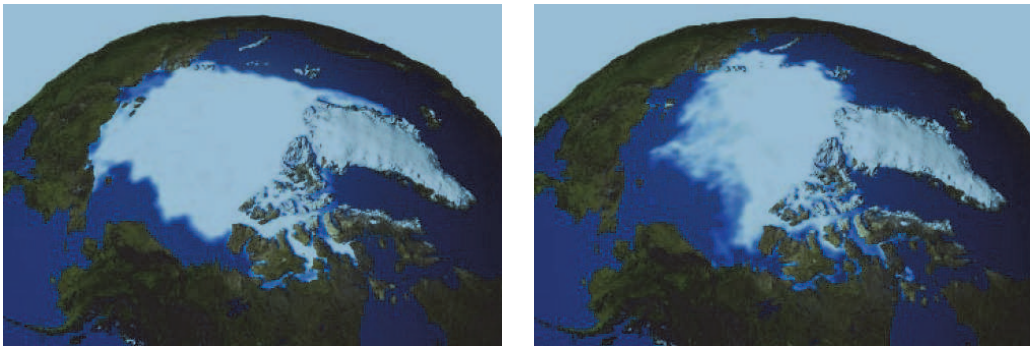


Fig. 3 – Alteração da temperatura média do globo num cenário de baixas emissões e mitigação ou de elevadas emissões (adaptado de IPCC, 2014a).

A definição do limite máximo do aumento de 2 ºC até 2100, em relação à época pré-industrial, deve-se à capacidade de adaptação ficar comprometida acima desse valor. Nas condições atuais, caso não sejam assumidos os compromissos acordados, prevê-se que a temperatura aumente pelo menos 2,6 ºC até 2100 (Figura 3). Para o cenário de elevadas emissões, as previsões para a subida da temperatura estão entre os 3,2 ºC e os 5,4 ºC (Figura 3).

Os cientistas calculam que devido ao aquecimento global, entre os anos 1870 e 2000, o nível do mar tenha subido 18 cm, sobretudo nos últimos 20 anos (mais de 6 cm), e que até 2100 suba entre 26 a 82 cm. O mesmo fenómeno foi responsável pela perda de cerca de 13 % do gelo existente no Ártico desde 1979. A Figura 4 mostra a diferença entre a superfície da calote polar no Ártico em setembro de 1979 e 24 anos depois.



Mar gelado no Ártico, em setembro de 1979 Mar gelado no Ártico, em setembro de 2003

Fig. 4 – Imagens de satélite comparando as áreas de mar gelado no Ártico em setembro de 1979 e em setembro de 2003 (ACIA, 2004).

0379-9522 – Geotecnia nº 143 – julho/julio/july 2018 – pp. 55-83
http://dx.doi.org/10.24849/j.geot.2018.143.04 – © 2018 Sociedade Portuguesa de Geotecnia

Notícias recentes nos meios de comunicação portugueses dão conta das consequências dos efeitos do aquecimento global no nosso planeta.

A 19 de agosto de 2016, o jornal diário Diário de Notícias *online* noticiava que na ilha de Shishmaref (Alasca, EUA), de quase 5 km de comprimento e 400 m de largura, a subida do nível da água do mar nos últimos anos levou à deslocalização de 13 casas para o continente americano, devido ao desaparecimento do terreno que as suportava. Em 2015, as autoridades nacionais norte-americanas destinaram oito milhões de dólares para todas as comunidades que fossem afetadas pelas alterações climáticas e pretendessem mudar de local. Porém, só a ilha de Shishmaref necessita de cerca de 200 milhões de dólares e, de acordo com o jornal The Huffington Post, só no Alasca há uma dezena de comunidades nas mesmas condições.

A 28 de setembro de 2016, o jornal diário Jornal de Notícias *online* referia que o exército norte-americano construiu, no ano de 1959, em Camp Century, a 200 km da costa da Gronelândia, na altura condado da Dinamarca, uma "cidade debaixo do gelo", com uma rede de 3 km de túneis, laboratórios, lojas, um hospital, um cinema, uma capela e alojamento para cerca de 200 soldados. O projeto, designado Iceworm, tinha como objetivo testar a viabilidade de instalar uma plataforma de lançamento de mísseis nucleares com capacidade para alcançarem a ex-União Soviética. O projeto foi, porém, abandonado em 1966, devido a problemas estruturais. A movimentação do gelo levava ao colapso dos túneis. A energia necessária ao projeto era fornecida pelo primeiro gerador nuclear móvel do mundo, do qual podem ainda subsistir resíduos tóxicos, para além de outros resíduos, designadamente biológicos e químicos. Devido ao aquecimento global, o gelo, que cobre grande parte da ilha e que se suponha preservar para a eternidade o que ficou do abandonado projeto, derreteu duas vezes mais rápido entre 2003 e 2010 que durante todo o século XX. A exposição do que ainda existe pode ser, por isso, uma questão de tempo.

O combate às alterações climáticas pode ser conseguido de duas formas: através de medidas de mitigação e de medidas de adaptação. As medidas de mitigação estão direcionadas para combater as causas das alterações climáticas, nomeadamente, a emissão de GEE, sendo o dióxido de carbono, CO_2 (que contribui com cerca de 50 %), e o metano, CH_4 (que contribui com cerca de 20 %), os mais importantes. Outros GEE são os clorofluorcarbonetos, CFC, que contribuem com cerca de 15 %, e o óxido nitroso, N_2O, com cerca de 6 %. Outros halocarbonetos, o ozono, O_3, e o vapor de água, H_20, também contribuem para o aquecimento global. A Figura 5 mostra a evolução das concentrações atmosféricas dos GEE: CO_2, CH_4 e N_2O, entre 1850 e 2010. As medidas de adaptação estão direcionadas para a redução dos riscos decorrentes das alterações climáticas, com medidas de salvaguarda, e, com isso, antecipando ou reagindo aos riscos. Ambas as respostas devem ser enquadradas e integradas.

Pelo Acordo de Paris de 2015, a União Europeia (UE) reduzirá 40 % das emissões de GEE até 2030, em comparação com os níveis de 1990, os EUA reduzirão, caso cumpram o acordado, as suas emissões entre 26 % e 28 % até 2025, em comparação com os níveis de 2005, e a China irá implementar medidas para as suas emissões começarem a diminuir a partir de 2030. Até 2050, pretende-se reduzir as emissões de GEE, face aos níveis de 1990, em 80 a 95 % na Europa e 50 a 60 % no mundo.

No âmbito do Protocolo de Quioto de 1997, em vigor desde 2005, Portugal assumiu o compromisso de não ultrapassar as emissões de GEE em 27 % no período 2008 a 2012, face às emissões registadas em 1990. Ao não ultrapassar os 20 %, Portugal cumpriu o compromisso assumido.

Os processos naturais de sequestro do CO_2, como a fotossíntese das plantas e a formação dos esqueletos rígidos dos corais, não são suficientes para compensar a quantidade de CO_2 emitido para a atmosfera, pelo que se vem recorrendo à tecnologia de captura e armazenamento do CO_2 em camadas profundas do subsolo, antes mesmo de ser libertado na atmosfera (Comissão Europeia, 2014). Os conhecimentos adquiridos pelos **geotécnicos** na execução de obras subterrâneas, como sejam os órgãos de segurança e de exploração das barragens ou o armazenamento de bens de consumo, são uma vantagem para a sua participação nas obras de armazenagem subterrânea de CO_2.

http://dx.doi.org/10.24849/j.geot.2018.143.04 – © 2018 Sociedade Portuguesa de Geotecnia

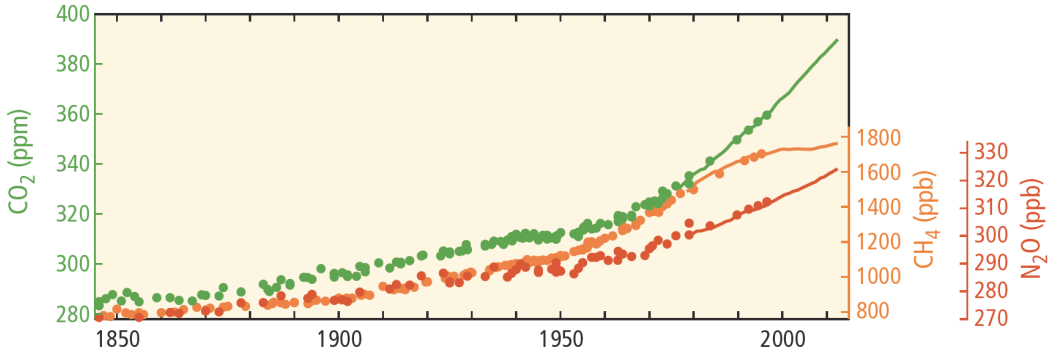


Fig. 5 – Concentração atmosférica de CO_2, CH_4 e N_2O na atmosfera, entre 1850 e 2010 (IPCC, 2014b).

Os **geotécnicos** podem contribuir igualmente para a redução das emissões dos GEE, substituindo as fontes de energia derivadas dos combustíveis fósseis, por fontes de energia renováveis, como a geotermia e as geoestruturas energéticas ou estruturas termoativas, e reduzindo os consumos de energia na execução das obras. Todas as medidas que possam substituir as fontes de energia convencionais pelas renováveis são muito relevantes, atendendo à previsão de aumento acentuado da procura de energia nos próximos 25 anos, quer devido ao desenvolvimento económico quer ao crescimento da população, que passará dos 7,3 mil milhões atuais, para os 9,5 mil milhões em 2050 (Cardoso, 2015; e 2016).

Independentemente do êxito que as medidas de mitigação possam vir a revelar, o impacte das alterações climáticas vai intensificar-se nas próximas décadas, devido ao efeito retardado das emissões passadas e presentes dos GEE (cada molécula de CO_2 pode-se manter na atmosfera por mais de 100 anos) (Comissão Europeia, 2014), pelo que as medidas de adaptação são indispensáveis na redução dos riscos provenientes das alterações climáticas. A Finlândia terá sido o primeiro país, no contexto internacional, a desenvolver uma estratégia nacional de adaptação às alterações climáticas (DGOTDU, 2010).

Para o conjunto da UE, estima-se que o custo mínimo da não-adaptação às alterações climáticas, num cenário de aumento da temperatura superior a 2 ºC, varie entre 100 mil milhões de euros por ano em 2020 e 250 mil milhões em 2050. Embora não exista nenhuma análise abrangente dos custos da adaptação na UE, estima-se que as medidas adicionais de proteção contra inundações se cifrem em 1,7 mil milhões de euros por ano na década de 2020, valor que aumentará para 3,4 mil milhões na década de 2050. Essas medidas podem ser bastante eficazes, pois, por cada euro gasto na proteção contra inundações, estima-se que se evitem seis euros de custos de danos (Comissão Europeia, 2014).

A nível europeu, a Estratégia da UE para a adaptação às alterações climáticas (Comissão Europeia, 2014) refere que são particularmente vulneráveis a bacia mediterrânica, as zonas montanhosas, as zonas densamente povoadas em leitos de cheia, as zonas costeiras, as regiões ultraperiféricas e o Ártico. O mesmo documento realça que três quartos da população europeia vivem em zonas urbanas, frequentemente mal equipadas para a adaptação e expostas a vagas de calor, inundações e subida dos níveis do mar.

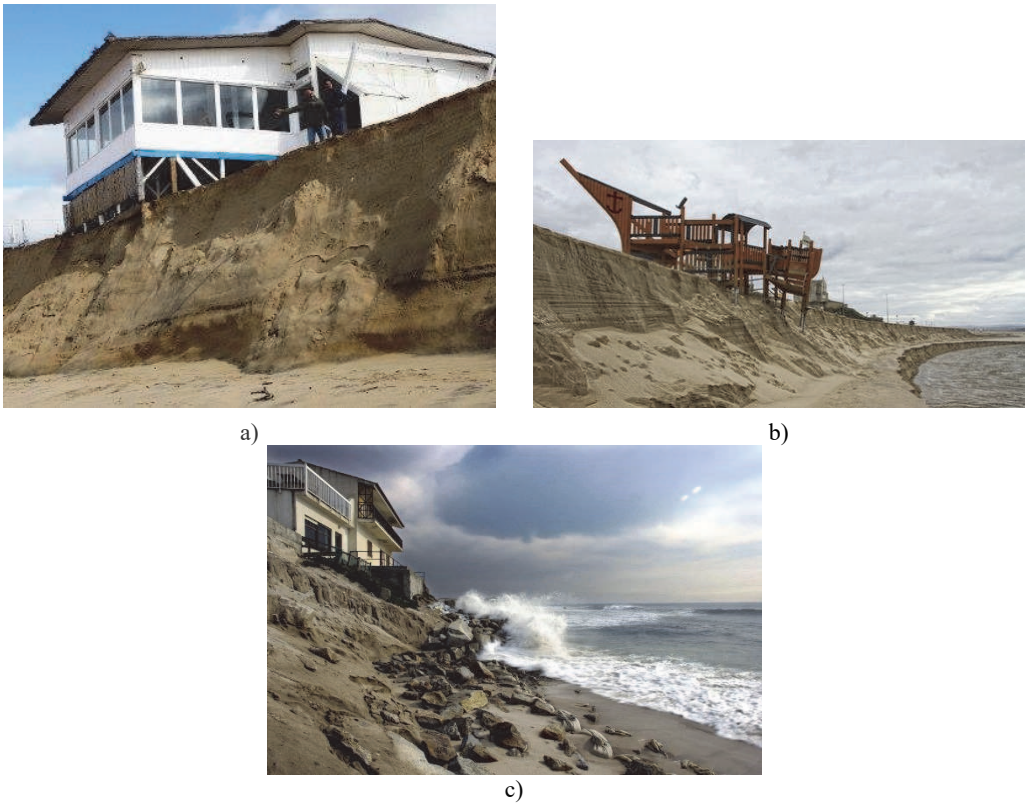
A Estratégia Nacional de Adaptação às Alterações Climáticas (Santos *et al.*, 2015) afirma, em acordo com a generalidade dos estudos científicos mais recentes, que a região do sul da Europa (Portugal, Espanha, Itália, Grécia e Bulgária) é uma das áreas potencialmente mais afetadas pelas alterações climáticas, com potenciais perdas no Produto Interno Bruto (PIB) entre 1,8 % e 3 % (respetivamente, para um cenário de aumento da temperatura média global de 2 ºC e para um cenário de referência onde este aumento pode atingir 3,5 ºC, sem recurso a medidas de mitigação). Estas perdas económicas serão principalmente devidas aos impactes das alterações climáticas

0379-9522 – Geotecnia nº 143 – julho/julio/july 2018 – pp. 55-83
http://dx.doi.org/10.24849/j.geot.2018.143.04 – © 2018 Sociedade Portuguesa de Geotecnia

relacionados com a agricultura, a energia, as cheias e as inundações, os incêndios florestais, a saúde humana, as secas e as zonas costeiras.

No seu conjunto, a zona costeira de Portugal Continental está sujeita a uma série de riscos naturais que resultam de vários tipos de perigosidades, nomeadamente, erosão costeira em 40% da sua extensão (com o consequente recuo da linha de costa e as destruições a ela inerentes), inundação de margens mais frequentes e mais catastróficas das zonas ribeirinhas, galgamento do sistema dunar, salinização de aquíferos e ampliação das cunhas salinas nos estuários, movimentos de massa, maremoto, e degradação ambiental e perda de habitats e espécies (Ribeiro, 2010). Num cenário extremo de elevação do nível do mar estima-se, em relação à situação de referência, uma perda acumulada de território nacional de 0,7 %.

As medidas de reforço na costa portuguesa têm-se revelado infrutíferas nos últimos anos, com o recuo constante da linha de costa, apesar dos gastos elevados que se fazem todos os anos para repor areias e reforçar pontões, esporões e outras obras de defesa costeira. A perda de dezenas de metros para o mar (taxa média de 1,9 mm/ano entre 1920 e 2000 e de 3,6 mm/ano entre 2000 e 2011 (Lacasta e Lacerda, 2013)) é um sinal claro da falta de condições para que se continue a insistir nesse processo, com tendência para se agravar com o expectável aumento do nível médio do mar (LPN, 2014). Entre 1999 e 2007, a linha de costa na Cova do Vapor recuou cerca de 26 m e na Vagueira, entre 1984 e 1990, foram cerca de 16 m (Notícias Magazine, 2017). Apesar disso, o jornal diário Jornal de Notícias, na edição *online* de 16 de outubro de 2016, referia que no Porto se irá gastar 32 milhões de euros, até 2019, para proteger a linha costeira do avanço do mar, e a reposição de areia nas praias da Costa da Caparica custou, só em 2014, 7 milhões de euros, segundo notícia da edição



a) b)

c)

Fig. 6 – Efeitos da erosão na linha de costa portuguesa: a) Costa da Caparica (TVI24 *online*, a 7 de fevereiro de 2008); b) Foz do Arelho (Expresso *online*, a 24 de março de 2010); c) São Bartolomeu do Mar-Esposende (Público *online*, 27 de maio de 2014).

http://dx.doi.org/10.24849/j.geot.2018.143.04 – © 2018 Sociedade Portuguesa de Geotecnia

de 2 de julho de 2014 do jornal diário Público *online*. A Figura 6 mostra exemplos dos efeitos da erosão costeira na Costa da Caparica, na Foz do Arelho e em São Bartolomeu do Mar (Esposende).

Segundo o documento "Alterações climáticas: preparar Portugal", elaborado pela Liga para a Proteção da Natureza (LPN, 2014), a significativa diminuição da chegada de sedimentos ao litoral, contribui decisivamente para a erosão costeira. Segundo a LPN (2014), à foz do Douro chegam apenas 250 mil metros cúbicos de sedimentos, quando nos anos 60 este volume era de 1,8 milhões de metros cúbicos. Como resultado, o abastecimento de areias desde o Douro até à Nazaré não se faz ou é claramente insatisfatório, com recuo da linha de costa vários metros todos os anos, em todas as praias. De forma a alterar esta situação, o desmantelamento e a desativação de barragens são uma tendência crescente nos EUA e no Canadá, onde já foram desmanteladas dezenas de barragens, incluindo barragens de grande dimensão (LPN, 2014).

Dada à reduzida eficácia das medidas de adaptação já executadas ou à sua falta, o recuo da linha costeira portuguesa, por erosão ou submersão marítima, particularmente nos locais que se situam nas cotas mais baixas, virá a afetar, muito provavelmente, um número crescente de pessoas, de habitações, de instalações industriais, de infraestruturas, entre outras, com custos muito elevados à escala de um século. Este aspeto é particularmente importante se atendermos a que 80 % da população portuguesa vive junto à costa e 85 % do PIB é gerado perto do mar (CHANGE, s/d).

Entre as medidas preventivas enunciadas no relatório da Autoridade Nacional de Proteção Civil (Ribeiro, 2010) para a zona costeira portuguesa, os **geotécnicos** terão um papel relevante a desempenhar nos casos em que for necessário manter a linha costeira através de obras de proteção e suporte, ou no desenvolvimento de sistemas de vigilância e alerta relacionados com os escorregamentos de terrenos, em particular em zonas de arribas. Em França, por exemplo, estima-se que só para a região de Languedoc-Roussillon (sul de França), o custo de uma não adaptação aos riscos costeiros seja de várias dezenas de biliões de euros, à escala do século (Galliot *et al.*, 2009).

Nas medidas de proteção contra cheias e inundações também existem diferentes obras em que a participação dos **geotécnicos** é necessária, como sejam, as obras de proteção e de suporte ao longo das margens dos rios e as obras hidráulicas transversais ao leito. Em meio urbano, onde o índice de impermeabilização do solo é muito elevado, o aumento da precipitação e, em consequência, dos episódios de cheias e inundações, por vezes repentinas, também exigem a adoção de medidas de adaptação de natureza geotécnica. Em Lisboa, por exemplo, têm havido vários episódios de inundações nos últimos anos: 23/10/2013, 22/09/2014 e 13/10/2014. Com o Plano Geral de Drenagem de Lisboa (2016-2030) pretende-se responder, entre outras necessidades, ao impacte das alterações climáticas. O custo da obra está estimado em 170 milhões de euros e contempla a construção do túnel Monsanto - Santa Marta - Santa Apolónia, com extensão de cerca de 5 km e diâmetro interno de 5,5 m, e do túnel Chelas - Beato, com extensão de cerca de 1 km e diâmetro de 5,5 m.

A recuperação de uma ilha fluvial na cidade espanhola de Bilbao, com início previsto para 2017 e conclusão ao fim de 30 anos, através da sua reconversão de área industrial em área residencial, também prevê medidas de proteção contra inundações durante a vida útil dos edifícios, para fazer face aos impactes das alterações do clima. As cinco medidas de proteção chave contra inundações são: a) a abertura de um canal, transformando a península numa ilha; b) a construção de um muro de proteção contra inundações; c) a elevação da cota atual do terreno em 1,5 m para a implantação dos novos edifícios; d) a instalação de reservatórios de águas pluviais; e e) a construção de áreas verdes. O custo total das medidas de adaptação é superior a 30 milhões de euros (EEA, 2017).

Na Suécia também foi identificado, pelo Swedish Geotechnical Institute, que as alterações climáticas significarão um maior risco de escorregamento de terrenos no vale do rio Gota ävl e noutras áreas expostas até 2100, se nenhuma ação for tomada (EEA, 2017).

Em particular em áreas ocupadas de grande extensão e situadas a baixa altitude, que seja necessário manter, podem ser necessárias construções novas de grande porte que exijam avanços geotécnicos na caracterização dos terrenos e nas tecnologias construtivas.

0379-9522 – Geotecnia nº 143 – julho/julio/july 2018 – pp. 55-83
http://dx.doi.org/10.24849/j.geot.2018.143.04 – © 2018 Sociedade Portuguesa de Geotecnia

Outra consequência das alterações climáticas nalgumas regiões é a influência no ciclo de retração - expansão dos solos argilosos e na sua amplitude. Em França, estudos já efetuados (Galliot *et al.*, 2009) estimam que, devido ao aumento da frequência das ondas de calor, os danos médios anuais nos alojamentos ocasionados pelos riscos da retração - expansão dos solos argilosos possam ultrapassar um bilião de euros por ano em 2100 (contra cerca de 200 milhões de euros por ano atualmente). Este custo pode ser multiplicado por um fator de quatro a cinco se se verificarem as tendências de urbanização em zonas de risco. Dado o conhecimento dos **geotécnicos** sobre o comportamento das argilas, o seu contributo é fundamental para adotar medidas de adaptação que minimizem os riscos e os custos associados ao fenómeno.

4 – ECONOMIA CIRCULAR

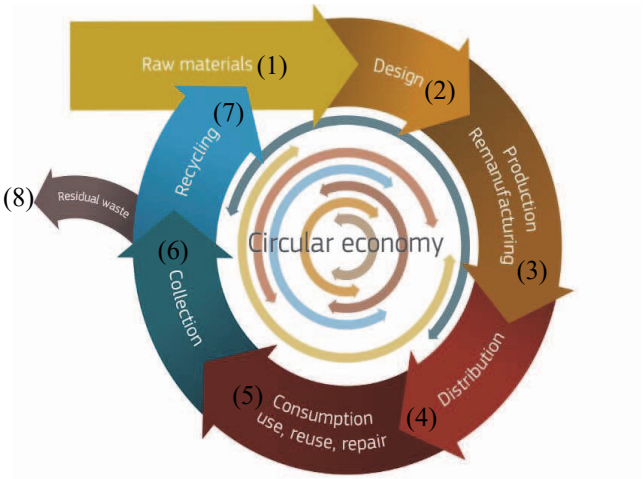
A transição de uma economia baseada num modelo linear (Matérias-primas – Conceção – Produção – Distribuição – Consumo – Resíduos) para uma economia circular é essencial para se atingir a eficiência na utilização dos recursos e um crescimento sustentável: aumento da eficiência energética, reindustrialização sustentável da economia da UE, garantia do acesso às matérias-primas primárias e redução dos impactes ambientais e das emissões de GEE.

Atualmente, apenas cerca de 40 %, em média, dos resíduos produzidos nas habitações europeias são reciclados, perdendo-se anualmente cerca de 600 milhões de toneladas de materiais potencialmente utilizáveis (Furtado, 2016). Por outro lado, estima-se que o uso de recursos globais vai quadruplicar nos próximos 20 anos, se as tendências de consumo atuais nos países industrializados forem adotadas no resto do mundo, e que a capacidade em recursos naturais do nosso planeta e a biocapacidade foram excedidas em quase 30 % em 2005 (Huber-Humer e Lechner, 2011).

A Comissão Europeia (2014a) estima que as melhorias em termos de eficiência na utilização dos recursos em todas as cadeias de valor, reduzirá as necessidades de novos materiais em 17 % a 24 % até 2030 e que uma melhor utilização dos recursos representará uma poupança total potencial de 630 mil milhões de euros por ano para a indústria europeia.

O diagrama da Figura 7 ilustra as principais fases de um modelo de economia circular, o qual permite prolongar a vida útil dos produtos. Na economia circular, a conceção é o ponto de partida no desenvolvimento de qualquer novo produto tendo em vista a possibilidade da sua durabilidade, reutilização, reparação, retransformação e reciclagem.

A hierarquia de gestão dos resíduos em vigor na legislação da UE (prevenção e redução, preparação para a reutilização, reciclagem, outros tipos de valorização e eliminação), introduzida com o objetivo de proteger o ambiente, conservar os recursos, e minimizar a geração de resíduos (Williams, 2015), já permitiu avanços significativos no que respeita à transformação dos resíduos num recurso, contudo, continuamos a gerar por ano, em média, cerca de cinco toneladas de resíduos por pessoa, das quais só pouco mais de um terço é efetivamente reciclado (Comissão Europeia, 2014a) e a haver resultados substancialmente diferentes entre cada Estado-Membro. A Figura 8 mostra haver sete países que apresentam taxas de eliminação em aterro superiores a 78 % (representados por triângulos a negro junto ao vértice inferior esquerdo do triângulo) e sete países com taxas de eliminação em aterro inferiores a 10 % (representados por círculos brancos junto ao lado direito do triângulo) (Bartl, 2015). Com a transição para a economia circular, a deposição em aterro de todos os resíduos recicláveis deixará de ser possível em 2025 e os Estados-Membros devem envidar esforços para eliminar praticamente a deposição em aterro até 2030 (Comissão Europeia, 2014a). Apenas uma percentagem dos resíduos "residuais" (não superior a 5 %) sem qualquer alternativa de tratamento e não passível de valorização poderá ser depositada em aterro.



Legenda: (1) Matérias-primas; (2) Conceção; (3) Produção e retranformação; (4) Distribuição; (5) Consumo, utilização, reutilização e reparação; (6) Recolha; (7) Reciclagem; (8) Produtos residuais.

Fig. 7 – Principais fases de um modelo de economia circular (Comissão Europeia, 2014a).

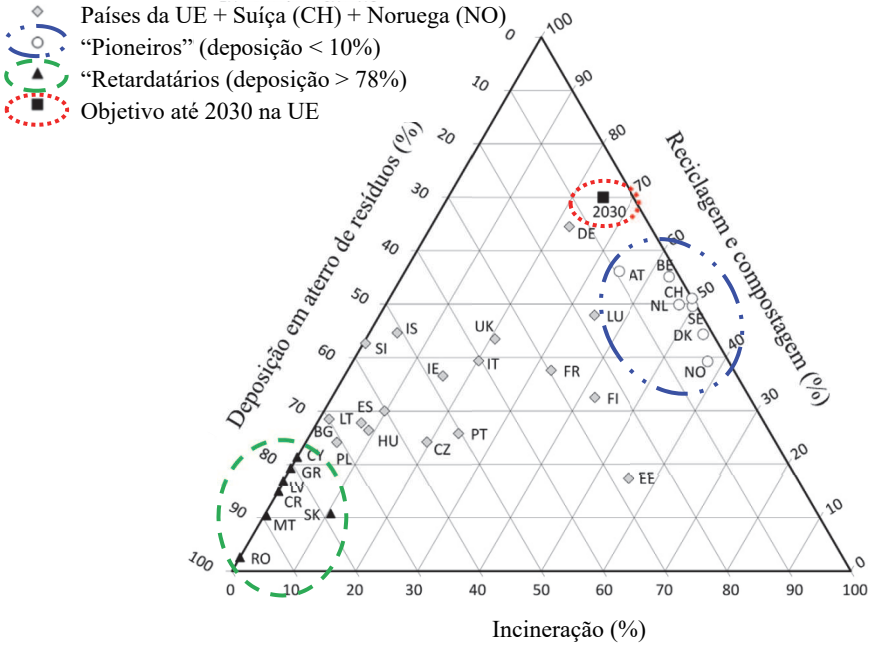


Fig. 8 – Representação das opções de tratamento dos RSU nos países europeus em 2013 e objetivo até 2030 em acordo com a estratégia da economia circular (adaptado de Bartl, 2015).

A transformação dos resíduos num recurso e a promoção de formas sustentáveis de gestão dos resíduos, poderá satisfazer, segundo as estimativas, entre 10 % e 40 % da procura de matérias-primas na UE (Comissão Europeia, 2014a), contribuindo simultaneamente para a realização do objetivo da

0379-9522 – Geotecnia nº 143 – julho/julio/july 2018 – pp. 55-83
http://dx.doi.org/10.24849/j.geot.2018.143.04 – © 2018 Sociedade Portuguesa de Geotecnia

UE de reduzir, até 2030, 40 % das emissões de GEE, o que evitaria gerar 62 megatoneladas de equivalente de CO_2 por ano até 2030.

Em síntese, os benefícios de uma economia circular são (Industria e Ambiente, 2016): a) promover a ecoinovação; b) criar novas oportunidades de negócio, produtos e serviços; c) manter os produtos, materiais e recursos na economia pelo maior período de tempo possível; d) criar novos modelos de negócio; e) reduzir a dependência dos combustíveis fósseis; f) minimizar a produção de resíduos; g) conservar o capital natural; h) diminuir as emissões de carbono; e i) contribuir para o combate às alterações climáticas. Os resultados esperados são (Industria e Ambiente, 2016): a) criação de empregos (180 000 mil diretos na UE até 2030, segundo a Comissão Europeia (2014a)); b) melhoramento da competitividade da economia (poupanças líquidas de 600 mil milhões de euros, ou seja, 8 % do total do seu volume de negócios atual, de acordo com a Comissão Europeia (2015); e c) criação de novos produtos e serviços. Deste modo, as empresas europeias podem ser pioneiras na elaboração de novos produtos e serviços e aproveitar oportunidades de negócio à escala global.

Dada a preocupação com o consumo global dos recursos não renováveis e a progressiva escassez das matérias-primas primárias, associado ao continuado crescimento da população e das economias dos países, em particular dos países subdesenvolvidos, quer a reutilização quer a reciclagem das matérias-primas secundárias num mercado de custo elevado das matérias-primas podem proporcionar grandes desafios e oportunidades para os **geotécnicos**. Com efeito, se a Geotecnia transformar um fluxo de resíduos em matéria-prima para a construção, torna o que seria um débito num crédito e cria um "novo" mercado. O custo associado à eliminação do resíduo (por exemplo, os resíduos de construção e demolição) num aterro de resíduos é convertido num recurso utilizável nas obras geotécnicas (por exemplo, em aterros estruturais, muros de gabiões, estruturas de proteção à erosão ou camadas de drenagem). A análise do ciclo de vida também pode mostrar que a utilização da matéria-prima secundária reduz as emissões dos GEE e permite obter créditos de CO_2 e de energia, que podem representar mais ganhos económicos para o produtor ou para o operador do resíduo e benefícios ambientais. Segundo Gomes Correia *et al.* (2016), o planeamento, o projeto, a construção, a conservação e a exploração das obras de engenharia civil, em geral, e geotécnicas, em particular, passam por uma transformação que as permitirá tornar em infraestruturas mais sustentáveis, prevendo os mesmos autores que a análise do ciclo de vida e a análise do custo do ciclo de vida venham a desempenhar um papel relevante.

A utilização de materiais reciclados nas obras geotécnicas beneficia o ambiente devido à redução das emissões de GEE e do consumo energético, dado requererem menos processamento e mineração. Todavia, devem obedecer a critérios ambientais e de engenharia para as aplicações específicas (Gomes Correia, 2015). Na avaliação da qualidade dos materiais reciclados, os requisitos mínimos a observar são (Winter, 1998, citado por Gomes Correia, 2015):

- não serem um risco para a saúde pública e o ambiente;
- serem quimicamente estáveis no ambiente em que forem usados, podendo alguns requerer tratamento prévio (por exemplo, estabilização e solidificação) e autorização prévia das autoridades competentes;
- serem duráveis (nem suscetíveis à deterioração, nem biodegradáveis);
- apresentarem rigidez, e/ou resistência ao corte, para a utilização final pretendida;
- apresentarem propriedades que não permitam o aparecimento de movimentos inaceitáveis após a construção.

Algumas das principais dificuldades ou constrangimentos da utilização dos resíduos em obras geotécnias são:

- existência de agregados naturais em quantidade e a baixo custo;
- reduzido conhecimento sobre o comportamento em obra;
- desconhecimento sobre o desempenho a longo prazo;
- existência de preocupações ambientais;
- falta de continuidade nos trabalhos de investigação;

- garantia de existência de material em quantidade suficiente;
- não haver recetividade dos donos de obra e dos empreiteiros;
- custo de transporte;
- baixas taxas para a deposição de resíduos em aterro.

Ao longo dos últimos 15 anos, o Departamento de Geotecnia do Laboratório Nacional de Engenharia Civil vem contribuindo para a transformação dos resíduos em matéria-prima, participando em projetos de investigação, na prestação de serviços a diversas entidades e no desenvolvimento de regulamentação. Nos projetos de investigação foram estudadas, entre 2005 e 2009, as Escórias de Aciaria de Forno de Arco Elétrico (Roque *et al.*, 2006, Gomes Correia *et al.*, 2010, Roque *et al.*, 2010, Gomes Correia *et al.*, 2012), em parceria com a Universidade do Minho e o Centro para a Valorização dos Resíduos, tendo por objetivo a sua aplicação nas camadas granulares não ligadas dos pavimentos rodoviários e em aterros estruturais. Entre 2010 e 2014 efetuaram-se trabalhos com Resíduos de Construção e Demolição (Freire *et al.*, 2013, Roque *et al.*, 2015a, Roque *et al.*, 2015b, Roque *et al.*, 2016), em parceria com o Instituto Superior Técnico, tendo em vista a sua utilização nas camadas granulares não ligadas dos pavimentos rodoviários. De 2004 a 2010 foram estudados Finos de Produção de Agregados em Pedreiras de Granito (Roque *et al*., 2008, Frias *et al.*, 2010, Frias *et al.*, 2010a, Guerra *et al.*, 2010), no âmbito de um protocolo com a Mota-Engil, para avaliar a viabilidade da sua aplicação em obras geotécnicas. As prestações de serviços foram realizadas com Lamas do Corte e Polimento de Rochas Ornamentais (Roque *et al.*, 2002), para a Câmara Municipal de Estremoz, em 2000, com o principal objetivo de avaliar a sua utilização na construção das barreiras de confinamento dos aterros de resíduos, e com Lamas das Estações de Tratamento de Água de Abastecimento Público, para a Reciclamas (Roque e Carvalho, 2006), do Grupo Águas de Portugal, entre 2001 e 2003, para avaliar a viabilidade da sua aplicação em obras geotécnicas. Ao nível regulamentar elaboraram-se sete guias técnicos para a reciclagem de resíduos de construção e demolição (LNEC E 471, 2009 a LNEC E 474, 2009 e LNEC E 483, 2016 a LNEC E 485, 2016).

5 – REMEDIAÇÃO DE TERRENOS CONTAMINADOS

A Assembleia Geral das Nações Unidas (NU) proclamou, na sua 68.ª Sessão, a 20 de dezembro de 2013, o ano de 2015 como o Ano Internacional dos Solos e o dia 5 de dezembro como o Dia Mundial do Solo. Com esta iniciativa, e sob o lema "Solos saudáveis para uma vida saudável", as NU pretendem chamar a atenção para a necessidade de se proteger o solo, dado tratar-se de um recurso natural não renovável à escala de tempo da vida humana (são precisos 100 anos para a espessura do solo aumentar entre 1 e 10 cm), e fundamental à sobrevivência da humanidade, como muito bem o resumiu Galopim de Carvalho (2015), ao apresentá-lo como "o chão que nos dá o pão".

Apesar de o solo ser um recurso vital para a humanidade, foi menosprezado durante muito tempo, por ser visto como uma prioridade secundária. Provavelmente por as suas funções serem tidas por certas e consideradas abundantes e a sua degradação passar geralmente despercebida, dado ser um processo lento, que salvo raras exceções, não tem efeitos drásticos imediatos (Roque, 2015a).

Atualmente, 33 % dos solos estão moderada ou gravemente degradados devido sobretudo: a) à erosão (hidráulica ou eólica); b) à diminuição da fração orgânica; c) à compactação (aumento da massa volúmica e diminuição da porosidade); d) à salinização (acumulação de sais solúveis); e) aos deslizamentos de terras; f) à contaminação (é o processo de degradação do solo que suscita mais preocupação quanto às consequências na saúde humana); g) à impermeabilização; h) à desertificação; e i) à acidificação (Comissão Europeia, 2002). É tida por muito importante e urgente a inversão da situação atual e a adoção das ações necessárias à preservação das funções do solo, à prevenção das ameaças e à atenuação dos seus efeitos, bem como à recuperação dos solos degradados. A ameaça à capacidade das gerações futuras satisfazerem as suas necessidades mais elementares é uma realidade, agravada pelas tendências demográficas mundiais atuais e o

0379-9522 – Geotecnia nº 143 – julho/julio/july 2018 – pp. 55-83
http://dx.doi.org/10.24849/j.geot.2018.143.04 – © 2018 Sociedade Portuguesa de Geotecnia

crescimento previsto para a população mundial. Acresce que cerca de 99 % do que comemos provém do solo.

Apesar dos principais processos de degradação ou ameaças a que se encontram expostos os solos terem sido identificados há mais de uma década pela Comissão Europeia e de a sua degradação prosseguir, continua a não haver legislação comunitária específica para a proteção do solo. E não se prevê que exista para breve. Com efeito, a proposta da Comissão Europeia que estabelecia um quadro para a proteção do solo (Comissão Europeia, 2006), foi retirada em maio de 2014, por falta de consenso entre os Estados-Membros (Roque, 2015b). Tal não significa, segundo Payá Pérez e van Liedekerke (2015), que a Comissão esteja menos comprometida com a necessidade de garantir a proteção do solo, como mostra a proposta de programa geral de ação da UE para 2020 (Comissão Europeia, 2012). As disposições existentes na legislação comunitária em domínios como a água, os resíduos, a responsabilidade ambiental, e a prevenção e controlo integrado da poluição, só asseguram a proteção do solo de forma indireta.

Na legislação portuguesa já existe um acervo de diplomas de transposição de diretivas comunitárias que asseguram a proteção do solo de forma indireta, e entrou recentemente em vigor a lei de bases gerais da política pública de solos (DR, 2014). Mantém-se a falta de legislação específica sobre contaminação de solos, apesar de já ter estado em discussão pública, em finais de 2015, o Projeto legislativo (ProSolos) relativo à prevenção da contaminação e remediação dos solos (APA, 2015), esperando-se, por isso, que o diploma legislativo entre brevemente em vigor.

A contaminação dos solos representa um perigo para a saúde pública e para o ambiente (por exemplo, perda da biodiversidade ou impacte ao nível dos recursos naturais), dependendo os seus efeitos do tipo de contaminante, da exposição (intensidade, frequência e duração) e das características biológicas do indivíduo exposto. Na Lista Prioritária das Substâncias Perigosas da Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ATSDR, 2015), construída a partir da conjugação da sua frequência, toxicidade e potencial de exposição humana, e adotada pela Organização Mundial de Saúde, os elementos químicos que ocupam os três primeiros lugares são o arsénio, o chumbo e o mercúrio. Os efeitos destes metais pesados, que não são necessários a nenhuma função dos organismos, são: a neurotoxicidade, os distúrbios hematológicos, os distúrbios renais, a hipertensão arterial, a carcinogenicidade, entre outros (Ruppenthal, 2013).

Mais de 200 anos de industrialização europeia tornaram a contaminação do solo num problema muito generalizado. No último inventário europeu sobre solos contaminados, realizado em 2011-2012 pelo European Soil Data Centre (Panagos *et al.*, 2013), e ao qual foram associados 38 países, estimou-se o número de locais potencialmente contaminados em 1 470 000 e de locais contaminados em 160 000. Apenas 5 países não responderam ao inventário: Bósnia-Herzegovina, Eslovénia, Polónia, Portugal e Turquia, ainda que no que respeita a Portugal, remonte a 1998 o primeiro inventário sobre solos contaminados no país (Jorge, 1998). Um segundo inventário foi apresentado em ECO-SOLOS (2000). Considerando os dados obtidos mais recentemente pelo European Soil Data Centre, estima-se que em Portugal existam cerca de 24 000 locais potencialmente contaminados (em 2002 identificaram-se cerca de 22 000, tendo por base o Catálogo Europeu de Resíduos, atual Lista Europeia de Resíduos, e dados recolhidos no Instituto Nacional de Estatística) e 2600 locais contaminados. Os setores que mais contribuem para a contaminação dos solos, considerando as respostas de 22 países, são os aterros de resíduos (37 %) e as atividades industriais e comerciais (33 %), onde se incluem a extração e refinação do petróleo, as centrais elétricas e a extração mineira. Os principais contaminantes, partindo das respostas de 16 países, são os metais pesados e os óleos minerais, que contribuem, em conjunto, com cerca de 60 % para a contaminação dos solos e 53 % para a contaminação das águas subterrâneas. As Figuras 9 e 10 apresentam estes e todos os restantes setores e contaminantes, respetivamente.

O custo total estimado para a gestão dos solos contaminados nos Estados-Membros da UE situa-se entre 2,4 e 17,3 biliões de euros (Panagos *et al*., 2013), correspondendo, de acordo com o mesmo estudo, a cerca de 6526 milhões de euros por ano. Segundo a Agência Europeia do Ambiente (AEA), em 30 anos foram descontaminados cerca de 80 000 locais na Europa (EEA, 2007).

http://dx.doi.org/10.24849/j.geot.2018.143.04 – © 2018 Sociedade Portuguesa de Geotecnia

Face ao grande número de locais contaminados e aos elevados custos da sua remediação, apresentados no parágrafo anterior, a participação dos **geotécnicos** na remediação dos terrenos contaminados deve contribuir em dois pontos fundamentais: a) redução dos custos; e b) redução dos impactes no ambiente. Para além disso, deve atender ao seguinte princípio: o custo da remediação não deve exceder os benefícios ambientais.

Alguns contributos relevantes que os geotécnicos podem dar para a redução dos custos da remediação, uma pressão constante na Europa e que se justifica plenamente atendendo aos valores indicados mais acima, são: a) promover a utilização das técnicas existentes e o desenvolvimento de outras, com maior relação custo-benefício; b) reduzir o volume de terreno a ser tratado; c) aumentar o volume de terreno tratado a ser reutilizado ou reciclado; e d) promover o uso e o melhoramento das análises de risco.

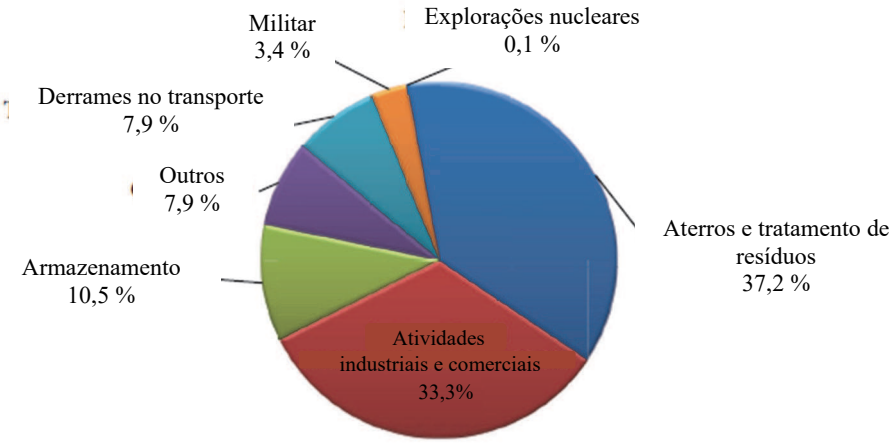
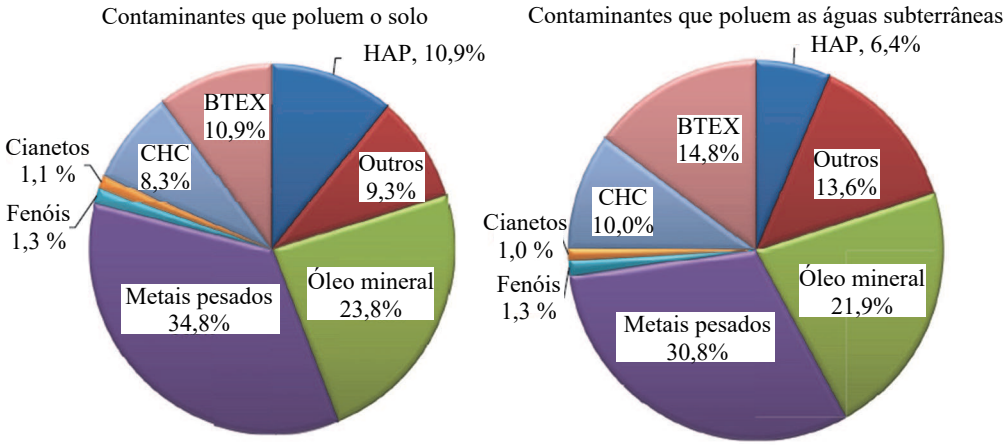


Fig. 9 – Setores que contribuem para a contaminação dos solos na Europa (adaptado de Panagos *et al*., 2013).



Legenda: BTEX - benzeno, tolueno, etilbenzeno e xileno; CHC – Hidrocarbonetos Clorados; HAP – Hidrocarbonetos Aromáticos Policíclicos.

Fig. 10 – Contaminantes que poluem os solos e as águas subterrâneas na Europa (adaptado de Panagos *et al*., 2013).

0379-9522 – Geotecnia nº 143 – julho/julio/july 2018 – pp. 55-83
http://dx.doi.org/10.24849/j.geot.2018.143.04 – © 2018 Sociedade Portuguesa de Geotecnia

A sustentabilidade só raramente tem sido considerada nos projetos de remediação dos terrenos, com eventuais relevantes consequências ao nível dos impactes no ambiente. A abordagem clássica é reduzir as concentrações dos contaminantes até aos níveis prescritos pela regulamentação aplicável. Nesta abordagem, só os impactes e os fatores locais são considerados na seleção das tecnologias de remediação. Impactes holísticos mais amplos são poucas vezes considerados ou são mesmo totalmente negligenciados (Reddy, 2014). Para este autor, a sustentabilidade exige que se considere não só os requisitos de eficácia, de custo e de tempo de remediação, mas também os impactes resultantes, como as emissões de gases com efeito de estufa, a poluição do ar, o uso de energia, o consumo de água e o esgotamento dos recursos naturais, durante todo o ciclo de vida do projeto de remediação.

Segundo Nathanail e Bardos (2004), as técnicas de remediação inicialmente mais aplicadas procediam à escavação-e-aterro, no caso dos solos, e/ou à bombagem-e-tratamento, no caso das águas subterrâneas. Estas técnicas de remediação, ambas *ex-situ*, não são, porém, sustentáveis, por causa dos impactes negativos e dos benefícios ambientais serem neutros ou negativos. Nestes casos têm grande peso o custo do transporte e o consumo de energia. Reddy (2014) refere que atualmente há preferência pelas técnicas de remediação *in-situ*, não só pela sua evolução, mas também por serem mais sustentáveis. A frequência de utilização de diferentes técnicas de remediação em diferentes países europeus é mostrada na Figura 11.

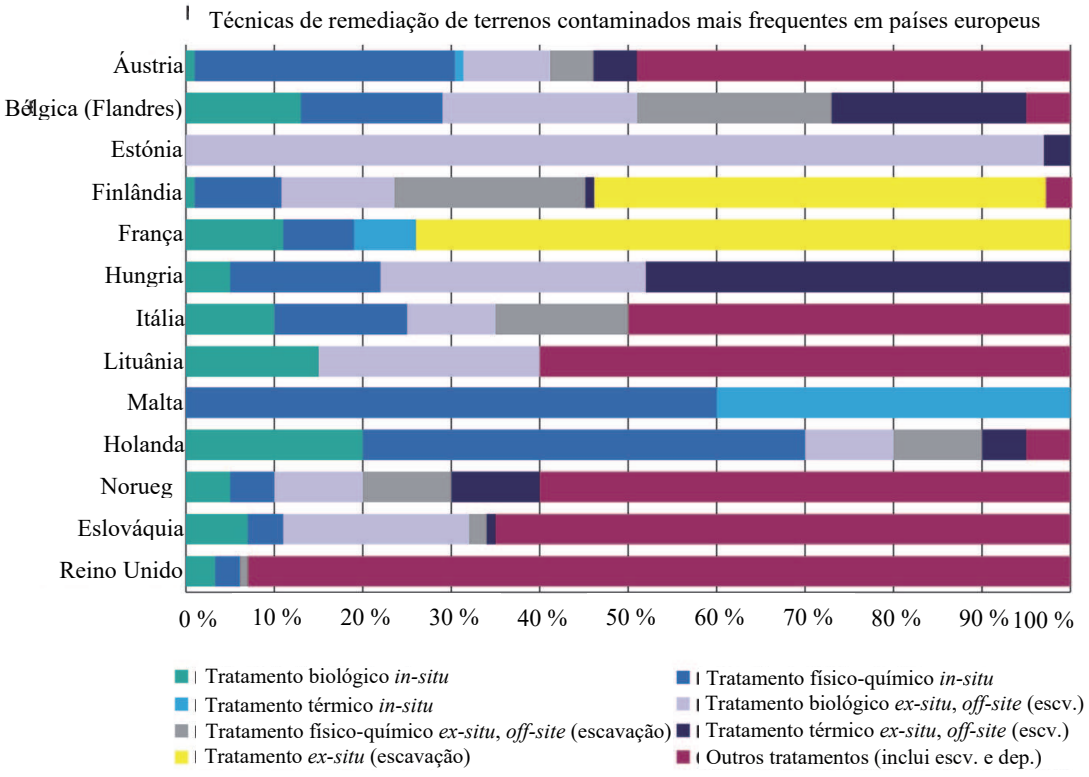


Fig. 11 – Frequência de utilização de diferentes técnicas de remediação em diferentes países europeus, em 2011 (adaptado de van Liedekerke *et al.*, 2014).

http://dx.doi.org/10.24849/j.geot.2018.143.04 – © 2018 Sociedade Portuguesa de Geotecnia

A seleção das tecnologias de remediação dos terrenos contaminados e o seu sucesso dependem de vários fatores (Khan *et al.*, 2004; Silva, 2008), nomeadamente: a) das características do local; b) das características do contaminante; c) do uso do solo; d) do tempo disponível; e) dos conhecimentos da equipa técnica; f) dos custos; e g) da legislação aplicável.

Atendendo a que o sucesso da aplicação das técnicas de remediação depende do conhecimento exaustivo das características do subsolo, onde se incluem as águas subterrâneas, a importância de envolver os **geotécnicos** nos processos de remediação dos terrenos contaminados, resulta, como referido na introdução, dos seus conhecimentos quer sobre o comportamento e as técnicas de tratamento dos solos, quer sobre a heterogeneidade e a anisotropia do subsolo.

Por se entender que a intervenção dos **geotécnicos** na remediação dos solos contaminados é determinante e que as solicitações irão aumentar no futuro, são numerosos os desafios técnicos e as oportunidades que se perspetivam para os geotécnicos nos próximos anos.

6 – SUSTENTABILIDADE E MINERAÇÃO DOS ATERROS DE RESÍDUOS

Apesar dos esforços para se atingir a meta de encaminhamento de zero resíduos para os aterros, haverá sempre uma percentagem de resíduos, ainda que residual (< 5 % a partir de 2030 na UE (Comissão Europeia, 2014a)), que poderá ser depositada em aterro. A continuação da deposição de resíduos em aterros, é, portanto, parte obrigatória numa estratégia integrada de gestão de resíduos de encerramento do ciclo do material. Qualquer outro encaminhamento para estes resíduos residuais poderia resultar na dispersão dos contaminantes no ambiente.

A esmagadora maioria dos aterros existentes foi concebida e construída para os resíduos estarem isolados do meio envolvente, a fim de o protegerem da migração dos lixiviados e do biogás. A recirculação dos lixiviados é por vezes praticada nestes aterros como forma de os armazenar na massa de resíduos e gerir a capacidade de resposta das Estações de Tratamento dos Lixiviados e também de promover a geração de biogás.

Nesta filosofia de eliminação de resíduos em aterro - recolher os resíduos e descartá-los ao mais baixo custo e o mais rápido possível - coloca-se a questão de saber se os sistemas construídos para isolar os resíduos do meio envolvente vão manter um desempenho adequado até a carga poluente dos resíduos não representar um perigo para a saúde pública e para o ambiente.

A partir de uma perspetiva de sustentabilidade, no sentido de não se passarem responsabilidades para as futuras gerações, a conceção dos novos aterros de resíduos devia ser revista. Um desafio para os **geotécnicos** é, portanto, contribuírem para a exploração sustentável dos aterros de resíduos da próxima geração. Nesta nova abordagem, os aterros de resíduos seriam explorados de forma a ser acelerada a (bio)degradação e a lixiviação das substâncias poluentes mobilizáveis, de modo que a carga poluente dos resíduos fique em equilíbrio com o meio envolvente no mais curto intervalo de tempo possível, o qual não deveria ser superior ao período correspondente a aproximadamente uma geração (cerca de 30 anos).

A Figura 12 representa esquematicamente o conceito de exploração de aterros de resíduos segundo os métodos tradicionais (decomposição lenta dos resíduos) e como biorreator anaeróbico (taxa de decomposição dos resíduos mais rápida).

Uma segunda abordagem inovadora nos aterros de resíduos são as operações de exumação ou de mineração, que envolvem a escavação e a recuperação dos resíduos depositados para reciclar os materiais inorgânicos aí existentes. Neste contexto, a gestão hierárquica dos resíduos, onde os aterros eram a última das opções, é substituída por uma gestão sustentável dos resíduos, que se baseia no ciclo de vida útil dos produtos, com o objetivo ideal de criação de desperdício zero.

Nesta nova abordagem, a aceleração da estabilização dos resíduos nos aterros permitiria antecipar as atividades de mineração para a reciclagem do material em depósito.

A mineração dos aterros de resíduos representa as atividades envolvidas na extração e no processamento dos resíduos que foram previamente armazenados em aterros de RSU, entre outros. Segundo Cossu e Williams (2015), a mineração urbana é uma extensão da mineração dos aterros de

0379-9522 – Geotecnia nº 143 – julho/julio/july 2018 – pp. 55-83
http://dx.doi.org/10.24849/j.geot.2018.143.04 – © 2018 Sociedade Portuguesa de Geotecnia

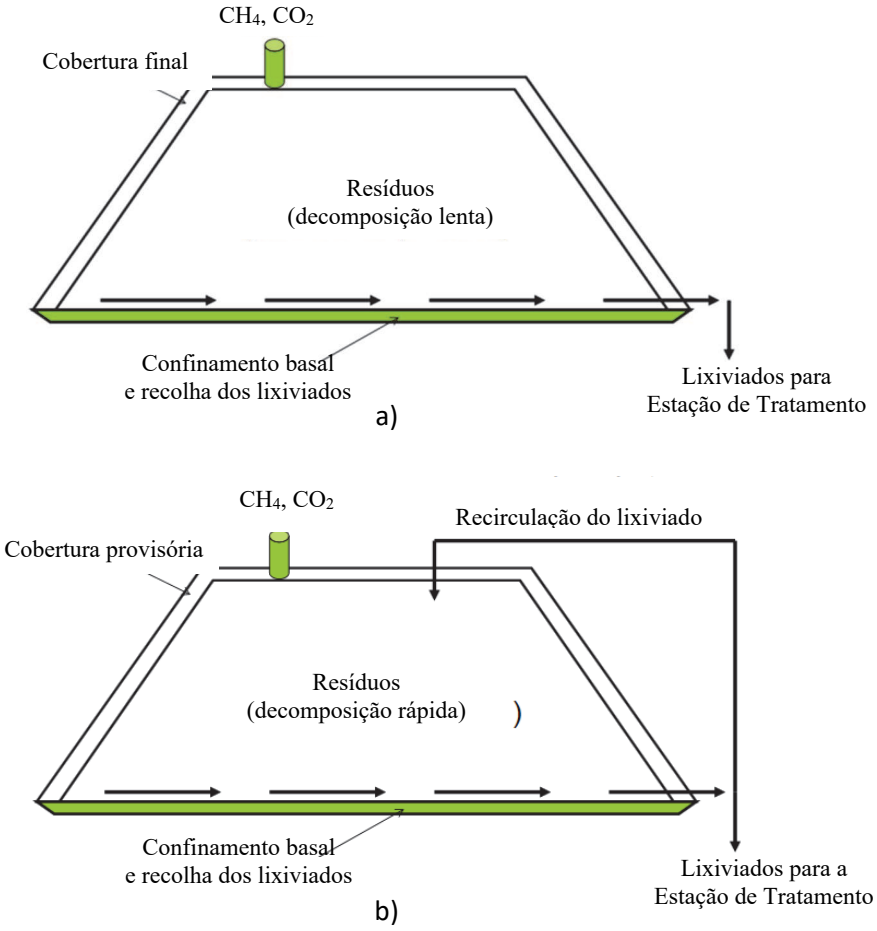


Fig. 12 – a) Aterro de resíduos tradicional, b) aterro de resíduos biorreator anaeróbico (adaptado de Townsend, s/d).

resíduos para recuperação de matérias-primas secundárias com valor transacionável presentes em edifícios, infraestruturas comerciais e industriais, equipamentos eletrónicos, entre outros.

É consensual que a primeira experiência de mineração de aterros de resíduos terá ocorrido em Israel, em 1953, com o principal propósito de aumentar a capacidade da infraestrutura para continuar a receber resíduos (Savage *et al.*, 1993). Porém, só recentemente, no final do século passado, voltou a haver interesse pela mineração dos aterros de resíduos. Apesar disso, a mineração dos aterros de resíduos ainda não é considerada nas opções de gestão de resíduos, por toda a estratégia se focar no cumprimento de metas nacionais e comunitárias, como sejam, a redução de produção de resíduos, a redução da quantidade total de resíduos depositados em aterro, ou o aumento relativamente à preparação para a reutilização e a reciclagem de resíduos.

Atendendo, porém, à procura global atual e esperada de materiais, especialmente de metais - entre 1980 e 2002 houve um aumento de 36% na extração de recursos, tendo a extração de metais aumentado 56% (Behrens *et al.*, 2007), por um lado, e à diminuição dos recursos não renováveis, aumento do preço das matérias-primas e preocupações com o ambiente, por outro, é esperado que os materiais existentes em grandes quantidades nos aterros de resíduos venham a ser considerados um recurso valioso, e, por isso, economicamente viável a sua exploração. Com esta mudança de paradigma, os aterros passariam a ser vistos como um local para armazenamento dos

resíduos a longo prazo e não para a sua deposição final. Apenas a parte dos resíduos armazenados que não fosse reciclável necessitaria de ser reaterrada, representando a recolha de muitos milhões de toneladas de recursos.

Com efeito, estima-se que só na UE os aterros de resíduos contenham de 30 a 50 biliões de metros cúbicos de resíduos (Ratcliffe *et al.*, 2012), e que em 20 hectares de um aterro de resíduos possam existir 220 000 toneladas de aço e 20 000 toneladas de alumínio (Cohen-Rosenthal, 2004). A nível global, a quantidade de cobre depositado nos aterros de resíduos estima-se em 393 milhões de toneladas, comparável ao cobre em uso na tecnosfera (330 milhões de toneladas) (Krook *et al.*, 2012). Nos EUA estima-se que entre 1960 e 2012, mais de 589 milhões de megatoneladas de metais foram depositadas em aterros (USEPA, 2014)

Para além da recuperação de materiais para reciclagem e reintrodução no processo produtivo, contribuindo para os objetivos da economia circular, há ainda a referir as seguintes vantagens da mineração dos aterros de resíduos: a) remoção de uma potencial fonte de contaminação, reduzindo os riscos de contaminação do ambiente, em particular com a reconversão das lixeiras em aterros de resíduos; b) possibilidade de se inspecionarem e repararem os sistemas basais de confinamento e de recolha de lixiviados; c) reutilização do espaço disponibilizado para deposição de novos resíduos, prolongando o período de vida útil do aterro e evitando ou adiando a sua ampliação ou construção de novos aterros; e d) utilização do espaço para outros fins, se não continuar a exploração como aterro de resíduos.

Antes de se considerar a realização de atividades de mineração nos aterros de resíduos, a melhor perspetiva de aproveitamento dos aterros de resíduos após o encerramento era a sua utilização para construção de estruturas recreativas, adaptação a reservas naturais, suporte a centrais de painéis solares, entre outras.

O processo de mineração dos aterros de resíduos pode-se resumir em cinco fases principais: a) caracterização dos resíduos (Figura 13); b) escavação dos resíduos (Figura 14); c) separação entre os materiais transacionáveis e os resíduos e triagem (Figura 15); d) tratamento e gestão dos materiais prejudiciais ao ambiente; e e) deposição dos resíduos residuais.

Um dos principais desafios na recuperação dos recursos minerais existentes nos aterros de resíduos é dispor de meios tecnológicos com capacidade para separarem os materiais transacionáveis dos resíduos depositados, e ainda mais importante, garantir níveis de qualidade aos materiais recuperados.

Os princípios e os métodos que os **geotécnicos** desenvolveram ao longo de várias décadas para aplicar em solos e em rochas, e mais recentemente na deposição de resíduos em aterro, podem, com algumas adaptações e, nalguns casos, com desafios geotécnicos adicionais, virem a serem aplicados

Fig. 13 – Fase de caracterização dos resíduos (Kemler, s/d).

0379-9522 – Geotecnia nº 143 – julho/julio/july 2018 – pp. 55-83
http://dx.doi.org/10.24849/j.geot.2018.143.04 – © 2018 Sociedade Portuguesa de Geotecnia

Fig. 14 – Fase de escavação dos resíduos (Ford *et al.*, 2013).

Fig. 15 – Fase de separação e classificação dos materiais transacionáveis e resíduos (IWCS, 2009).

na mineração dos aterros de resíduos, e, muito particularmente, nas fases de caracterização dos resíduos depositados em aterro, de escavação dos resíduos e de recolocação dos resíduos residuais em aterro.

7 – CONSIDERAÇÕES FINAIS

O exercício da Geotecnia em temas ligados ao ambiente e à sustentabilidade requer, a maioria das vezes, conhecimentos multidisciplinares, tanto nos trabalhos de investigação como na execução das obras e dos projetos respetivos. A abordagem e a plena resolução dos problemas também exigem, quase sempre, colaborações interdisciplinares, em particular, com as ciências ambientais, químicas e biológicas.

As oportunidades atuais e em perspetiva nas duas áreas são muito significativas e colocam desafios relevantes aos geotécnicos.

Este trabalho sintetizou em sete temas algumas das prioridades atuais e futuras da Geotecnia Ambiental e da Geotecnia Sustentável, tendo-se selecionado quatro para avaliação das suas principais oportunidades e desafios: a) Medidas de Mitigação e de Adaptação às Alterações

http://dx.doi.org/10.24849/j.geot.2018.143.04 – © 2018 Sociedade Portuguesa de Geotecnia

Climáticas; b) Transformação de Resíduos em Recurso; c) Remediação de Terrenos Contaminados; e d) Exploração Sustentável e Mineração dos Aterros de Resíduos.

As alterações climáticas estão no topo dos riscos ambientais com maior impacte para o futuro do Terra e dos seus habitantes, com elevados custos económicos, ambientais e sociais, designadamente, em domínios como a agricultura, a energia, as cheias e as inundações, os incêndios florestais, a saúde humana, as secas e as zonas costeiras. Para combater as alterações climáticas são necessárias medidas de mitigação e de adaptação. As oportunidades e os desafios que ambas proporcionam aos geotécnicos foram apresentados em conjunto com o enquadramento do tema. Os contributos dos geotécnicos para as medidas de mitigação foram ilustrados através da participação em estudos para a armazenagem subterrânea do dióxido de carbono, a redução do consumo de energia na execução das obras e a substituição das fontes de energia derivadas dos combustíveis fósseis por fontes de energia renováveis verdes. Ao nível das medidas de adaptação foram salientados os casos em que será necessário envolver os geotécnicos nas obras de manutenção da linha de costa e de proteção das populações a cheias e inundações, sobretudo em meio urbano.

A utilização eficiente dos recursos é essencial ao aumento da eficiência energética, à garantia de acesso às matérias-primas primárias, e à redução dos impactes ambientais e das emissões de gases com efeito de estufa. A transformação dos resíduos num recurso, através da sua reutilização ou reciclagem, num mercado de custo elevado das matérias-primas, foi considerada um meio que proporcionará grandes desafios e oportunidades de trabalho aos geotécnicos. Os conhecimentos adquiridos pelos geotécnicos no estudo dos solos e das rochas são um ponto de partida muito importante na avaliação da viabilidade técnica da utilização dos materiais provenientes do processamento dos resíduos, quer através de ensaios laboratoriais quer de construção de trechos experimentais.

Os terrenos contaminados representam um perigo para a saúde pública e para o ambiente, pelo que a sua recuperação é necessária e urgente. A falta de legislação específica e a atividade industrial sem quaisquer preocupações ambientais ao longo de muitos anos foram ilustradas com a referência ao grande número de locais contaminados existentes na Europa. As oportunidades de trabalho perspetivam-se significativas, mas podem ser dificultadas por serem muito elevados os custos da sua recuperação. Foi salientado, por isso, que a participação dos geotécnicos pode contribuir para a redução dos custos da remediação e para a redução dos seus impactes no ambiente, para o que muito ajudará os seus conhecimentos, quer sobre o comportamento e técnicas de tratamento dos solos, quer sobre o estudo da heterogeneidade e anisotropia do subsolo.

Os aterros de resíduos estão entre as primeiras obras geoambientais a serem executadas e entre as que proporcionaram mais oportunidades de trabalho. Para futuro deverá assistir-se, porém, a uma diminuição acentuada de novas construções deste tipo, dados os esforços em curso, em particular nos países desenvolvidos, para os materiais manterem o valor económico pelo máximo tempo possível. Os milhões de aterros de resíduos existentes em todo o mundo e os biliões de metros cúbicos de resíduos neles depositados, associados à procura e ao custo das matérias-primas no futuro, em especial dos metais, oferece aos geotécnicos a oportunidade e o desafio de participarem nas atividades de mineração dos aterros de resíduos encerrados, em particular nas fases de caracterização, de escavação e de reposição dos resíduos residuais no aterro.

8 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACIA (2004). *Impacts of a warming Artic: Artic climate Impact Assessment (ACIA)*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

APA (2015). *Projeto legislativo relativo à prevenção da contaminação e remediação dos solos (Prosolos)*. Agência Portuguesa do Ambiente, Alfragide.

0379-9522 – Geotecnia nº 143 – julho/julio/july 2018 – pp. 55-83
http://dx.doi.org/10.24849/j.geot.2018.143.04 – © 2018 Sociedade Portuguesa de Geotecnia

ASTDR (2015). *Priority List of Hazardous Substances*. Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ASTDR), Atlanta (USA). Disponível em: http://www.atsdr.cdc.gov/SPL/index.html. Consultado em julho de 2016.

Bartl, A. (2015). *Withdrawal of the circular economy package: A wasted opportunity or a new challenge?* Waste Management, vol. 44, pp. 1-2.

Basu, D.; Puppala, A.J.; Chittoori, B. (2013). *General report of TC 307: Sustainability in geotechnical engineering.* 18th Int. Conf. on Soil Mechanics and Geotech. Engrg.: "Challenges and innovations in geotechnics", Paris, France, pp. 3171-3174.

Basu, D.; Puppala, A.J. (2015). *Sustainability: an emerging discipline within geotechnical engineering.* Proc. 16th European Conf. on Soil Mechanics and Geotech. Engrg.: "Geotechnical engineering for infrastructure and development", Paris, France, pp. 2487-2492.

Behrens, A.; Giljum, S.; Kovanda, J.; Niza, S. (2007). *The material basis of the global economy: worlwide patterns of natural resource extraction and their implications for sustainable resource use policies.* Ecological Economics, vol. 64, nº 2, pp. 444-453.

Benson, C.H. (2016). *The future of environmental geotechnics: creating the new value proposition.* Environmental Geotechnics, vol. 3, nº 2, pp. 61-62.

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, nº 3, pp. 120-136. Disponível em: http://e-gfos.gfos.hr/en/index.php/archive/number-3. Consultado em: julho de 2016.

Breedeveld, J. (2012). *Future position of geotechnical engineering.* Disponível em: http://www.kiviniria.nl/eygec/papers/keynote_breedeveld.pdf. Consultado em: junho de 2016.

Cardoso, A.S. (2015). *Desenvolvimento da geotecnia. Condicionantes gerais e específicas – Parte 1.* Geotecnia, vol. 135, pp. 5-39.

Cardoso, A.S. (2016). *Desenvolvimento da geotecnia. Necessidades infraestruturais e perspetivas genéricas – Parte 2.* Geotecnia, vol. 136, pp. 3-26.

CHANGE (s/d). *Mudanças Climáticas, costeiras e sociais - erosões globais, conceções de risco e soluções sustentáveis em Portugal (Projeto CHANGE).* Instituto de Ciências Sociais da Universidade de Lisboa. Disponível em: http://www.projectochange.ics.ul.pt/home. Consultado em: setembro de 2017.

Chowdhury, R.; Flentje, P. (2007). *Perspectives for the future of geotechnical engineering.* Proc. Int. Conf. on Civil Engrg. for the New Millennium: Opportunities and Challenges, Bengal Engrg. College, Shibpur, India, 20 p. Disponível em: http://ro.uow.edu.au/cgi/viewcontent.cgi?article=1462&context=engpapers. Consultado em: agosto de 2016.

Cohen-Rosenthal, E. (2004). *Making sense out of Industrial Ecology: a framework for analysis and action.* Journal of Cleaner Production, vol. 12, pp. 1111-1123.

Comissão Europeia (2002). *Para uma estratégia temática de protecção do solo.* Comunicação da Comissão ao Parlamento Europeu, ao Conselho, ao Comité Económico e Social Europeu e ao Comité das Regiões, COM(2002) 179 final, Bruxelas, Bélgica. Disponível em: http://eur-lex.europa.eu/legal-content/PT/TXT/PDF/?uri=CELEX:52002DC0179&from=PT. Consultado em: junho de 2016.

Comissão Europeia (2006). *Estabelece um quadro para a proteção do solo e altera a Diretiva 2004/35/CE.* Proposta de Diretiva do Parlamento Europeu e do Conselho, COM(2006) 232 final, Bruxelas, Bélgica. Disponível em: http://eur-lex.europa.eu/legal-content/PT/TXT/PDF/?uri=CELEX:52006PC0232&from=PT. Consultado em: julho de 2016.

Comissão Europeia (2012). *Um programa geral de ação da União para 2020 em matéria de ambiente «Viver bem, dentro das limitações do nosso planeta».* Proposta de Decisão do Parlamento Europeu e do Conselho, COM(2012) 710 final, Bruxelas, Bélgica. Disponível em: http://eur-lex.europa.eu/legal-content/PT/TXT/PDF/?uri=CELEX:52012PC0710&from=PT. Consultado em: abril de 2016.

Comissão Europeia (2014). *Estratégia da UE para a adaptação às alterações climáticas.* Comunicação da Comissão ao Parlamento Europeu, ao Conselho, ao Comité Económico e Social Europeu e ao Comité das Regiões, COM(2013) 216 final, Bruxelas, Bélgica. Disponível em: http://eur-lex.europa.eu/legal-content/PT/TXT/PDF/?uri=CELEX:52013DC0216&from=PT. Consultado em: novembro de 2015.

Comissão Europeia (2014a). *Para uma economia circular: programa para acabar com os resíduos na Europa.* Comunicação da Comissão ao Parlamento Europeu, ao Conselho, ao Comité Económico e Social Europeu e ao Comité das Regiões, COM(2014) 398 final, Bruxelas, Bélgica. Disponível em: http://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:50edd1fd-01ec-11e4-831f-01aa75ed71a1.0021.03/DOC_1&format=PDF. Consultado em: novembro de 2015.

Comissão Europeia (2015). *Pacote da economia circular: perguntas e respostas.* Ficha informativa, Bruxelas, Bélgica. Disponível em: http://europa.eu/rapid/press-release_MEMO-15-6204_pt.htm. Consultado em: março de 2016.

Cossu, R.; Williams, I.D. (2015). *Urban mining: Concepts, terminology, challenges.* Waste Management, vol. 45, pp. 1-3.

DGOTDU (2010). *Análise de estratégias internacionais no âmbito das alterações climáticas (Documento de trabalho).* Direcção-Geral do Ordenamento do Território e Desenvolvimento Urbano (DGOTDU). Disponível em: https://www.apambiente.pt/_zdata/Politicas/AlteracoesClimaticas/Adaptacao/ENAAC/Relat Detalhados/Relat_Setor_ENAAC_Ordenamento_do_Territorio.pdf. Consultado em: setembro de 2017.

DR (2014). *Lei n.º 31/2014, 30 de maio: Lei de bases gerais da política pública de solos, de ordenamento do território e de urbanismo.* Diário da República, 1.ª série - n. 104, INCM, Lisboa, pp. 2988-303.

ECO-SOLOS (2000). Inventário preliminar de áreas potencialmente contaminadas em Portugal. Eco-Solos - Tratamento de Solos e Resíduos, S.A., Projeto co-financiado pela Comunidade Europeia, Fundo de Coesão, IPE/REGIA.

EEA (2007). *Progress in management of contaminated sites.* European Environment Agency. Disponível em: http://www.eea.europa.eu/data-and-maps/indicators/progress-in-management-of-contaminated-sites/progress-in-management-of-contaminated-1. Consultado em: março de 2015.

EEA (2017). *European Climate Adaption Platform (Climate-ADAPT).* European Environment Agency (EEA). Disponível em: http://climate-adapt.eea.europa.eu/countries-regions/countries/sweden. Consultado em: setembro de 2017.

http://dx.doi.org/10.24849/j.geot.2018.143.04 – © 2018 Sociedade Portuguesa de Geotecnia

Ford, S.; Warren, K.; Lorton, C.; Smithers, R.; Read, A.; Hudgins, M. (2013). *Feasibility and viability of landfill mining and reclamation in Scotland.* Final Report. Zero Waste Scotland. Disponível em: http://www.wrap.org.uk/sites/files/wrap/Feasability%20and%20Viability%20of%20LFMR%20Scotland%20190413_0.pdf. Consultado em: outubro de 2017.

Francisca, F.M. (2011). *About the future of geotechnical engineering: a view from South America.* Proc. 14th Pan-American Conf. on Soil Mechanics and Geotech. Engrg.: "Geo-Innovation Addressing Global Challenges", Toronto, Canada, vol. 1, 5 p. https://www.researchgate.net/publication/265165566_About_the_future_of_geotechnical_engineering_a_view_from_South_America. Consultado em: setembro de 2016.

Fratalocchi, E. (2008). *TC 5: Environmental Geotechnics activity.* ISSMGE Bulletin, vol. 2, issue 1, pp. 5-6.

Freire, A.C.; Neves, J.M.; Roque, A.J.; Martins, I.M.; Antunes, M.L.; Faria, G. (2013). *Aplicação de Resíduos de Construção e Demolição (RCD) em camadas granulares de pavimentos rodoviários validada em trecho piloto.* Atas do VII Congresso Rodoviário Português, Lisboa, 10 p.

Frias, A.; Roque, A.J.; Caldeira, L.; Almeida, I.M.; Januário, P.; Coelho, M. (2010). *Optimização de procedimentos construtivos para a construção de um trecho em aterro com finos de pedreiras de granito.* Atas do 12.º Congresso Nacional de Geotecnia, Guimarães, pp. 1961-1971.

Frias, A.; Roque, A.J.; Caldeira, L.; Almeida, I.M.; Januário, P.; Santos, J. (2010a). *Recycling of Portuguese granite quarry fines in geotechnical works: Hydraulic and mechanical characterization.* Proc. 6th Int. Congress on Env. Geotechnics, New Delhi, India, vol. 2, pp. 1150-1155.

Furtado, R. (2016). *A economia circular e as entidades gestoras de fluxos específicos de resíduos.* Industria e Ambiente – Revista de Informação Técnica e Científica, nº 98, pp. 18-20.

Galliot, M.; Monléon, M.; Reysset, B.; Russo, L.; Vergès, P. (2009). *Changement climatique. Coûts des impacts et pistes d'adaptation.* Observatoire National sur les Effets du Réchauffement Climatique (ONERC), La Documentation Française, Paris, France.

Galopim de Carvalho, A.M. (2015). *O chão que nos dá o pão.* De Rerum Natura [Sobre a Natureza das Coisas]. Disponível em: http://dererummundi.blogspot.pt/2015/12/o-chao-que-nos-da-o-pao.html. Consultado em: dezembro de 2015.

Gomes Correia, A.; Roque, A.J.; Fortunato, E.; Ferreira, S.; Cavalheiro, A. (2010). *I&D para a valorização das escórias de aciaria de forno de arco eléctrico em obras geotécnicas.* Atas do 12.º Congresso Nacional de Geotecnia, Guimarães, pp. 1973-1982.

Gomes Correia, A.; Roque, A.J.; Ferreira, S.M.R.; Fortunato, E. (2012). *Case study to promote the use of industrial byproducts: The relevance of performance tests.* Journal of ASTM International, vol. 9, nº 2, pp. 1-18.

Gomes Correia, A. (2015). *Geotechnical engineering for sustainable transportation infrastructure.* Proc. 16th European Conf. on Soil Mechanics and Geotech. Engrg.: "Geotechnical engineering for infrastructure and development", Paris, France, vol. 1, pp. 49-64,.

Gomes Correia, A.; Winter, M.G.; Puppala, A.J. (2016). *A review of sustainable approaches in transport infrastructure geotechnics.* Transportation Geotechnics, vol. 7, pp. 21-28.

Guerra, J.; Roque, A.J.; Almeida, I.M.; Frias, A. (2010). *Avaliação da aplicabilidade de finos de pedreiras de granito tratados com bentonite em obras geoambientais com funções de confinamento hidráulico.* Atas do 12.º Congresso Nacional de Geotecnia, Guimarães, pp. 1983-1992.

Hajra, M.G. (2012). *Sustainability in geotechnical engineering: current and future trends in research, education & professional practice.* Louisiana Civil Engrg. Conf., Kenner, Louisiana. Disponível em: https://pt.scribd.com/document/211682508/Sustainability-in-Geotechnical-Engineering-26795531. Consultado em: julho de 2016.

Huber-Humer, M.; Lechner, P. (2011). *Sustainable landfilling or sustainable society without landfilling?* Waste Management, vol. 31, issue 7, pp. 1427-1428.

Industria e Ambiente (2016). *BCSD lança folheto dedicado à economia circular.* Industria e Ambiente – Revista de Informação Técnica e Científica, nº 98, pp. 38.

IPCC (2014a). *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects.* Contribution of Working Group II to the 5th Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Eds. C.B. Field, V.R. Barros, D.J. Dokken, K.J. Mach, M.D. Mastrandrea, T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea, and L.L. White. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. Disponível em: http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg2/. Consultado em: junho de 2016.

IPCC (2014b). *Climate Change 2014: Synthesis Report.* Contribution of Working Groups I, II and III to the 5th Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Eds. R.K. Pachauri and L.A. Meyer. IPCC, Geneva, Switzerland. Disponível em: http://www.ipcc.ch/report/ar5/syr/. Consultado em: junho de 2016.

IWCS (2009). *Landfill reclamation demonstration project (Perdido Landfill, Escambia County).* Innovative Waste Consulting Services. Disponível em: https://www.dep.state.fl.us/waste/quick_topics/publications/shw/recycling/InnovativeGrants/IGYear9/finalreport/Perdido_Landfill_Mining_Report_final.pdf. Consultado em: outubro de 2017

Jefferis, S.A. (2014). *Environmental and geotechnics: a forward look at the union*. Proc. 7th Int. Cong. on Environmental Geotech., Melbourne, Australia, pp. 1-15.

Jorge, C. (1998). *Os solos contaminados. A situação em Portugal (Estudo Preliminar).* Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Relatório 73/98-NP.

Keaton, J.R. (2010). *Modern trends in engineering geology.* Environmental and Engineering Geology – Encyclopedia of Life Support Systems (EOLSS), vol. 1, 10 p.

Kemler, V. (s/d). *An overview of landfill mining as a resource recovery option for the future.* City of Denton General Manager, Solid Waste & Recycling Services. Disponível em: http://www.recyclingstar.org/wp-content/uploads/2014/10/2_Kemler_Mining_PDF.pdf. Consultado em: outubro de 2017

Khan, F.I.; Husain, T.; Hejazi, R. (2004). *An overview and analysis of site remediation technologies.* Journal of Environmental Management, vol. 71, pp. 95-122.

Krook, J.; Svensson, N.; Eklund, M. (2012). *Landfill mining: A critical review of two decades of research.* Waste Management, vol. 32, pp. 513-520.

http://dx.doi.org/10.24849/j.geot.2018.143.04 – © 2018 Sociedade Portuguesa de Geotecnia

Lacasta, N.; Lacerda, M. (2013). *Estratégia setorial de adaptação aos impactos das alterações climáticas relacionados com os recursos hídricos.* Agência Portuguesa do Ambiente, Alfragide.

LNEC E 471 (2009). *Guia para a utilização de agregados reciclados em betões de ligantes hidráulicos.* Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa.

LNEC E 472 (2009). *Guia para a reciclagem de misturas betuminosas em central.* Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa.

LNEC E 473 (2009). *Guia para a utilização de agregados reciclados em camadas não ligadas de pavimentos.* Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa.

LNEC E 474 (2009). *Guia para a utilização de materiais reciclados provenientes de resíduos de construção e demolição em aterro e em camada de leito de infraestruturas de transporte.* Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa.

LNEC E 483 (2016). *Guia para a utilização de agregados reciclados provenientes de misturas betuminosas recuperadas para camadas não ligadas de pavimentos rodoviários.* Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa.

LNEC E 484 (2016). *Guia para a utilização de materiais provenientes de resíduos de construção e demolição em caminhos rurais e florestais.* Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa.

LNEC E 485 (2016). *Guia para a utilização de materiais provenientes de resíduos de construção e demolição em preenchimento de valas.* Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa.

Long, J.C.S. (2006). *Preface of "Geological and geotechnical engineering in the new millennium. Opportunities for research and technological innovation".* National Research Council. The National Academies Press, Washington, D.C., USA.

LPN (2014). *Alterações climáticas: preparar Portugal.* Liga para a Proteção da Natureza, Lisboa.

Nathanail, C.P.; Bardos, R.P. (2004). *Reclamation of contaminated land.* John Wiley & Sons, Chichester, England.

Notícias Magazine (2017). *O governo quer menos gente nas praias da Caparica.* Global Notícias - Media Group S. A., Magazine Notícias. Disponível em: http://www.noticiasmagazine.pt/2017/caparica-vai-mudar/. Consultado em: setembro de 2017.

NRC (2006). *Geological and geotechnical engineering in the new millennium. Opportunities for research and technological innovation.* National Research Council. The National Academies Press, Washington, D.C., USA.

Panagos, P.; Liedekerke, M.V.; Yigini, Y.; Montanarella, L. (2013). *Contaminated sites in Europe: Review of the current situation based on data collected through a European network.* Journal of Environmental and Public Health, vol. 2013, pp. 1-11.

Payá Pérez, A.B.; van Liedekerke, M. (2015). *The revision of the land and soil indicator LSI003 and the management of contaminated sites in Europe.* Indústria e Ambiente – Revista de Informação Técnica e Científica, nº 92, pp. 18-21.

Ratcliffe, A.; Prent, O.J.; van Vossen, W. (2012). *Feasibility of material recovery from landfills (MFL) in the European Union.* Proc. the ISWA World Waste Congress, Florence, Italy.

Reddy, K.R. (2014). *Evolution of geoenvironmental engineering.* Environmental Geotechnics, vol. 1, nº 3, pp. 1-6.

Reddy, K.R.; Adams, J. (2015). *What does the future hold for geotechnical engineering?* Geostrata, November/December, pp. 16-18.

Ribeiro, J.L. (2010). *Riscos Costeiros – Estratégias de prevenção, mitigação e proteção, no âmbito do planeamento de emergência e do ordenamento do território.* Autoridade Nacional de Proteção Civil, Cadernos Técnicos PRoCiV #15, Oeiras. Disponível em: https://www.apsei.org.pt/media/recursos/documentos-de-outras-entidades/ANPC-Cadernos-Tecnicos-Prociv/CTP15_RiscosCosteiros.pdf. Consultado em: abril de 2016.

Roque, A.J.; Franco, R.; Matos, R.A. (2002). *Estudo da "nata" de mármores como material de construção de barreiras de confinamento aplicadas em Estruturas de Depósito de Resíduos.* 8º Congresso Nacional de Geotecnia, Lisboa, vol. 4, pp. 2717-2734.

Roque, A.J.; Carvalho, M. (2006). *Possibility of using the drinking water sludge as geotechnical material.* Proc. 5th Int. Congress on Env. Geotechnics, Cardiff, Wales/UK, vol. II, pp. 1535-1542.

Roque, A.J.; Gomes Correia, A.; Fortunato, E.; Pardo de Santayana, F.; Castro, F.; Ferreira, S.; Trigo, L. (2006). *A geotecnia na valorização de agregados siderúrgicos inertes reciclados – Um projeto nacional.* Atas (CD-ROM) do 12º Encontro Nacional de Saneamento Básico, Cascais, 16 p.

Roque, A.J.; Andrade, R.; Frias, A.; Caldeira, L.; Vieira, A.; Almeida, I.M.; Fortunato, E. (2008). *Protocolo LNEC/Mota-Engil para uma gestão sustentável dos finos de pedreira gerados na produção de agregados*. Atas do 11.º Congresso Nacional de Geotecnia, Coimbra, 8 p.

Roque, A.J.; Castro, F.; Gomes Correia, A.; Silva, S.; Cavalheiro, A. (2010). *Laboratory and field leaching tests for predicting the environmental impact of Portuguese steel slag.* Proc. 6th Int. Congress on Env. Geotechnics, New Delhi, India, vol. 2, pp. 1166-1171.

Roque, A.J.; Rodrigues, M.; Gomes Correia, A. (2015a). *Technical requirements for the use of C&DW recycled aggregates in municipal and rural roads and trenches.* Proc. XVI ECSMGE Geotechnical Engrg. for Inf. and Development, Edinburgh, Scotland, pp. 2629-2634.

Roque, A.J.; Silva, A.P.; Rodrigues, G.M.; Almeida, R. (2015b). *Utilização de RCD em estruturas de drenagem de obras geotécnicas.* Seminário "Resíduos de Construção e Demolição: Um recurso a valorizar", Porto, pp. 79-90.

Roque, A.J. (2015a). *Solo saudáveis para uma vida saudável.* Industria e Ambiente – Revista de Informação Técnica e Científica, nº 90, pp. 41.

Roque, A.J. (2015b). *Os solos contaminados são um perigo para a saúde pública e o ambiente.* Indústria e Ambiente – Revista de Informação Técnica e Científica, nº 92, pp. 4-5.

Roque, A.J.; Martins, I.M.; Freire, A.C.; Neves, J.M.; Antunes, M.L. (2016). *Assessment of Environmental Hazardous of Construction and Demolition Recycled Materials (C&DRM) from Laboratory and Field Leaching Tests - Application in Road Pavement Layers.* Procedia Engineering, Elsevier Journal, Advances in Transportation Geotechnics III, Edited by António Gomes Correia, vol. 143, pp. 204–211.

Rowe, K.R. (2015). *Reflections on the evolution of geoenvironmental engineering.* Environmental Geotechnics, vol. 2, nº 2, pp. 65-67.

Ruppenthal, J.E. (2013). *Toxicologia.* Colégio Técnico Industrial de Santa Maria, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria (Brasil).

http://dx.doi.org/10.24849/j.geot.2018.143.04 – © 2018 Sociedade Portuguesa de Geotecnia

Santos, E.; Paulino, J.; Santos, M.J. dos; Canaveira, P.; Baptista, P.; Lourenço, T.C. (2015). *Estratégia Nacional de Adaptação às Alterações Climáticas.* Agência Portuguesa do Ambiente, Alfragide. Disponível em: http://sniamb.apambiente.pt/infos/geoportaldocs/Consulta_Publica/DOCS_QEPIC/150515_ENAAC_Consulta_Publica.pdf. Consultado em: julho de 2016.

Savage, G.M.; Gouleke, C.G.; Stein, E.L. (1993). *Landfill mining: past and present.* BioCycle, vol. 34, nº 5, pp. 58-61.

Shackelford, C.D. (2005). *Environmental issues in geotechnical engineering.* Proc. 16th Int. Conf. on Soil Mechanics and Foundation Engrg.: "Geotechnology in Harmony with the Global Environment", Osaka, Japan, pp. 95-122.

Silva, M.S.C.R.P. (2008). *Avaliação e remediação de zona contaminada por hidrocarbonetos. Caso de estudo: "Contaminação num armazém de lubrificantes".* Dissertação de Mestrado, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, Monte da Caparica.

Simpson, B.; Tatsuoka, F. (2008). *Geotechnics: the next 60 years.* Géotechnique, vol. 58, nº 5, pp. 357-368.

Townsend, T. (s/d). *Operating landfills as bioreactors to decompose and stabilize solid waste.* Florida Center for Solid and Hazardous Waste Management. Disponível em: https://clu-in.org/wales/download/townsend_usa_landfills.pdf. Consultado em: outubro de 2017.

Tripathy, S. (2015). *Engineering societal issues – geotechnical and geoenvironmental perspectives.* Environmental Geotechnics, vol. 2, nº 5, pp. 253-254.

USEPA (2014). *Municipal Solid Waste Generation, Recycling and Disposal in the United States: Facts and Figures for 2012.* United States Environmental Protection Agency, Washington, USA. Disponível em: https://archive.epa.gov/epawaste/nonhaz/municipal/web/pdf/2012_msw_fs.pdf. Consultado em: setembro de 2017.

van Liedekerke, M.; Prokop, G.; Rabl-Berger, S.; Kibblewhite, M.; Louwagie, G. (2014). *Progress in the management of contaminated sites in Europe.* Joint Research Centre, European Commission, Ispra, Italy. Disponível em: http://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/bitstream/JRC85913/lbna26376enn.pdf. Consultado em: julho de 2016.

Weinberger, N.; Jörissen, J.; Schippl, J. (2012). *Foresight on environmental technologies: options for the prioritisation of future research funding - lessons learned from the project "Roadmap Environmental Technologies 2020+".* Journal of Cleaner Production, vol. 27, pp. 32-41.

WEF (2016). *The Global Risks Report 2016.* 11th Edition, World Economic Forum, Geneva, Switzerland. Disponível em: http://www3.weforum.org/docs/GRR/WEF_GRR16.pdf. Consultado em: agosto de 2016.

Williams, I.D. (2015). *Forty years of the waste hierarchy.* Waste Management, vol. 40, pp. 1-2.