

A cartografia geológico-geotécnica aplicada à geotecnia. Exemplos de aplicação em Portugal

La cartografía geológico-geotécnica aplicada a la geotecnia. Ejemplos de aplicación en Portugal

The geological-geotechnical cartography applied to geotechnics. Examples of application in Portugal

Pedro Santarém Andrade & Mário Quinta-Ferreira
*Centro de Geociências, DCT, Faculdade de Ciências e Tecnologia da
Universidade de Coimbra, Coimbra, Portugal*
pandrade@dct.uc.pt, mqf@dct.uc.pt

PALAVRAS CHAVE: Cartografia geotécnica, Cartografia geológica, Planeamento, Obras de engenharia, Portugal

PALABRAS CLAVE: Cartografía geotécnica, Cartografía geológica, Planeamiento, Obras de ingeniería, Portugal

KEY WORDS: Geotechnical cartography, Geological cartography, Planning, Engineering works, Portugal

RESUMO

Descrevem-se as principais contribuições da cartografia geológico-geotécnica como base para o planeamento regional e urbano, a ocupação racional dos terrenos e para a construção de estruturas de engenharia quer localizadas, quer lineares. A cartografia geotécnica é de grande importância para o desenvolvimento dos trabalhos de engenharia, proporcionando informações fundamentais acerca dos materiais geológicos constituintes dos terrenos e das propriedades relevantes dos maciços, tendo em vista a sua utilização em obras de engenharia. O conhecimento da realidade do meio físico, proporcionado pela conjugação da cartografia geológica e da cartografia geotécnica, facilita a otimização das opções de ocupação do espaço físico, superficial ou subterrâneo, contribuindo decisivamente para um adequado planeamento e gestão urbana e do território. A elaboração do zonamento geotécnico requer um conhecimento e entendimento aprofundados das propriedades geotécnicas do meio geológico, da sua distribuição nos terrenos e da interação entre o terreno e as obras de engenharia. Os exemplos e casos de obra abordados ilustram a utilização da cartografia geológico-geotécnica e ilustram os benefícios técnicos, económicos, sociais e ambientais resultantes das tomadas de decisão baseadas no conhecimento rigoroso do meio geológico quer para as áreas urbanas quer para a generalidade das obras de engenharia.

RESUMEN

Se describen aquí las principales aportaciones de la cartografía geológico-geotécnica como base para el ordenamiento regional y urbano, la ocupación racional de los terrenos y la construcción de estructuras de ingeniería tanto localizadas como lineales. La cartografía geotécnica es de gran importancia para el desarrollo de los trabajos de ingeniería, proporcionando informaciones fundamentales sobre los materiales geológicos que componen los terrenos y las propiedades relevantes de los macizos, con vista a su utilización en obras de ingeniería. El conocimiento de la realidad del medio físico, proporcionado por la suma de la cartografía geológica y la cartografía geotécnica, facilita la optimización de las opciones de

ocupación del espacio, superficial o subterráneo, contribuyendo decisivamente a una adecuada planificación y gestión urbana del territorio. La elaboración de la zonación geotécnica requiere un conocimiento y una comprensión profunda de las propiedades geotécnicas del medio geológico, de su distribución en los terrenos y de la interacción entre el terreno y las obras de ingeniería. Los ejemplos y casos de obra abordados ilustran la utilización de la cartografía geológico-geotécnica e ilustran los beneficios técnicos, económicos, sociales y ambientales resultantes de las tomas de decisión basadas en el conocimiento riguroso del medio geológico tanto en las áreas urbanas como en la generalidad de las obras de ingeniería.

ABSTRACT

The main contributions of the geological-geotechnical cartography to a correct planning and to the construction of engineering structures are described. Geotechnical cartography is of great importance for the development of engineering works, providing fundamental information about the geological materials and of the relevant proprieties of soil and rock masses. The conjugation of the geological and geotechnical cartography allows to optimize the occupation of both surface or underground space, decisively contributing for an adequate land planning and urban management. The preparation of the geotechnical zoning requires a deep knowledge and understanding of the geotechnical properties of the geological environment and of the interaction between terrain and the engineering works. The examples and case studies dealt with illustrate the use of geological-geotechnical cartography and highlight the technical, economic, social and environmental benefits of decision-making based on a thorough knowledge of the geological environment for urban areas and for the generality of engineering works.

1. INTRODUÇÃO

O desenvolvimento de grandes áreas urbanas e industriais, motivado pelo incremento demográfico e pela necessidade de ocupação de novas áreas, muito beneficia da ponderação de vários fatores geológicos e geotécnicos, a ter em conta para uma correta ocupação e organização do território. O crescimento urbano levou à ocupação progressiva de áreas limítrofes aos núcleos urbanos mais antigos, em que os terrenos, por vezes, possuem características geotécnicas que nem sempre são as mais adequadas aos fins pretendidos. Para a construção de obras de engenharia a caracterização geotécnica dos terrenos requer, muitas vezes, a elaboração prévia de cartografia geológica, a uma escala apropriada, dado que as características geotécnicas são condicionadas pelos fenómenos geológicos e pelas propriedades e evolução dos materiais naturais.

2. A CARTOGRAFIA GEOLÓGICO-GEOTÉCNICA

A cartografia geológica começa com a identificação dos parâmetros fundamentais relacionados com a geologia, nomeadamente os aspetos mineralógicos, estratigráficos, sedimentológicos, estruturais e de alteração, sendo os geólogos os profissionais com formação mais adequada à realização de cartografia geológica.

No entanto a passagem da cartografia geológica para a cartografia geotécnica implica uma sensibilidade e formação técnica direcionada para as necessidades específicas das obras de engenharia. Para além dos conhecimentos geológicos tornam-se necessários conhecimentos básicos do comportamento de estruturas de engenharia, bem como da interação entre as estruturas de engenharia e o terreno natural que lhe serve de fundação. Os geólogos de engenharia e os engenheiros geólogos são os profissionais com formação específica adequada à realização de cartografia geotécnica pois possuem simultaneamente os conhecimentos geológicos necessários à cartogra-

fia geológica e os conhecimentos de engenharia necessários à realização da interface com a engenharia ou ainda com a proteção civil. A especificidade da sua formação permite ao geólogo de engenharia e ao engenheiro geólogo selecionar os parâmetros com maior interesse para a cartografia geotécnica. A cartografia geotécnica apesar de se basear na cartografia geológica vai para além desta pois não se limita às características geológicas, requerendo uma avaliação das propriedades de geologia de engenharia das formações geológicas, bem como da sua distribuição espacial, permitindo a elaboração de mapas relacionados com a caracterização dos solos e materiais rochosos e ainda com a definição dos possíveis problemas geológico-geotécnicos que podem causar (IAEG, 2005). Correspondem deste modo a documentos gráficos que resultam da interação da geologia da engenharia com a mecânica de solos e das rochas. As cartas geotécnicas permitem definir parâmetros que interessam à urbanização e ocupação de terrenos, podendo também estar relacionadas com a gestão de risco de áreas já ocupadas, possibilitando a definição de medidas estruturais e não estruturais de mitigação ou anulamento de eventuais problemas. As cartas geotécnicas são constituídas, de um modo geral, por uma carta síntese, uma legenda e um texto explicativo (FREITAS, 2000).

De acordo com alguns autores (VALLEJO *et al.*, 2002; PRICE & DE FREITAS, 2009) as cartas geotécnicas devem apresentar: uma descrição estratigráfica resumida e a idade relativa das unidades geológicas presentes na área cartografada; a constituição litológica das unidades e as estruturas geológicas, as propriedades físicas e geomecânicas dos materiais rochosos e dos solos; a hidrogeologia e geomorfologia, os principais processos dinâmicos, bem como as ações antrópicas. As cartas geotécnicas devem apresentar como suporte a carta geológica, sendo que as estruturas geológicas existentes devem ser consideradas a várias escalas (BARBOSA & BORGES, 1991)

A geologia de engenharia constitui o elemento mais relevante da cartografia geotécnica e tem uma maior importância para as cartas de escala mais reduzida (COELHO, 1980). A cartografia geotécnica nas áreas urbanas apresenta vários fatores condicionantes em relação ao seu conteúdo, pormenor e nível de complexidade. Podendo ser condicionada pela escala e dimensão da área cartografada, finalidade, tipos geológicos existentes e respetivas características geotécnicas, informação disponível, elementos disponíveis e representatividade, bem como pelos métodos de cartografia. Existem aspetos que favorecem a elaboração das cartas geotécnicas, destacando-se a realização de novas obras de engenharia e de reabilitação que envolvam a execução de escavações e de trabalhos de prospeção como sanjas, poços e sondagens que permitem complementar a informação obtida a partir da cartografia geológica existente. Como principal elemento desfavorável, nas áreas urbanas, destaca-se a falta de afloramentos geológicos devido à presença de edifícios e/ou infraestruturas.

A escala a que se realiza a cartografia geológica é muito variável, sendo frequentes as escalas 1:50.000 a 1:25.000 no planeamento municipal, podendo existir cartas 1:200.000 relacionadas com a inventariação de fatores. No entanto a cartografia geotécnica é muitas vezes mais detalhada, designadamente a efetuada para obras de engenharia a escalas pode ser 1:2.500 e 1:1.000 ou mesmo 1:500, como é o caso de fundações de edifícios ou de barragens.

3. A CARTOGRAFIA GEOTÉCNICA E AS CARTAS GEOLÓGICO-GEOTÉCNICAS

A utilização das cartas geotécnicas é alargada, indo desde os projetos de engenharia até à utilização no planeamento do território, que teve o seu início na Alemanha no início do século XX, e um grande desenvolvimento nos países do Leste

da Europa, em particular a partir dos finais da década de 1940 e nos processos de reconstrução de cidades destruídas durante a 2ª Grande Guerra Mundial. Na Europa Ocidental e nos Estados Unidos da América a partir de 1960 teve igualmente uma grande expressão.

A comissão para a Cartografia Geotécnica da IAEG (UNESCO/IAEG, 1976; IAEG, 1979, 1981) procedeu à sistematização dos termos e métodos que se devem utilizar para definir as unidades geotécnicas. A cartografia geotécnica compreende diferentes tipos de cartas como cartas de fatores e de síntese (e.g., cartas de zonamento geotécnico, cartas de aptidão).

As cartas geotécnicas que são utilizadas no planeamento urbano e territorial podem ser distinguidas em cartas relacionadas com a viabilidade de implantação de obras de engenharia (processos tecnológicos) e de suscetibilidade e riscos geológicos (processos do meio físico).

Os métodos da cartografia geotécnica podem ser definidos em dois tipos de abordagem: a de síntese e a analítica. Na abordagem de síntese, o meio físico é assumido como um conjunto de fatores inseparáveis e a sua dinâmica e relação são consideradas de forma integrada. Na abordagem analítica, o meio físico é dividido em vários elementos constituintes os quais são caracterizados e mapeados, sendo posteriormente, reagrupados, de modo a constituir um todo (DINIZ & FREITAS, 2013).

De acordo com VALLEJO *et al.* (2002) nas cartas geotécnicas devem determinar-se as diferentes características e propriedades geotécnicas dos solos e rochas ou das unidades geotécnicas consideradas; proceder à definição das unidades de acordo com propriedades como a resistência, massa volúmica, estado de alteração, deformabilidade e grau de fraturação; estabelecer o zonamento de várias unidades em termos geotécnicos tendo em atenção parâmetros quantitativos.

Nos últimos anos tem-se procedido à utilização de Sistemas de Informação Geográfica (SIG) na realização de cartas geotécnicas. Os SIG permitem um tratamento e uma análise mais rápida dos dados, que pode ser efetuada a diferentes escalas, bem como uma maior facilidade de acesso e de atualização dos dados (SILVA, 2015).

4. RESENHA DA CARTOGRAFIA GEOTÉCNICA NO PLANEAMENTO REGIONAL E URBANO

Em Portugal, a cartografia geotécnica teve o seu início em 1962, num trabalho relacionado com as condicionantes da construção de pavimentos na cidade de Lisboa, desenvolvido pela Câmara Municipal de Lisboa e pelo Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) (COELHO, 1980). Procedeu-se à elaboração de uma carta de escala 1:10.000 e de uma descrição das várias unidades geológicas existentes e dos resultados de ensaios laboratoriais como análises granulométricas, limites de consistência, ensaios Proctor e ensaios California Bearing Ratio (CBR) de vários solos ocorrentes na área do concelho de Lisboa, constituindo elementos para uma futura Carta Geotécnica de Lisboa.

Em 1972 e 1973, respetivamente, nas áreas de Santiago (concelho de Aveiro) e Monte da Caparica (concelho de Almada), efetuaram-se estudos de caracterização geotécnica de modo a permitir um melhor ordenamento e planeamento das áreas urbanas (VEIGA, 2011). Utilizou-se a escala 1:2.000 para a carta geotécnica do Monte de Caparica e esta foi efetuada para o Fundo de Fomento de Habitação, de modo a fornecer de modo pormenorizado dados e informação para um correto planeamento urbanístico. A carta geotécnica foi obtida a partir do reconhecimento de superfície, métodos geofísicos, sondagens mecânicas, ensaios *in situ* e laboratoriais.

Em 1974, o LNEC procedeu à realização da carta geotécnica da área de Sines, para o Gabinete da Área de Sines, e em 1976 efetuou a carta geotécnica do Plano Integrado de Setúbal. A carta geotécnica da área de Sines foi efetuada à escala 1:25.000, a partir da cartografia geológica de escala 1:10.000, a par de um levantamento de campo, realização de prospeção geofísica e de sondagens mecânicas, bem como de ensaios *in situ* e em laboratório. A cartografia geotécnica implicou a realização de uma carta de complexos geotécnicos, esta última definida a partir do agrupamento das diferentes unidades em complexos de propriedades físicas e mecânicas semelhantes, colocando em evidência duas categorias principais: as rochas e os solos. A carta geotécnica do Plano Integrado de Setúbal foi executada para o Fundo de Fomento de Habitação pelo LNEC em 1976 e foi realizada na escala 1:2.000, baseando-se na análise de um conjunto de fatores como: litologia, hidrogeologia, declives; no entanto não se procedeu à realização de uma carta de síntese.

Em 1979 realizou-se a carta geotécnica da área do plano de urbanização localizada na Brandoa-Falagueira (concelho de Lisboa), à escala 1:5.000 e compreendeu as cartas litológica, de declives e de zonamento geotécnico. A litologia constituiu o principal critério de zonamento, para as unidades com as mesmas características geotécnicas (COELHO, 1980).

A cartografia geotécnica relacionada com o planeamento regional e urbano e que foi realizada na área de Setúbal por COELHO (1980) corresponde a um documento de referência na cartografia geotécnica portuguesa. Os resultados compreenderam vários documentos cartográficos de escala 1:25.000 como: carta de unidades geotécnicas, carta geomorfológica, carta hidrogeológica, carta de zonamento em função das limitações à ocupação urbana; e também uma carta de aptidão para fundações da área da cidade de Setúbal à escala 1:5.000. A opção de trabalhar na escala 1:25.000 esteve relacionada com a possibilidade do estudo efetuado se poder incluir nos trabalhos de elaboração de um plano diretor de ordenamento e urbanismo do município de Setúbal. A metodologia utilizada incluiu: a) a colheita de dados, nos quais se destacaram os dados bibliográficos, cartográficos e cobertura aerofotográfica e os registos de sondagens e de ensaios *in situ*; b) o reconhecimento geológico que englobou o estudo fotogeológico, o reconhecimento geológico de superfície que por sua vez abarcou a caracterização dos tipos e complexos litológicos, bem como a prospeção geofísica; c) a realização de ensaios de laboratório em solos e rochas. Estabeleceram-se as unidades geotécnicas de acordo com o princípio litogenético e o sistema de classificação estabelecido pela UNESCO/IAEG (1976). Procedeu-se ao estudo das estruturas geológicas e das características geomorfológicas e hidrogeológicas, da sismicidade e da resposta ao terreno às solicitações sísmicas. Efetuou-se posteriormente o zonamento geotécnico que incluiu o zonamento geral, o zonamento em função das limitações urbanas e a carta de aptidão para fundações da área da cidade de Setúbal.

SARAIVA (1986) na sua dissertação de doutoramento procedeu a um estudo de caracterização geológica e geotécnica de solos e rochas nas áreas adjacentes das albufeiras das barragens da Agueira e do Coiço, apresentando cartas de unidades geotécnicas, de declives, de distribuição dos pontos de água e de zonamento geotécnico. O trabalho realizado envolveu: a) a cartografia das unidades geotécnicas existentes; b) a caracterização geotécnica dos vários estados de alteração das rochas granitóides e metamórficas ocorrentes, bem como dos vários depósitos móveis; c) execução de uma carta de declives; d) determinação do balanço hidrológico sequencial mensal; e) definição da aptidão geotécnica dos materiais rochosos e terrosos; f) realização de uma carta de zonamento geotécnico de modo a permitir uma utilização correta das áreas estudadas em termos de planeamento e de construção de obras de engenharia.

A caracterização geotécnica da parte sudeste da cidade de Coimbra foi realizada por TAVARES (1990), esta área sofreu um considerável incremento urbano na última metade do século XX e início do século XXI. Constatou-se uma maior importância da litologia e da organização geológica relativamente a fatores como as condições geomorfológicas e hidrogeológicas presentes na área de estudo. O trabalho efetuado constituiu um contributo válido para o conhecimento e ordenamento da zona sudeste de Coimbra. TAVARES (1999) procedeu, na sua tese de doutoramento, ao estudo das condicionantes litológicas e geotécnicas com aplicação no ordenamento e planeamento do território no concelho de Coimbra.

A Carta Geotécnica de Lisboa teve outra contribuição importante com a dissertação de doutoramento intitulada “Características geotécnicas dos solos de Lisboa” de ALMEIDA (1991), com ênfase na caracterização dos solos argilosos ocorrentes no concelho de Lisboa e que incluiu 259 relatórios, e resultados de 1914 sondagens e 16051 ensaios Standard Penetration Test (SPT) (ALMEIDA & ALMEIDA, 2002).

O zonamento geotécnico das áreas urbanas e suburbanas de Aveiro foi realizada por GOMES (1992), numa primeira fase do trabalho definiram-se as unidades geotécnicas com base no critério litológico. A definição das zonas geotécnicas teve em atenção vários fatores: geomorfologia, hidrogeologia e geodinâmica e ainda avaliação da suscetibilidade de liquefação, capacidade de carga e suscetibilidade aos assentamentos.

RODRIGUES (1994) elaborou cartografia geotécnica no concelho de Oliveira do Bairro, tendo a caracterização geológica e geotécnica, bem como as cartas de síntese efetuadas possibilitado um melhor planeamento, constituindo um contributo válido na revisão do Plano Diretor Municipal (PDM). Procedeu-se à definição de várias unidades geotécnicas de formações sedimentares, desde complexo aluvionar, passando por arenitos e calcários do Cretácico, até arenitos e argilitos do Triásico. Para as diferentes unidades geotécnicas e a partir de vários ensaios laboratoriais e *in situ*, definiram-se as características de permeabilidade, utilização de materiais e a capacidade de carga.

OLIVEIRA *et al.* (1995) desenvolveram um trabalho de caracterização geológica e geotécnica para a cidade do Porto, enquanto CAVALEIRO (2001) efetuou a dissertação de doutoramento denominada “Condicionantes geotécnicos à expansão do núcleo urbano da Covilhã”. Neste último trabalho foram utilizados vários trabalhos de prospeção geotécnica e ensaios que permitiram, para além da caracterização do maciço, o seu zonamento em nove zonas geotécnicas, que se agruparam em formações superficiais e de substrato. Procedeu igualmente à elaboração de uma carta de aptidão para a construção, de grande importância para o planeamento municipal, tendo especial atenção a possível informação para obras de engenharia. Na carta foram definidas três zonas de características diferenciadas e que apresentam diferentes graus de aptidão para a sua utilização (CAVALEIRO *et al.*, 2014).

VEIGA (2000) apresenta uma dissertação de Mestrado em que, para além de efetuar a cartografia geotécnica da vila da Batalha, procura integrar a aplicação das geociências para o ordenamento, incluindo os geo-recursos. Posteriormente, no trabalho de VEIGA & QUINTA-FERREIRA (2002), abordam especificamente a cartografia geotécnica no planeamento urbano na vila da Batalha (Tabela I e Figura 1).

A cartografia geotécnica tem recorrido à utilização dos SIG, designadamente a partir dos anos 90, em particular com os trabalhos de SILVA (1990, 2000) e DIONÍSIO (1998), e também com os estudos efetuados pela Câmara Municipal de Lisboa, com início em 1999, e que estão relacionados com criação de uma base de dados geotécnicos. O trabalho de SILVA (2000) envolveu o emprego dos SIG, tendo em atenção uma sobreposição da carta de declives, obtida através de um modelo digital de terreno, utilizando-se a carta litológica do concelho de Almada e efetuando-se também uma validação dos resultados obtidos com a carta de inventário de movimentos de

Tabela I. Exemplo de quadro síntese das unidades geotécnicas (VEIGA & QUINTA-FERREIRA, 2002).

Unidades litológicas	Aluviões	Pliocénico	Cretácico	Jurássico
Litologia	Cascalheiras calcárias com níveis arenosos e argilosos	Areias com seixos e grés argilosos	Areias argilosas. Areias com seixo	Arenitos silto-argilosos
Classes de declives	Declives dominantes < 2%	Declives variáveis, atingem maior extensão superficial os depósitos com declives < 5%	Classes de declives dominantes: 5-15% e > 15%	Classes de declives dominantes: 5-15% e > 15%
Condições hidrológicas	Variáveis. Zona mal drenada devido aos fracos declives. Nível freático entre 2.6 e 3m de profundidade	Zona bem drenada devido à permeabilidade elevada	Zona bem drenada devido à permeabilidade elevada	Zona bem drenada devido ao declive favorável. Permeabilidade baixa
Favorabilidade à escavação	Fácil acima do nível freático. Necessidade de rebaixar o nível freático para grandes escavações	Fácil	Fácil	Fácil com meios mecânicos
Permeabilidade quando compactado	Permeáveis a impermeáveis	Permeável a semipermeável	Permeável	Semipermeável a impermeável
Resistência ao corte quando compactado e saturado	Boa a razoável	Excelente a boa	Excelente	Boa
Compressibilidade quando compactado e saturado	Baixa	Muito baixa a desprezável	Desprezável	Muito baixa
Trabalhabilidade como material de construção	Boa a razoável	Excelente a razoável	Excelente	Razoável
Comportamento em aterros	Estabilidade razoável	Estabilidade razoável a elevada	Estabilidade elevada	Estabilidade razoável quando compactado
Aptidão à ocupação urbana – limitações	Pouco favorável. Terrenos com capacidade de carga baixa e nível freático a pequena profundidade. Necessidade de preservar terrenos agrícolas. Pertencem em grande parte à área de proteção ao Mosteiro da Batalha	Terreno muito favorável. Terrenos com capacidade de carga média a elevada permitindo fundações superficiais de qualquer tipo de edificações correntes	Desfavorável nas zonas com declives superiores a 15%	Desfavorável nas zonas com declives superiores a 15%. Terrenos com capacidade de carga média a elevada abaixo da zona superficial. Risco de instabilização dos taludes na sequência de escavações



Figura 1. Zonamento geotécnico da vila da Batalha (VEIGA, 2000) sobreposto a imagem do Google Earth.

terrenos ocorrentes na área de estudo. A partir de 2008, e ainda relacionado com a cidade de Lisboa, desenvolveu-se o projeto de investigação (GeoSIS_Lx) relacionado com a modelação geológica e geotécnica em 3D e permitindo o estabelecimento de uma base de dados que se pode ir atualizando (ALMEIDA *et al.*, 2010).

NARCISO & ANDRADE (2010) e CORREIA *et al.* (2014) desenvolveram classificações de suscetibilidade geotécnica, respetivamente, nas áreas urbanas de Coimbra e Figueira da Foz, a primeira das quais inserida no projeto RISK (Risk Assessment and Management for High-Speed Rail Systems) do programa MIT-Portugal. As classificações permitiram a quantificação dos principais problemas geológicos e geotécnicos das áreas estudadas, bem como a sua expressão cartográfica.

CARVALHO *et al.* (2014) apresentaram uma Carta Geotécnica da região da Guarda baseada no trabalho de CARVALHO (2009). Recorreu-se a uma metodologia que envolveu a realização de ensaios *in situ* e laboratoriais para a caracterização geotécnica de materiais. Com recurso ao SIG elaborou-se a proposta de uma Carta Geotécnica da região da Guarda, à escala 1:100.000, e que abrange uma área de aproximadamente 216.878 ha. Este estudo permitiu a definição de zonas com diferentes graus de aptidão para uso na construção civil e permitir um melhor planeamento regional.

VEIGA (2011) efetuou uma dissertação de doutoramento relacionada com a caracterização geológica e geotécnica de áreas do vale tifónico Parceiros-Leiria, que corresponde a uma estrutura geológica complexa, na qual se localiza área urbana em crescimento de Leiria. O estudo incluiu trabalhos de prospeção relacionados com a execução de obras de engenharia, nos quais se destaca a realização de ensaios *in situ* como SPT, CPTU, DPSH, SCPTU e dissipação nos materiais aluvionares e nos materiais geológicos da Formação de Dagorda, que se localizam inferiormente aos depósitos aluvionares. Procedeu-se também à execução de ensaios laboratoriais de identificação, ensaios edométricos, corte direto e ensaios de compactação. Efetuou-se a comparação dos resultados e o estabelecimento de algumas correlações entre os

resultados de ensaios, bem como a avaliação do potencial de liquefação dos depósitos aluvionares ao longo dos rios Liz e Lena.

Em síntese, podemos dizer que a cartografia geológica e geotécnica para planejamento regional e urbano se destina à caracterização do espaço físico numa dada área, procurando as soluções de ocupação do território mais ajustadas às condições naturais existentes na zona (e.g., UNESCO/IAEG, 1976; COELHO, 1980; ALMEIDA, 1991; FREITAS, 2000; SILVA, 2000; VEIGA, 2000; CAVALEIRO, 2001; VEIGA & QUINTA-FERREIRA, 2002; DINIZ & FREITAS, 2013; CAVALEIRO *et al.*, 2014).

5. A CARTOGRAFIA GEOLÓGICO-GEOTÉCNICA PARA OBRAS DE ENGENHARIA

Quando se pretendem construir obras de engenharia é muitas vezes necessário recorrer a outro tipo de cartografia geotécnica, pois que anteriormente à construção de qualquer obra de dimensões significativas há que realizar um estudo geológico e geotécnico aprofundado de modo a obter todos os aspetos geológicos com implicações para a geotecnia do local (e.g., IAEG, 1979, 1981, 2005; VALLEJO *et al.*, 2002) e efetuar o seu zonamento geotécnico (Figuras 2 e 3) de modo a permitir o dimensionamento e análise do comportamento da estrutura.

As obras lineares tais como estradas, canais e caminhos-de-ferro requerem uma abordagem cartográfica diferenciada das estruturas localizadas (OLIVEIRA, 1979, 2011). A cartografia geológica de uma faixa ao longo da obra a construir vem, por vezes, mostrar que a variabilidade geológica pode ser muito elevada criando uma enorme diversidade de situações geotécnicas que requerem uma abordagem personalizada e específica. Partindo do reconhecimento geológico de superfície efetuam-se trabalhos de prospeção e ensaios progressivamente mais exigentes e demorados, de modo a caracterizar os locais mais críticos ou menos conhecidos. É corrente iniciar os trabalhos com a realização de poços ou sanjas de prospeção, em que se efetua a recolha de amostras para ensaios de laboratório. Em casos específicos recorre-se à realização de prospeção geofísica, principalmente sísmica de refração e também a métodos elétricos, e à realização de sondagens mecânicas. As condicionantes geológicas e geotécnicas que se antecipam para cada local devem orientar a escolha das técnicas de prospeção e ensaio a utilizar, de modo a dar resposta às questões construtivas e de estabilidade fundamentais à realização do projeto e à posterior construção da obra. Cada superfície exposta vai permitir incrementar o rigor cartográfico e melhorar a cartografia geotécnica.

A cartografia geológica e geotécnica, nas obras localizadas, torna-se aparentemente mais fácil de realizar. No entanto a existência de cobertura vegetal, solos superficiais, aterros ou a ausência de afloramentos podem dificultar significativamente esta tarefa. Há assim que realizar trabalhos de prospeção e ensaio adequados ao local e à estrutura a construir.

Um aspeto extremamente condicionante da eficiência de cartografia geológica e geotécnica é o orçamento disponibilizado para a sua realização (CÂNDIDO, 2010). Os trabalhos de campo e a mobilização de pessoas e de equipamentos consomem bastante tempo e recursos que a fase inicial dos trabalhos, por vezes não são bem avaliados nem bem entendidos. A experiência tem demonstrado que as poupanças efetuadas nos estudos geológico-geotécnicos preliminares se pagam muitas dezenas de vezes em obra. Um bom projeto de engenharia, otimizado para as condições locais, dificilmente se consegue realizar com um conhecimento insuficiente das características dos terrenos que servem de suporte à obra.

Nas obras subterrâneas a cartografia geológica e geotécnica realizada em projeto, de um modo geral, não se baseia na observação direta do terreno mas antes na es-

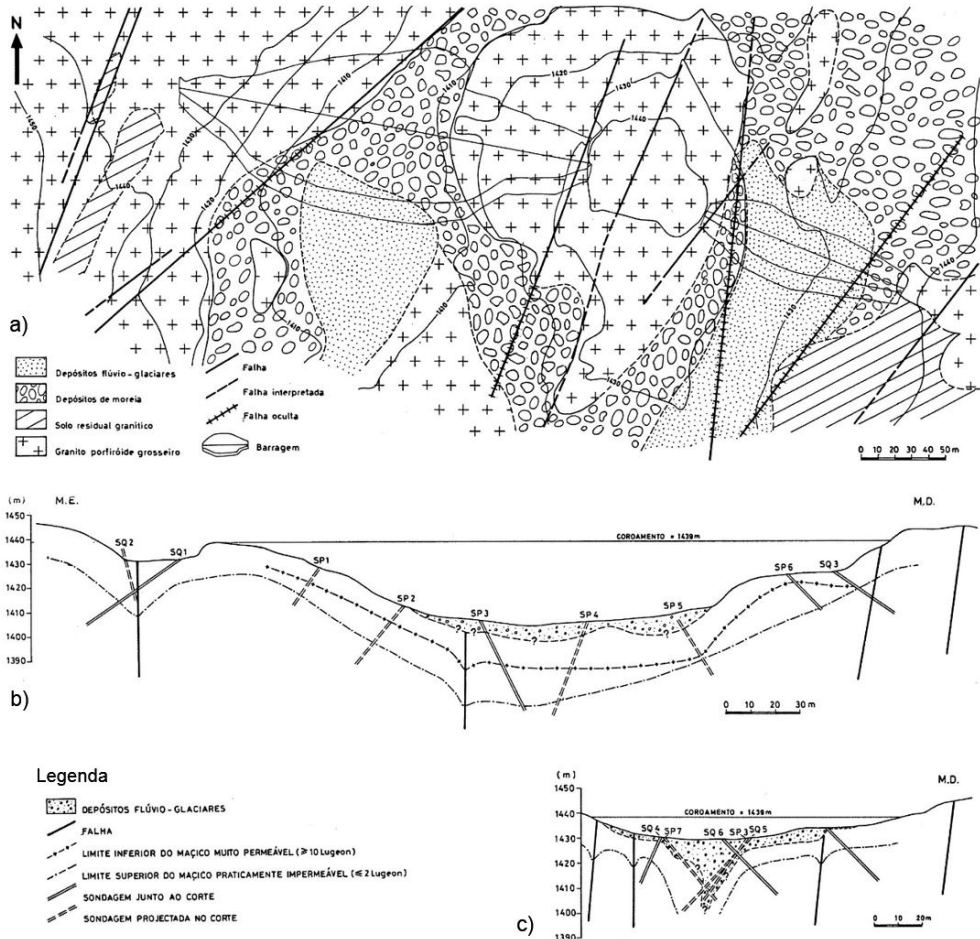


Figura 2. Geologia e geotecnia da Barragem do Lagoacho. a) Cartografia geológica em planta. b) Corte geotécnico segundo o plinto do corpo principal. c) Corte geotécnico segundo o plinto da portela com identificação da garganta subglacial preenchida (QUINTA-FERREIRA, 1995).

timativa das características ao longo do traçado, inferidas a partir do reconhecimento geológico de superfície e dos trabalhos de prospeção geofísica e mecânica realizadas. Só em fase de obra é que se consegue aceder ao terreno exposto durante os trabalhos de escavação da obra subterrânea, o que torna de maior importância efetuar uma cartografia geológica e geotécnica pormenorizada à medida que os trabalhos de escavação prosseguem. Esta necessidade de acompanhamento sistemático traz enormes benefícios ao desenrolar do projeto, pois permite o ajustamento das técnicas de desmonte e de suporte, melhorando a eficiência, a segurança e reduzindo custos (BARBOSA, 2008; CÂNDIDO, 2010). Todo este trabalho é baseado essencialmente na cartografia geológica e geotécnica das superfícies de escavação, pelo que o trabalho do geólogo de engenharia e do engenheiro geólogo é de extrema importância.



Figura 4. Zonamento geotécnico de uma escavação no Mosteiro do Lorvão (modificado de QUINTA-FERREIRA *et al.*, 2015b), baseado no reconhecimento geológico e na extrapolação espacial dos resultados dos ensaios.

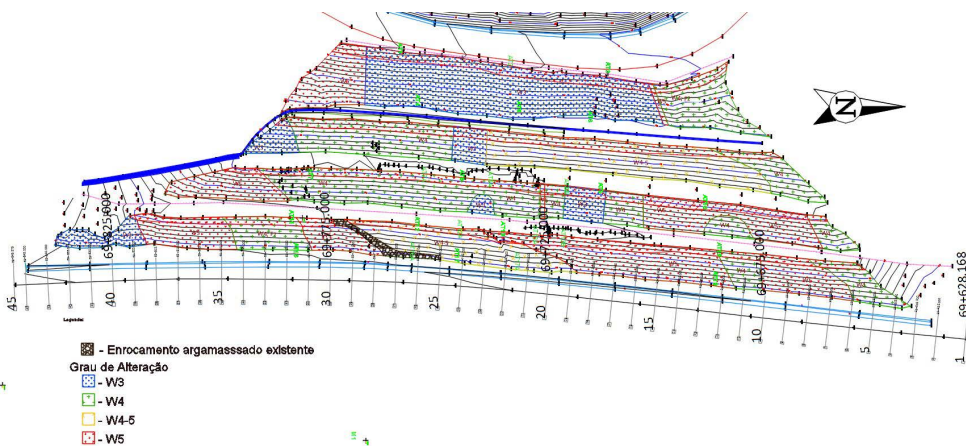


Figura 5. Zonamento geotécnico de um talude em granito com base no grau de alteração (QUINTA-FERREIRA *et al.*, 2015a).

7. NOVAS TÉCNICAS UTILIZADAS EM CARTOGRAFIA GEOLÓGICO-GEOTÉCNICA

Com a rápida evolução tecnológica encontram-se hoje disponíveis equipamentos de controlo remoto que permitem sobrevoar e visualizar os terrenos, obtendo imagens com elevada qualidade e alta resolução, suscetíveis de serem utilizadas no reconhecimento dos terrenos, à semelhança do que é tradicionalmente efetuado com a cartografia georre-geológica (LUCIER *et al.*, 2014; VASUKY *et al.*, 2014), mas que ao obterem imagens ferenciadas permitem a modelação do terreno com rigor topográfico. Se a quantidade e a rapidez de aquisição de informação não é discutível, consideramos que a exatidão da interpretação geológica só é possível com base no conhecimento da geologia local, de modo a permitir associar as imagens às litologias aflorantes, confirmadas pela cartografia geológica de superfície, pelo que a cartografia geológica continua a ser fundamental para validar os modelos interpretativos obtidos por imagens de deteção remota.

8. CONCLUSÕES

Uma boa formação em geologia, sólida e abrangente, é fundamental para a realização de um trabalho de cartografia geológica bem conseguido. A cartografia geotécnica utiliza como base a cartografia geológica, pelo que o trabalho dos geólogos e dos geólogos de engenharia e dos engenheiros geólogos é fundamental e insubstituível no desenvolvimento da sociedade atual. A cartografia geológico-geotécnica tem um papel, cada vez com maior relevo, pois tem aplicação prática aos trabalhos de ordenamento e planeamento do território, à conceção e projeto de pequenas ou grandes obras de engenharia, à estabilidade de taludes e de vertentes, e à minimização de riscos naturais. A escala a escolher para a realização dos trabalhos de cartografia geológica e geotécnica deve ser adequada aos fins pretendidos e ser compatível com o nível de informação requerido em projeto, pelo que deve ser cuidadosamente analisada para cada caso de aplicação.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho é financiado por fundos nacionais através da FCT - Fundação para a Ciência e a Tecnologia, I.P., no âmbito do projeto de investigação UID/Multi/00073/2013 do Centro de Geociências da Universidade de Coimbra.

BIBLIOGRAFIA

- ALMEIDA, I.M. 1991. *Características geotécnicas dos solos de Lisboa*. Tese de Doutoramento. Universidade de Lisboa, 485 p.
- ALMEIDA, I.M. & ALMEIDA, G. 2002. *A utilização de bases de dados na cartografia geotécnica de Lisboa*. *Actas do 8º Congresso Nacional de Geotecnia*, LNEC, Lisboa, pp. 55-62.
- ALMEIDA, I.M., MATILDES, R., TABORDA, R., CARREIRA D., PINTO, C. & JEREMIAS, T. 2010. GeoSIS_Lx a Geoscientific Information System for Lisbon Geotechnical Data Management. *IAEG 2010, Congress, Geologically Active*. WILLIAMS *et al.* Eds., Taylor & Francis Group, London, pp. 1611- 1618.
- BARBOSA, B.P. & BORGES, L. 1991. *Cartografia geotécnica - A Carta Geotécnica do Porto*. *4º Congresso Nacional de Geotecnia*, LNEC, Lisboa, vol. 1: 39-46.
- BARBOSA, P.F.M. 2008. *Avaliação do risco em túneis rodoviários extensos em maciços rochosos*. Tese de Mestrado em Engenharia Civil. Universidade do Porto. <<https://repositorio-aberto.up.pt/bitstream/10216/57895/1/000129794.pdf>> [Consulta: 15-junio-2017].
- CÂNDIDO, M.A.F. 2010. *Contributo para a gestão do risco geotécnico na construção de túneis*. Tese de Mestrado em Engenharia Geológica (Geotecnia). Universidade Nova

- de Lisboa. <https://run.unl.pt/bitstream/10362/5132/1/Candido_2010.pdf> [Consulta: 15-junio-2017]
- CARVALHO, A., CAVALEIRO, V. & ANDRADE-PAIS, L. 2014. *Carta geotécnica da região da Guarda. 14º Congresso Nacional de Geotecnia*, Universidade da Beira Interior, Covilhã, 10 p.
- CAVALEIRO, V.P. 2001. *Condicionantes geotécnicos à expansão do núcleo urbano da Covilhã*. Tese de doutoramento. Universidade da Beira Interior, 330 p.
- CAVALEIRO, V.P., RODRIGUES-CARVALHO, J.A., GOMES, L.M.F., RISCADO, J. & SANTOS, B. 2014. *Carta geotécnica da região da Covilhã. 14º Congresso Nacional de Geotecnia*, Universidade da Beira Interior, Covilhã, 12 p.
- COELHO, A.M.G. 1980. *A Cartografia Geotécnica no planeamento regional e urbano. Experiência de aplicação a região de Setúbal*. Tese apresentada ao concurso para especialista do LNEC. Proc. 54/15/5301, Departamento de Geotecnia/Núcleo de Prospeção, LNEC. Lisboa, 157 p.
- CORREIA, H.V., ANDRADE, P.S. & CALLAPEZ, P.M. 2014. Suscetibilidade Geológica e Geotécnica de formações rochosas localizadas no município da Figueira da Foz. *Comunicações Geológicas*, **101** (Especial III): 1113-1116.
- DINIZ N.C. & FREITAS C.G.L. 2013. Cartografia Geotécnica, In: *Parâmetros para cartografia geotécnica e diretrizes para medidas de intervenção de áreas sujeitas a desastres naturais*. COUTINHO, R.Q. Coord. Ministério das Cidades – Programas Urbanos, Cartografia Geotécnica/ UFPE – GEGEP/DECivil. Documento Técnico. Disponível em: <<http://www.cidades.gov.br/index.php/cartageotecnica/5233.html>>. [Consulta: 15-junio-2017].
- DIONIÃO, S. 1998. *Sistemas de informação geográfica em geologia e geotecnia. Aplicação prática à encosta sul do Casal Ventoso*. Tese de Mestrado. Universidade Nova de Lisboa.
- FREITAS, C.G.L. 2000. *Cartografia geotécnica de planeamento e gestão territorial: proposta teórica e metodológica*. Tese de Doutoramento. Departamento de Geografia, Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 238 p.
- IAEG. 1979. Classification of rocks and soils for engineering geological mapping. Part I: Rock and soil materials. *Bull Int Assoc Eng Geol* **19**: 364-371.
- 1981. Rocks and soils description and classification for engineering geological mapping. *Bull Int Assoc Eng Geol* **24**: 253-274.
- 2005. Special purpose mapping for waste disposal sites. *Bulletin of Engineering Geology and Environment*, IAEG, **64**: 1-54.
- LUCIEER, A., JONG, S.M.D. & TURNER, D. 2014. Mapping landslide displacements using Structure from Motion (SfM) and image correlation of multi-temporal UAV photography. *Progress in Physical Geography*, **38**(1): 97-116.
- NARCISO, J. & ANDRADE, P.S. 2011. *Análise de Suscetibilidade Geotécnica. Livro de Actas do VI Seminário Recursos Geológicos, Ambiente e Ordenamento do Território*, pp. 144-150.
- OLIVEIRA, R. 1979. Engineering geological problems related to the study, design and construction of dams. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, **20**, 4-7.
- 2011. Engineering geological investigations for the foundations of large structures-examples of a concrete dam and a long bridge in Portugal. *Journal of Mountain Science*. doi:10.1007/s11629-011-2090-y.
- OLIVEIRA, R., GOMES, C., NORONHA, F. & BORGES L. 1995. *Características geológicas e geotécnicas da Cidade do Porto (Carta Geotécnica do Porto)*. V Congresso Nacional de Geotecnia. Coimbra, pp. 119-132.
- PRICE, D.G. & DE FREITAS, M.H. 2009. *Engineering geology: principles and practice*. Springer, 450 p.
- QUINTA-FERREIRA, M. 1991. Geologia de engenharia e barragens de enrocamento. Memórias e Notícias. *Publicação do Museu e Laboratório Mineralógico e Geológico da Universidade de Coimbra*, **112**: 299-326.
- 1995. Geological analysis. *Estudos de Engenharia Civil*, **7**(Hydroelectric Power Plants): 107-131. Hydroelectric Power Plants, Lecture notes of the International Course Hydroelectric Power Plants. <http://hdl.handle.net/10316/35286>.

- QUINTA-FERREIRA, M., ANTUNES, A.C., PEDROSA, D. & CARVALHO, J. 2015a. *Nota Técnica – Concessão Beiras Litoral e Alta. Reparação do Talude Localizado ao Pk 069+700 (A25_069+670c R). Fase 1. Realizado para a ASCENDI, em colaboração com TPF PLANEGE, Consultores de Engenharia e Gestão, S.A. (não publicado).*
- QUINTA-FERREIRA, M., TIAGO, P.M., HENRIQUES, J. & ALIJA, S. 2015b. Contribution of engineering geology for the construction of a new museum gallery over an archaeological site at Lorvão Monastery, Portugal. *Journal of Cultural Heritage*, **16**:922-927.
- RODRIGUES, C.M. 1994. *Carta geotécnica do planeamento do concelho de Oliveira de Bairro*. Tese de Mestrado. Universidade de Coimbra.
- SARAIVA, A.L.A. 1987. *Caracterização e aptidão geotécnica dos terrenos envolventes das albufeiras da Aguieira e do Coiço*. Tese de Doutoramento, Universidade de Coimbra, 316 p.
- SILVA, A.P.F. 1990. *Cartografia geotécnica assistida por computador*. Tese de Mestrado. Universidade Nova de Lisboa.
- 2000. *Cartografia Geotécnica do Concelho de Almada e o Sistema de Informação Geo-Almada*. Dissertação apresentada à Universidade Nova de Lisboa para obtenção do grau de Doutor em Geotecnia, na especialidade de Geologia de Engenharia.
- 2015. *Caracterização Geológica e Geotécnica da área compreendida entre o Lumiar e o Olival Basto*. Mestrado em Geologia Aplicada, Especialização em Geologia de Engenharia. Universidade de Lisboa, Portugal, 168 p.
- TAVARES, A.M.Q.S. 1990. *Caracterização geotécnica da zona sudeste da Cidade de Coimbra. Provas de Aptidão Pedagógica e Capacidade Científica*. Universidade de Coimbra, 141 p.
- 1999. *Condicionantes físicas ao planeamento. Análise da susceptibilidade no espaço do Concelho de Coimbra*. Tese de Doutoramento. Universidade de Coimbra, 346 p.
- UNESCO/IAEG 1976. *Guide pour la préparation des cartes géotechniques. Sciences de la Terre*. Les Presses de l'Unesco, Paris. 79 p.
- VALLEJO, L.I.G., FERRER, M., ORTUÑO, L. & OTEO, C. 2002. *Ingeniería Geológica*. Prentice Hall, Madrid, 715 p.
- VASUKI, Y., HOLDEN, E.J., KOVESI, P. & MICKLETHWAITE, S. 2014. Semi-automatic mapping of geological Structures using UAV-based photogrammetric data: An image analysis approach. *Computers and Geosciences*, **69**: 22-32.
- VEIGA, A.N. 2000. *Contribuição das Geociências para o Ordenamento Urbano. Aplicação à Vila da Batalha*. Dissertação de Mestrado em Geociências, Universidade de Coimbra.
- 2011. *Caracterização geotécnica dos terrenos do Vale Tifónico Parceiros-Leiria*. Tese de Doutoramento. Universidade de Coimbra, 331 p.
- VEIGA, A.N. & QUINTA-FERREIRA, M. 2002. *A cartografia geotécnica no planeamento urbano - aplicação à vila da Batalha*. *Actas do 8º Congresso Nacional de Geotecnia*, LNEC, Lisboa, Tema 1. pp. 35-44.

