

# 1. INTRODUÇÃO<sup>©</sup>

## 1.1 ORIGEM E EVOLUÇÃO DA GEOLOGIA DE ENGENHARIA.

O crescente desenvolvimento das obras de engenharia civil e a necessidade de utilização de terrenos progressivamente de pior qualidade têm levado ao reconhecimento, cada vez mais generalizado, da importância e consequente indispensabilidade da adequada caracterização geológica e geotécnica dos terrenos interessados pela respectiva construção a fim de, com segurança, se prever o seu comportamento em face das respectivas solicitações.

Tal tem-se mostrado particularmente evidente em obras cuja implantação interfere significativamente com a estabilidade de elementos da crosta terrestre, nomeadamente obras subterrâneas, barragens, pontes, estradas e vias férreas.

Simultaneamente, o desenvolvimento dos conceitos de planeamento e de protecção do ambiente, tem conduzido a uma participação cada vez maior de estudos geológicos e geotécnicos das respectivas regiões na definição das aptidões dos terrenos para as diversas ocupações possíveis ou desejáveis.

Pode pois dizer-se que é hoje prática corrente fazer acompanhar o estudo de barragens, pontes, túneis, estradas, obras marítimas, edifícios, materiais de construção, planos de desenvolvimento regional e urbano, etc., do reconhecimento geológico e caracterização geotécnica dos terrenos directa ou indirectamente associados ao empreendimento, dependendo o pormenor desse reconhecimento da natureza das formações geológicas e do tipo e grandeza das solicitações.

Aceita-se, para certos casos mais simples, que o estudo geológico e geotécnico se limite ao reconhecimento geológico de superfície desde que efectuado por técnico com a formação adequada, enquanto, para outros, ter-se-á que recorrer a diversas técnicas de prospecção e de ensaio até se conseguir uma descrição satisfatória das características dos terrenos interessados pelas obras ou, ainda, ao acompanhamento durante a sua construção para ir confrontando os estudos anteriormente realizados com as situações realmente encontradas.

---

<sup>©</sup> Texto adaptado dos elementos de consulta da disciplina de Geologia de Engenharia da Universidade Nova de Lisboa, leccionada pelo Professor Dr. Ricardo Oliveira.

Compreende-se, assim, que embora já desde o fim do século dezanove aparecessem referidas no âmbito de grandes projectos de engenharia preocupações relativas à importância das características das formações geológicas na sua estabilidade (um significativo exemplo português é o estudo geológico que acompanhou a escavação do túnel do Rossio, em Lisboa, realizado por Paul Choffat em 1889), só na segunda metade do século vinte se tenha assistido ao aparecimento de Geologia de Engenharia como ramo científico independente e de âmbito definido e, também, ao seu progressivo desenvolvimento.

Poderá dizer-se que os primeiros escritos com carácter sistemático aparecem no século passado no fim da década de 20 e início da década de 30 (como as conhecidas obras de K., Redlich, K. Terzaghi e R. Kampe - *Ingenieurgeologie*, 1929, e de Maurice Lugeon - *Géologie des Barrages*, 1933), mas é só no início da década de 50 que se deve situar o estabelecimento formal da Geologia da Engenharia. É dessa época o aparecimento dos primeiros tratados de Geologia de Engenharia e o início de actividades de ensino universitário com carácter sistemático. Como consequência lógica dessa evolução e como necessidade de coordenação e de estruturação da Geologia de Engenharia a nível internacional, é criada em 1968 a Associação Internacional de Geologia da Engenharia que organizou o seu primeiro congresso, em Paris, em 1970.

Nos estatutos então publicados (1968), a Geologia da Engenharia está definida como a ciência que estuda as propriedades físico-químicas e mecânicas da crosta terrestre, quer em amostras, quer *in situ*, o mais correctamente possível, que transmite esses conhecimentos geológicos com vista à utilização dos terrenos, especialmente do ponto de vista da engenharia, tendo em vista a segurança e o maior benefício para a humanidade, cobrindo assim, as aplicações das ciências da terra à engenharia, planeamento, construção, prospecção, ensaios e exploração de materiais geológicos.

Esta definição, de carácter muito geral, pode considerar-se à luz dos conceitos actuais, bastante desactualizada e a necessitar de uma clara reformulação. Embora variem significativamente as definições que aparecem na bibliografia, reflectindo normalmente a formação básica dos seus autores, pode dizer-se que existe apreciável convergência nos seguintes tópicos (Dearman, W. e R. Oliveira, 1978):

- a Geologia de Engenharia é a ciência que se ocupa, sobretudo, da aplicação da Geologia a **obras de Engenharia Civil** e ao estudo de **problemas do ambiente** que afectam a crosta terrestre;
- o âmbito da Geologia de Engenharia cobre: a definição da geomorfologia, estrutura, litologia e certas características hidrogeológicas das formações geológicas; a caracterização (físico-mecânica, química e mineralógica) dos materiais; a definição do comportamento mecânico de maciços terrosos e rochosos; a previsão da evolução daquelas propriedades durante a vida das

obras; e a definição das medidas apropriadas para melhorar ou manter as propriedades relevantes dos terrenos.

Pode pois considerar-se a Geologia de Engenharia fazendo a ligação entre a Geologia e a Engenharia, nomeadamente a Engenharia Civil, aparecendo simultaneamente como uma das disciplinas da Geotecnia e um dos ramos das Ciências Geológicas, baseando o seu corpo científico quer em disciplinas no âmbito da Engenharia, quer do âmbito da Geologia. Destas, as mais importantes são a Petrografia, a Tectónica e a Hidrogeologia, mas a Geomorfologia, a Sedimentologia e a Sismologia têm frequentemente papel de relevo. Das disciplinas da Engenharia são, sem dúvida, a Mecânica dos Sólidos e a Mecânica dos Fluidos, ao nível das ciências básicas, e a Mecânica dos Solos e a Mecânica das Rochas, ao nível das Ciências aplicadas, aquelas que têm maior influência e afinidade com a Geologia de Engenharia e consequentemente aquelas com as quais o especialista tem que estar bem familiarizado.

Com efeito, a Geologia de Engenharia, a Mecânica dos Solos e a Mecânica das Rochas, que conjuntamente constituem o núcleo do ramo do saber designado por Geotecnia, têm como objecto de estudo os materiais geológicos da camada superficial da crosta terrestre, resultando daqui que não é clara, muitas vezes, a linha de separação dos seus domínios de actividade. De um modo geral, contudo, poderá dizer-se que a Mecânica dos Solos e a Mecânica das Rochas têm a seu cargo a aplicação dos princípios da Mecânica e a solução dos problemas de estabilidade à custa de cálculos numéricos mais ou menos complexos, enquanto que à Geologia de Engenharia cabe o estudo das características geológicas que determinam os parâmetros numéricos e a sua distribuição geométrica num dado maciço (**zonamento geotécnico**), fornecendo elementos para a análise da sua importância geotécnica.

É evidente que problemas como os da génese, constituição, consolidação e permeabilidade de solos estão igualmente ligados à Geologia de Engenharia e à Mecânica dos Solos e que problemas como os da composição, textura, alteração e alterabilidade de rochas ou da definição das características tectónicas e hidrogeológicas de maciços rochosos interessam do mesmo modo à Geologia de Engenharia e à Mecânica das Rochas.

Da sobreposição destas disciplinas resulta, pois, a necessidade de um trabalho de equipa entre os diversos especialistas que intervêm na resolução dos problemas e destes com os técnicos que têm a seu cargo o planeamento e a coordenação dos projectos respectivos.

Aparece assim a Geologia de Engenharia, tendo como finalidade essencial contribuir para o projecto económico e seguro dos empreendimentos de Engenharia Civil e, consequentemente, para a redução de insucessos que se cifram sempre em danos materiais importantes e, muitas vezes, em perda de vidas.

Embora se compreenda que a resenha de insucessos, sobretudo os de graves consequências, seja difícil de objectivar em muitos casos, tem-se conhecimento de algumas situações em que a realização de estudos geológicos e geotécnicos adequados e (ou) o acompanhamento da obra por técnicos especializados os teria permitido eliminar ou, pelo menos, reduzir significativamente. Em muitos casos, foi a invocação da falta de tempo para a realização dos necessários estudos a causa apresentada para a sua ausência ou drástica redução na fase de projecto dos empreendimentos, verificando-se depois que os atrasos em obra, resultantes da ausência ou não adequabilidade dos estudos geológicos e geotécnicos, chegaram a ser iguais ou mesmo superiores ao tempo programado para a fase de construção.

Esta situação tem ocorrido com maior frequência e importância para certos tipos de obras dos quais se destacam as estradas, especialmente no caso de grandes taludes de escavação, as obras subterrâneas e as barragens. Em relação às barragens, um estudo levado a cabo pela Comissão Internacional das Grandes Barragens (*Lessons from Dam Incidents*, 1973) evidenciou que, de 250 acidentes com barragens de vários tipos e dimensões, objecto do inquérito realizado, cerca de 40% foram devidos a condições deficientes de fundação e, destes, 30% ficaram a dever-se a deficiências nos estudos geológicos e geotécnicos. Deve referir-se, no entanto, que grande parte dos casos estudados diz respeito a barragens construídas há já algumas dezenas de anos e que o panorama actual tem vindo, pelo menos quantitativamente, a modificar-se significativamente. Apesar disso, têm-se verificado alguns acidentes importantes relativamente recentes, em especial com barragens de terra de grande altura (um dos mais importantes dos últimos anos foi o acidente com a barragem de Teton, de 90 m de altura, nos Estados Unidos, que rompeu em 1976, provocando o esvaziamento brusco de toda a água da albufeira) que servem para continuar a alertar para a necessidade de conduzir estudos geológicos e geotécnicos pormenorizados para informarem os projectos das grandes obras de engenharia, tanto mais que o seu custo é, normalmente, insignificante quando comparado com o custo da construção ou até do respectivo projecto.

Embora variando com o tipo e dimensão das obras e com a complexidade geológica dos terrenos interessados, constata-se que o custo da condução de estudos geológicos e geotécnicos adequados, incluindo o custo de trabalhos de prospecção e de ensaios de campo e de laboratório, raramente ultrapassa 1% do custo da construção civil do empreendimento e se situa entre 10% e 20% do custo do projecto. Em situações singulares, aceita-se que aquelas percentagens subam até 5%, em relação ao custo de obra, e até 50%, em relação ao custo do projecto.

## 1.2 METODOLOGIA DA GEOLOGIA DE ENGENHARIA

Os estudos geológicos e geotécnicos devem ser programados por **fases**, utilizando métodos de reconhecimento progressivamente mais sofisticados e dispendiosos, acompanhando as próprias fases de execução do projecto e construção de cada empreendimento e visando, no final, o zonamento geotécnico dos maciços geológicos interessados pelas obras com pormenor adequado a cada caso. O responsável pelos estudos tem que os conduzir de forma a esclarecer as questões relevantes para o projecto e a dá-los por terminados logo que a informação necessária esteja obtida, ainda que, eventualmente, alguns problemas da geologia local ou regional que não interfiram com o problema, possam estar insuficientemente esclarecidos.

De um modo geral, as características mais visadas com o estudo geológico e geotécnico dos maciços são a sua **deformabilidade** e **resistência ao corte** e frequentemente a sua **permeabilidade** (em especial no caso de obras hidráulicas e de certos tipos de obras em escavação) e o **estado de tensão *in situ*** (sobretudo no caso de obras subterrâneas profundas). Assim, o responsável pelos estudos, em face de um dado problema e de posse do conhecimento das técnicas de reconhecimento, prospecção e ensaio e do funcionamento das estruturas, e, como se disse, sempre em colaboração com os outros especialistas intervenientes no projecto do empreendimento, deverá elaborar um programa de estudos geológicos e geotécnicos que permita responder de forma mais económica e eficiente às questões que lhe forem sendo postas no decorrer de cada uma das fases do empreendimento.

Em relação aos grandes empreendimentos no âmbito da Engenharia Civil é frequente o desenvolvimento ocorrer durante as fases de Estudo Prévio (ou de Viabilidade), Anteprojecto (ou Projecto Base), Projecto (ou Projecto de Execução) e construção, havendo ainda em regra lugar à participação da Geologia de Engenharia na fase de entrada em serviço das obras, a propósito da interpretação das medições resultantes da observação do seu comportamento.

No quadro seguinte esquematiza-se, para os casos mais gerais, as tarefas do âmbito de Geologia da Engenharia em relação com cada uma das fases do empreendimento:

FASE DO PROJECTO	ESTUDO PRÉVIO	ANTE PROJECTO	PROJECTO	CONSTRUÇÃO	FUNCIONAMENTO
ESTUDOS GEOLÓGICOS E GEOTÉCNICOS	Reconhecimento	Campanha preliminar de prospecção	Campanha complementar de prospecção e ensaios	Acompanhamento da obra	Interpretação dos resultados de observação

Com efeito, considera-se que na maior parte dos casos em que as fases do empreendimento estão assim escalonadas, durante o **Estudo Prévio** a informação resulta essencialmente dos dados obtidos no reconhecimento que deverá incluir a análise de elementos topográficos, geológicos, sismológicos e geotécnicos existentes, a interpretação geológica da fotografia aérea da região e do reconhecimento geológico da superfície do terreno.

Apesar de, nesta fase, em regra, não se recorrer a trabalhos de prospecção (por vezes utilizam-se técnicas expeditas como prospecção geofísica, trados, poços e ensaios de penetração) é indispensável que o reconhecimento seja orientado pela necessidade de obter resposta para os problemas geotécnicos que, com maior probabilidade, irão ser levantados pela construção do empreendimento.

Muitas vezes, uma das tarefas desta fase é o da selecção de locais alternativos para um mesmo empreendimento. Trata-se de uma situação relativamente frequente para certos tipos de obras em que a influência das condições geológicas é altamente significativa na viabilidade do empreendimento, como é o caso de barragens, de centrais subterrâneas, de centrais nucleares e de estradas. No caso de barragens é, em regra, nesta fase que é tomada a opção sobre o tipo de obra mais adequado, opção essa que resulta em muitos casos da disponibilidade em materiais de construção (barragem de terra, de betão ou de enrocamento).

As considerações geológicas e geotécnicas relativas à fase de Estudo Prévio são em regra condensadas num relatório preliminar que frequentemente contém, a terminar, uma proposta de programa de trabalhos de prospecção e ensaios.

Este primeiro programa de trabalhos, a realizar na fase de **Anteprojecto**, deverá iniciar-se pela aplicação dos métodos mais expeditos (nomeadamente métodos de prospecção geofísica, valas e trincheiras, trados) aos quais de forma progressiva se seguirão outros métodos de prospecção e ensaio (sondagens mecânicas, galerias, ensaios *in situ*, ensaios de laboratório), com vista a possibilitar um primeiro zonamento geotécnico dos maciços interessados. Pode dizer-se que a fase de Anteprojecto de um empreendimento termina com a escolha definitiva da respectiva solução e o seu pré-dimensionamento, restando para a fase de projecto a pormenorização do dimensionamento de todos os elementos ou órgãos do empreendimento.

Do ponto de vista da Geologia da Engenharia as actividades na fase de **Projecto** compreendem a pormenorização do zonamento geotécnico iniciado na fase anterior, nomeadamente à custa de mais informação de natureza quantitativa que permita a fixação dos parâmetros de cálculo necessários às análises de estabilidade das estruturas, sobretudo à custa da realização de ensaios *in situ*, e a caracterização de zonas não anteriormente contempladas por trabalhos de prospecção mas que, em face da evolução das soluções de projecto, passaram a interessar o empreendimento.

Quando estas duas fases - Anteprojecto e Projecto - são nitidamente separadas, o que é frequente no caso de projectos importantes, a cada uma delas corresponde um relatório geológico e geotécnico com a integração de toda a informação existente até à data da respectiva apresentação.

A necessidade da intervenção da Geologia de Engenharia num empreendimento não termina, como se disse já, com a apresentação do Projecto, sendo cada vez mais frequente a participação de especialistas no campo da geotecnia nas equipas que executam ou acompanham a **execução das obras**. Para certas estruturas (o caso dos túneis será porventura o exemplo mais claro) a elaboração do Projecto com o pormenor que é normalmente exigido em trabalhos de engenharia civil só é possível durante a fase de construção e à medida que vão progredindo os trabalhos, o que exige um acompanhamento permanente.

Nesta fase há pois que confrontar as hipóteses de projecto com as situações reais que vão sendo encontradas durante as escavações dos terrenos e, quando for caso disso, fazer sugestões de adaptação do projecto às situações realmente existentes. Para além disso, há lugar a todo um trabalho de mapeamento das superfícies escavadas e ao cadastro de todas as ocorrências significativas no decorrer dos trabalhos, resultando daqui que somente nesta fase se poderá, em muitos casos, elaborar o relatório geológico e geotécnico final relativo ao empreendimento.

Em certos tipos de estruturas (barragens, túneis e taludes, por exemplo) há ainda lugar a uma participação significativa na **fase de serviço das obras**, através de tarefas de interpretação das medições com os equipamentos de observação do comportamento.