

C A P Í T U L O 1

Introdução à engenharia geotécnica

1.1 ENGENHARIA GEOTÉCNICA

A **Engenharia Geotécnica** concentra-se na aplicação da tecnologia da engenharia civil a algum aspecto do terreno a ser trabalhado, geralmente os materiais naturais presentes na superfície terrestre ou em suas proximidades. Os engenheiros civis e os geólogos chamam esses materiais de **solo e rocha**. O **solo**, no contexto da engenharia, é o aglomerado relativamente solto de materiais inorgânicos (minerais e sedimentos) e orgânicos encontrados acima do substrato rochoso. Os solos podem ser decompostos com relativa facilidade em suas partículas minerais ou orgânicas constituintes. As **rochas**, por outro lado, apresentam grandes forças coesivas internas e moleculares que mantêm unidos os seus minerais constituintes. Isso é válido tanto para rochas maciças quanto para fragmentos rochosos encontrados em solos argilosos. A linha divisória entre solo e rocha é arbitrária; portanto, pode não ser fácil classificar muitos dos materiais naturais observados na prática da engenharia. Eles podem ser tanto uma “rocha muito macia em processo de alteração” quanto um “solo muito duro”.

Outras disciplinas científicas atribuem significados diferentes para os termos **solo e rocha**. Na geologia, por exemplo, uma **rocha** consiste em um agregado natural formado por um ou mais minerais, presente na crosta e/ou parte do manto terrestre. Para um geólogo, os **solos** são apenas rochas decompostas e desintegradas encontradas na parte superior e muito fina da crosta terrestre e, geralmente, capazes de sustentar a vida vegetal. Da mesma forma, a Pedologia (ciência do solo) e a Agronomia concentram-se apenas nas camadas superiores muito superficiais do solo, ou seja, naqueles materiais importantes para a agricultura e para a silvicultura. Os engenheiros geotécnicos podem aprender muito com a Geologia e com a Pedologia; a Engenharia Geotécnica compartilha muitos temas em comum com esses campos, especialmente com a Geologia de Engenharia e a Engenharia Geológica. Contudo, os estudantes iniciantes devem lembrar que esses campos podem ter terminologias, abordagens e objetivos diferentes dos da Engenharia Geotécnica.

A Engenharia Geotécnica apresenta vários aspectos ou ênfases. A **mecânica dos solos** concentra-se na mecânica e nas propriedades técnicas do solo, enquanto a **mecânica das rochas** lida com a mecânica e as propriedades técnicas da rocha, geralmente, sem se limitar ao substrato rochoso. A **mecânica dos solos** aplica aos solos os princípios básicos da mecânica, incluindo a cinemática, a dinâmica e a mecânica dos fluidos e dos materiais. Em outras palavras, o solo – e não a água, o aço ou o concreto, por exemplo – é o material de engenharia cujas propriedades e comportamento devemos entender para construir com ele ou com base nele. Uma afirmação semelhante também poderia ser feita para a **mecânica das rochas**.

Todavia, devido às diferenças significativas no comportamento das massas de solo em relação aos maciços rochosos, na prática, há pouca convergência entre essas duas disciplinas. Essas divergências são lamentáveis do ponto de vista do engenheiro civil em exercício. Infelizmente, o

mundo não se resume apenas a solos macios ou soltos e a rochas duras; na verdade, a maioria dos geomateriais está em algum ponto intermediário entre esses extremos. Na prática profissional, você terá que aprender a lidar com uma gama de propriedades e comportamentos de materiais.

A **Engenharia de Fundações** aplica a geologia de engenharia, a mecânica dos solos, a mecânica das rochas e a engenharia estrutural ao projeto e à construção de fundações para Engenharia Civil. O engenheiro de fundações deve ser capaz de prever o desempenho ou a resposta do solo ou da rocha da fundação às cargas que a estrutura impõe. Exemplos incluem fundações para edifícios industriais, comerciais e residenciais, pontes, torres e muros de arrimo, bem como fundações para reservatórios de armazenamento de petróleo e outros tipos de reservatórios e estruturas *offshore* (técnica para extração de petróleo em águas profundas). As embarcações precisam de um dique seco durante a construção ou os reparos, e o mesmo deve ter uma fundação. Durante a construção e o lançamento, foguetes e suas estruturas relacionadas devem contar com suportes seguros. Os problemas relacionados à Engenharia Geotécnica enfrentados por um engenheiro de fundações incluem a estabilidade de taludes naturais e escavados bem como de estruturas de contenção de terra permanentes e temporárias, problemas de construção, controle do movimento e pressões da água, e até mesmo a manutenção e a reabilitação de edifícios antigos. A fundação deve não apenas suportar com segurança cargas estáticas estruturais e de construção, mas também resistir adequadamente a cargas dinâmicas devidas a vento, explosões, terremotos e outros fenômenos semelhantes.

Se pensarmos bem, não podemos projetar ou construir **qualquer** estrutura de engenharia civil, seja em terra ou fora dela, sem considerarmos, em última instância, os solos e as rochas da fundação. O desempenho, a economia e a segurança de qualquer estrutura de engenharia civil são afetados ou até mesmo controlados por sua fundação.

Substâncias do meio terrestre são frequentemente utilizadas como material de construção porque representam o material mais acessível em termos financeiros. No entanto, suas propriedades técnicas, como resistência e compressibilidade, muitas vezes são insuficientes, e medidas devem ser tomadas para densificar, fortalecer ou estabilizar e reforçar os solos, para que tenham um desempenho mais satisfatório. Aterros rodoviários e ferroviários, aeródromos, barragens de terra e rocha, diques e aquedutos são alguns exemplos de estruturas civis, e o engenheiro geotécnico é o responsável pelo seu projeto e construção. A segurança e a reabilitação de barragens antigas são aspectos importantes dessa fase da engenharia geotécnica. Uma consideração relacionada, especialmente para engenheiros rodoviários e de aeródromos, é o projeto de uma camada superficial da estrutura terrestre, denominado pavimento. Aqui, a sobreposição entre as disciplinas de transporte e geotécnica é aparente.

A **Engenharia de Rochas**, análoga à engenharia de fundações para solos, concentra-se na rocha como material de fundação e construção. Como a maior parte da superfície terrestre é coberta por solos (ou água), a engenharia de rochas geralmente ocorre no subsolo (em túneis, casas de força subterrâneas, dutos de petróleo, minas, entre outros). Contudo, alguns problemas de engenharia de rochas ocorrem na superfície, como no caso de fundações de edifícios e de barragens ou barramentos (que requerem escavações profundas até atingirem o substrato rochoso), assim como na estabilidade de taludes e assim por diante.

Nos últimos anos, os engenheiros geotécnicos têm se dedicado cada vez mais à solução de problemas ambientais envolvendo solos, águas e rochas. Este campo interdisciplinar é denominado **Engenharia Geoambiental** ou **Geotecnica Ambiental**. São especialmente desafiadores os problemas de águas subterrâneas poluídas, disposição adequada e contenção de rejeitos municipais e industriais, projetos de construção e remediação de depósitos de resíduos nucleares, além do cuidado com outros locais contaminados. Embora todos esses problemas apresentem um componente significativo de Engenharia Geotécnica, eles são interdisciplinares por natureza, e suas soluções exigem que os engenheiros geotécnicos trabalhem em colaboração com engenheiros ambientais e químicos, especialistas em saúde ambiental e pública, geo-hidrologos, botânicos, zoólogos e representantes de órgãos reguladores.

Ao apresentar alguns dos desafios comuns enfrentados pelo engenheiro geotécnico, nosso objetivo é que você perceba, em primeiro lugar, a extensão desse campo e, em segundo, sua importância tanto para o planejamento e a construção de estruturas de engenharia civil, quanto para a saúde e segurança básicas da sociedade. De uma maneira muito real, a Engenharia Geotécnica combina as ciências físicas e matemáticas básicas, geologia e pedologia, com engenharia ambiental, hidráulica, estrutural, de transporte, de construção e de mineração. Trata-se de um campo interdisciplinar, verdadeiramente emocionante e desafiador.

1.2 A NATUREZA ÚNICA DOS MATERIAIS DE SOLO E ROCHA

Observamos anteriormente que, do ponto de vista da Engenharia Civil, o solo é a aglomeração relativamente solta de materiais minerais e orgânicos encontrados acima do substrato rochoso. Em um sentido mais amplo, até mesmo a rocha superficial é de interesse para os engenheiros geotécnicos, como ilustrado pelos exemplos mencionados.

A natureza e o comportamento dos solos e das rochas serão discutidos em mais detalhes ao longo deste livro. Por enquanto, o nosso objetivo é preparar o terreno para o que você está prestes a estudar. Presumimos que você entenda que rocha se refere a qualquer agregado sólido natural, duro ou relativamente duro, encontrado na crosta terrestre. Você também já tem uma vaga ideia sobre o que é o solo. Pressupondo que você tenha noção do que são **areia** e **cascalho**, e talvez tenha uma ideia sobre solos de grãos finos, formados por **silte** e **argila**. Esses termos têm definições técnicas bastante precisas, como veremos mais adiante, mas por enquanto o conceito geral de que solos são partículas será suficiente.

Solos são partículas de quê? Bem, os solos geralmente são partículas de matéria mineral ou, de forma mais simples, fragmentos de rochas resultantes do intemperismo e de outros processos geológicos (ver Capítulo 3) sobre depósitos e camadas rochosas maciças. Os cascalhos são pequenos fragmentos de rocha e normalmente podem conter vários minerais, enquanto as areias são fragmentos ainda menores, e cada grão consiste, em geral, em apenas um mineral, o quartzo (SiO_2). Caso seja impossível “ver” cada grão individual de um solo (a olho nu), então este é siltoso ou argiloso, ou uma mistura de ambos. Na verdade, os solos costumam ser uma mistura de vários tamanhos de partículas diferentes e podem até mesmo conter matéria orgânica. Alguns sedimentos, como a **turfa** (solos hidromórficos) podem ser quase que inteiramente orgânicos. Além disso, como os solos são um material particulado, eles apresentam vazios, e tais espaços costumam estar preenchidos com água e/ou ar. A interação física e química da água e do ar nos vazios com as partículas dos solos, bem como a interação entre as próprias partículas, tornam o comportamento deles bastante complexo e promovem algumas de suas propriedades únicas. Isso também poderá tornar o solo um material de engenharia muito interessante e desafiador de se estudar e compreender.

Devido à natureza dos materiais componentes dos solos e das rochas e à complexidade do ambiente geológico, a Engenharia Geotécnica é altamente empírica e requer tanto conhecimento fundamental quanto experiência profissional. Os solos e as rochas são, muitas vezes, bastante variáveis, mesmo que a distâncias muito pequenas. Em outras palavras, solos e rochas são materiais majoritariamente **heterogêneos** e não **homogêneos**. Isso significa que suas propriedades materiais ou técnicas podem variar muito de um ponto para o outro em um maciço de solo ou rochoso. Além disso, esses materiais em geral são **não lineares**; suas curvas de tensão-deformação não são linhas retas. Para complicar ainda mais, os solos, em particular, retêm uma “memória” de sua história de carga anterior, o que influencia de forma significativa seu comportamento técnico subsequente – ou seja, o engenheiro geotécnico deve ter conhecimento da história geológica de um depósito préterito. Em vez de serem **isotrópicos**, solos e rochas normalmente são **anisotrópicos**, o que significa que suas propriedades materiais ou técnicas não são uniformes em todas as direções.

A maioria de nossas teorias sobre o comportamento mecânico de materiais de engenharia presume que eles são homogêneos, isotrópicos e obedecem às leis lineares de tensão-deformação. Materiais de engenharia comuns, como aço e concreto, não se desviam muito significativamente desses ideais; portanto, podemos aplicar, com discrição, teorias lineares simples para prever a resposta desses materiais às cargas de engenharia. Com solos e rochas, não temos tanta sorte. Podemos presumir uma resposta linear de tensão-deformação, para isso devemos aplicar correções empíricas ou fatores de “segurança” consideráveis aos nossos projetos para levar em conta o comportamento real dos materiais. Além disso, o comportamento de materiais de solos e rochas *in situ* muitas vezes baseiam-se em juntas, fraturas, camadas e dobras e outras “rupturas” no material, que nossos ensaios laboratoriais e métodos simplificados de análise muitas vezes não levam em conta ou não são capazes de considerar. Por isso, a prática da **Engenharia Geotécnica** às vezes é vista mais como uma “arte” do que uma ciência. O sucesso na prática depende do bom senso e da experiência do projetista, construtor ou consultor. Em outras palavras, o engenheiro geotécnico precisa aprender a “intuir” o comportamento dos solos e das rochas. Só então poderemos desenvolver um projeto seguro e econômico de fundação ou túnel, construir uma estrutura de terra de forma segura e elaborar um sistema de contenção e disposição de resíduos ambientalmente adequado ou um plano de remediação do local da obra.

Em resumo, em função do seu comportamento mecânico não linear, não conservador e anisotrópico, além da variabilidade e da heterogeneidade de depósitos naturais, devido à imprevisibilidade da natureza, solos e rochas são, de fato, materiais de engenharia e construção complexos. Nosso principal objetivo neste livro é ajudá-lo a encontrar algum sentido em meio a este caos.

1.3 ESCOPO DESTE LIVRO

Neste capítulo introdutório, o foco está **na classificação e no comportamento técnico dos materiais de solos e rochas**, seguidos por uma introdução aos aspectos mais importantes da engenharia de fundações. A prática bem-sucedida da **Engenharia Geotécnica** requer conhecimento aprofundado e compreensão das propriedades técnicas e comportamentais dos solos e das rochas *in situ*, ou seja, quando estes estão sujeitos a cargas de engenharia e condições ambientais. Portanto, o estudante iniciante deve primeiro desenvolver uma compreensão das propriedades técnicas dos geomateriais, distintas das de outros materiais comuns de Engenharia Civil, antes de aprender a analisar e projetar fundações, terraplenagens e túneis, entre outros.

Na verdade, esta primeira parte é a mais difícil. Os estudantes de engenharia (e os engenheiros) são, em sua maior parte, habilidosos em análises e cálculos de projeto. Contudo, na Engenharia Geotécnica, meros cálculos não conseguem fornecer uma visão completa. Se uma interpretação equivocada da geologia do local ou a adoção de propriedades técnicas inadequadas forem presumidas para o projeto, podem ocorrer erros significativos.

Como a maioria da prática da Engenharia Geotécnica depende da geologia do local a ser trabalhado, das formas de relevo e da natureza dos depósitos dos solos e das rochas em um determinado sítio, incluímos uma seção sobre geologia e formas de relevo no Capítulo 3. Se você já teve essa disciplina em um curso anterior, esta seção do capítulo será útil como revisão. Caso contrário, é altamente recomendável que faça um curso de Geologia Física ou de Engenharia Geológica como parte de seus estudos em Engenharia Geotécnica, e este capítulo pode oferecer informações introdutórias fundamentais.

Nos primeiros capítulos, foram introduzidas algumas definições básicas, propriedades de índice e esquemas de classificação para geomateriais que serão utilizados ao longo do livro. A **classificação** de solos e rochas é importante porque é a “linguagem” que os engenheiros usam para comunicar certos conhecimentos gerais sobre o comportamento técnico dos materiais em um local específico.

Grande parte do livro trata das **propriedades técnicas** dos solos e das rochas, ou seja, das propriedades necessárias para o projeto de fundações, estruturas terrestres e subterrâneas, além dos sistemas geoambientais. Será apresentada a forma como a água afeta o comportamento dos solos e das rochas, incluindo a condutividade hidráulica e as características de percolação. Em seguida, será abordada a compressibilidade, uma importante propriedade técnica que precisamos entender para prever a subsidência de estruturas construídas em massas de solos e rochas. Também serão descritas algumas características elementares de resistência dos materiais, tanto para solos quanto para rochas. A resistência é muito importante para a estabilidade de, por exemplo, fundações, muros de arrimo, taludes, túneis e sistemas de contenção de resíduos.

Mais adiante serão introduzidos conceitos-chave e métodos de projeto básicos da Engenharia de Fundações: fundações rasas, profundas e estruturas de contenção. De forma alguma, esta obra tem a pretensão de ser uma referência exaustiva de todos os tópicos de Engenharia de Fundações. Contudo, à medida que mais programas de Engenharia Civil oferecerem um curso de Engenharia Geotécnica “mesclado” com a mecânica dos solos e a engenharia de fundações, esses capítulos posteriores poderão fornecer os fundamentos da Engenharia de Fundações.

Finalmente, foi incluído um capítulo sobre tópicos avançados na resistência ao cisalhamento de solos e rochas, destinado principalmente a estudos de pós-graduação ou àqueles que desejam ampliar seu conhecimento além do escopo dos capítulos anteriores sobre esses temas.

De forma consistente com essa ênfase em princípios fundamentais, torna-se importante ressaltar que este é um capítulo introdutório que destaca os conceitos básicos, mas com uma abordagem voltada para as aplicações práticas que todo engenheiro civil provavelmente enfrentará. Após o estudo desta obra, você estará apto para avançar em estudos mais especializados de áreas como engenharia de fundações e terraplenagem, geotécnica ambiental, mecânica de rochas e engenharia geológica. Você terá uma noção sólida do que procurar em um local e como determinar as propriedades dos solos e das rochas necessárias para a maioria dos seus projetos. Se conseguir classificar os materiais com precisão, terá uma ideia da faixa provável de valores físicos e técnicos para uma determinada

propriedade de solos ou de rochas. Você será capaz de estimar a capacidade de fundações e as tensões em uma estrutura de suporte de terra. Por fim, esperamos que você aprenda o suficiente para estar ciente de suas próprias limitações e evitar possíveis erros na sua carreira profissional.

1.4 DESENVOLVIMENTO HISTÓRICO DA ENGENHARIA GEOTÉCNICA

Desde que as pessoas começaram a edificar obras civis, elas têm usado os solos e as rochas como base ou material para isso. Os antigos egípcios, babilônios, chineses, hebreus e indianos sabiam como construir diques e barragens a partir dos solos encontrados nas planícies aluviais dos rios de suas regiões. Construções de templos e monumentos antigos em todo o mundo frequentemente incorporaram os solos e as rochas. Os gregos utilizavam argamassa em suas construções, e a eles é atribuída a ideia de adicionar cinza vulcânica à mistura, tornando os concretos bastante duros. Exemplo dessa aplicação é o aqueduto de Megara, construído em 500 a.C., onde um de seus reservatórios, ainda preservado, foi revestido com uma camada de argamassa pozolâmica de 12 mm. Os romanos foram os grandes mestres da engenharia em sua época, com palácios, anfiteatros, praças de esporte, estradas e aquedutos que, até os dias de hoje, continuam estáveis. No Século III a.C. eles aperfeiçoaram a argamassa grega, consolidando o uso da areia como “agregado” e do cimento pozolâmico como “aglomerante”, provocando um avanço sem precedentes nas técnicas das construções. Uma de suas principais fórmulas, denominada de *opus caementicium*, era representada pela mistura dosada de cal, areia, cascalho, material de origem vulcânica (mistura natural de argilas, cinzas vulcânicas e fragmentos de rocha) e produtos orgânicos (leite, gordura e sangue). Mais tarde o historiador romano Plínio, “o Velho” (23-79 d.C.), deixou escrito o legado do “traço”, até hoje utilizado em engenharia civil. Os vikings, na Escandinávia (793-1066 d.C.), utilizavam estacas de madeira para sustentar casas e estruturas de seus cais, em solos argilosos de sua região. Arquitetos e construtores europeus, durante a Idade Média (476-1453 d.C.), aprenderam sobre os problemas de recalque das catedrais e dos grandes edifícios. Um dos exemplos mais notáveis é a Torre de Pisa (1174), em Pisa, na Itália, que logo após sua construção começou a se inclinar devido a um problema de fundação malfeita e por estar em um solo mal consolidado, problemas esses que persistem até os dias atuais. Os astecas (1300-1521 d.C.) construíram templos e cidades nos solos muito pobres e umedecidos do antigo território que atualmente constitui o México muito antes de os espanhóis chegarem ao chamado Novo Mundo. O “projeto” de fundações e outras estruturas envolvendo solos e rochas baseou-se em regras práticas, e com pouquíssima teoria, tendo sido desenvolvido até meados do século XVIII.

Charles Augustin de Coulomb (1736-1806 – engenheiro e físico francês) é o nome exponencial da engenharia dessa época. Ele examinou os problemas relacionados às pressões dos solos contra muros de arrimo, sendo que alguns dos métodos de cálculo por ele desenvolvidos ainda são empregados atualmente. A teoria mais comum para a resistência ao cisalhamento dos solos leva o seu nome. No século seguinte, os engenheiros franceses Alexandre Collin (1808-1890), Henry Darcy (1803-1858) e o escocês William John Macquorn Rankine (1820-1872) fizeram descobertas muito importantes. Collin (1846) foi o primeiro engenheiro a examinar sistematicamente rupturas em taludes argilosos, bem como a medir a resistência ao cisalhamento nas argilas; Darcy (1856) estabeleceu sua lei para o escoamento de água através de areias e Rankine (1857) desenvolveu um método para estimar a pressão dos solos contra muros de arrimo. Na Inglaterra, o engenheiro ferroviário C. H. Gregory, em 1844, utilizou drenos horizontais e contrafortes de aterro compactados para estabilizar taludes de corte para as vias férreas.

No início do século XX, importantes desenvolvimentos no campo da engenharia geotécnica ocorreram na Escandinávia, principalmente na Suécia. Coube ao químico sueco Albert Mauritz Atterberg (1846-1916), em 1911, definir os limites de consistência para argilas que ainda são usadas nos dias de hoje. Durante o período de 1914 a 1922, em conexão com investigações de rupturas em portos e ferrovias, a “Comissão Geotécnica das Ferrovias Estatais Suecas” (*Statens Järnvägers Geotekniska Kommission*) desenvolveu muitos conceitos e dispositivos importantes para a Engenharia Geotécnica. Ela criou métodos para calcular a estabilidade de taludes e técnicas de investigações subsuperficiais, como sondagens de peso e amostradores de pistão, entre outros. Essa “Comissão” enfatizou conceitos importantes como sensibilidade de argilas e consolidação, que é a expulsão da água dos poros das argilas. Naquela época, pensava-se que as argilas eram absolutamente impermeáveis, mas os suecos fizeram medições de campo para demonstrar

o contrário. A “Comissão” foi a primeira a usar a palavra “geotécnica” (em sueco, *geotekniska*) no sentido atual: a combinação de geologia e tecnologia de engenharia civil.

Mesmo com esses primeiros desenvolvimentos na Suécia, o verdadeiro pai da mecânica dos solos moderna foi um tcheco, o professor Karl von Terzaghi (1883-1963). Ele publicou o primeiro livro didático moderno sobre mecânica dos solos em 1925, e, de fato, o nome “Mecânica dos Solos” é uma tradução da palavra alemã *Erdbaumechanik*, que fazia parte do título desse livro (Terzaghi, 1925). Terzaghi foi um engenheiro excepcional e muito criativo, tendo escrito vários outros livros importantes (p. ex., Terzaghi, 1943; Terzaghi e Peck, 1967 – 2ª ed.; e Terzaghi, Peck e Mesri, 1996 – 3ª ed.) e mais de 250 artigos técnicos. Seu nome será mencionado algumas vezes neste livro. Ele foi professor no Robert College de Istambul, na Turquia; na Technische Hochschule, de Viena, na Áustria; no Michigan Institute of Technology e na Harvard University (de 1938 até sua aposentadoria, em 1956), ambos em Cambridge, Massachusetts, nos Estados Unidos da América. O cientista continuou ativo como consultor até sua morte, em 1963, aos 80 anos de idade. Uma excelente referência sobre sua vida e carreira na engenharia é a obra de Goodman (1999), que vale a pena ser lida.

Outra figura importante foi o professor austro-americano Arthur Casagrande (1902-1981), que lecionou na Harvard University de 1932 até 1969. Seu nome será muito mencionado neste livro em função de suas inúmeras e importantes contribuições para a arte e a ciência da mecânica dos solos e da engenharia de fundações.

Desde os anos 1950, o campo cresceu consideravelmente, e diversos cientistas foram responsáveis por seu rápido avanço. Entre os contribuintes significativos à temática, destacaram-se o engenheiro norte-americano Donald Wood Taylor (1900-1955), especialista em fundações; o engenheiro civil brasileiro Alberto Ortenblad (1901-1994), que desenvolveu a **técnica matemática do adensamento**; o engenheiro civil português Manuel Rocha, especialista em estradas de rodagem e diretor do Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), considerada a maior instituição de engenharia civil do mundo; o engenheiro civil russo Gregory B. Tscherbotarioff (1889-1995), que desenvolveu a **técnica de estudos para solos expansivos e estacas pré-moldadas**; o engenheiro civil canadense Ralph Brazelton Peck (1912-2008), que escreveu sobre a **importância da observação dos terrenos nas práticas de engenharia**; o engenheiro civil norte-americano Gerald A. Leonards (1921-1997), que dedicou sua vida à **engenharia de fundações**; o engenheiro civil britânico Alec Westley Skempton (1914-2001), que elaborou **técnicas de capacidade de suporte para solos coesivos**; e o engenheiro civil britânico Harry Bolton Seed (1922-1989) que estudou a **resistência à liquefação dos solos**, entre inúmeros outros.

Tanto Terzaghi quanto Casagrande introduziram o ensino de mecânica dos solos e de geologia de engenharia na América do Norte. Antes da Segunda Guerra Mundial, o tema era lecionado apenas em poucas universidades, principalmente em cursos de pós-graduação. Após a guerra, tornou-se prática comum que pelo menos um curso sobre a matéria fosse obrigatório na maioria dos currículos de Engenharia Civil. Programas de pós-graduação em Engenharia Geotécnica foram implementados em muitas universidades. Finalmente, houve uma verdadeira explosão de informações no número de conferências, periódicos técnicos e livros didáticos publicados sobre o tema durante as últimas quatro décadas.

Em termos de engenharia de fundações, já mencionamos o papel importante que Coulomb e Rankine desempenharam no desenvolvimento de análises de estados limites das pressões laterais do solo para estruturas de contenção. Não deve ser surpresa que Terzaghi tenha sido um pioneiro nessa área também, elaborando alguns dos primeiros métodos racionais para estimar a capacidade do solo de suportar fundações rasas. Na década de 1950, os engenheiros civis canadense George Geoffrey Meyerhof (1916-2003) e iugoslavo Aleksandr Sedemark Vésic (1924-1982), entre outros, começaram a formular métodos fundamentais para fundações profundas. Muitos progressos nesta área da engenharia geotécnica foram impulsionados por empreiteiras, que inovaram para construir em solos desafiadores ou utilizar materiais familiares de forma mais eficiente.

Avanços recentes e significativos para você conhecer incluem dinâmica dos solos, engenharia geotécnica de terremotos, utilização de modelagem computacional para resolver problemas complexos de engenharia, análises e projetos baseados em deformação, integração de probabilidade e estatística na análise de projetos de engenharia geotécnica, além da engenharia e tecnologia geoambientais.

No Brasil, os estudos de Geologia de Engenharia se fazem presentes a partir de 1854, com obras ferroviárias pioneiras nos estados do Rio de Janeiro, de São Paulo e do Paraná, ao longo da Serra do Mar. Em 1907, o engenheiro Miguel Arrojado Lisboa (1872-1932) aprofundou os estudos

de geologia aplicada nas obras ferroviárias e criou, em 1909, o Centro de Pesquisas Geológicas da Inspeção de Obras contra as Secas, que foi responsável pela construção de muitas barragens na região Nordeste. Além desses, são nomes de destaque os engenheiros civis Jerônimo Monteiro Filho (1889-1962), Felipe dos Santos Reis (1895-1977), Luiz Flores de Moraes Rego (1896-1940), Icarhay da Silveira (1912-1975), Tharcísio Damy de Souza Santos (1912-2005), Milton Vargas (1914-2011), Antônio José da Costa Nunes (1916-1990), Fernando Flávio Marques de Almeida (1916-2013), Fernando Emmanoel Barata (1924-2023), Dirceu de Alencar Velloso (1931-2005) e Murilo Dondici Ruiz (1940-2017); também fizeram muitas contribuições os geólogos Luciano Jacques de Moraes (1896-1968) e Arthur Wentz Schneider (1919-1992), entre outros.

1.5 ABORDAGEM SUGERIDA PARA O ESTUDO DA ENGENHARIA GEOTÉCNICA

Devido à natureza dos materiais dos solos e das rochas, tanto os ensaios de laboratório quanto os de campo são essenciais na **Engenharia Geotécnica**. Estudantes de engenharia podem começar a desenvolver uma intuição do comportamento dos solos e das rochas no laboratório, conduzindo os ensaios padrões de classificação e propriedades de engenharia em muitos tipos diferentes de solos e rochas. Dessa forma, o iniciante pode começar a construir um “banco de dados mental” sobre a aparência real de certos solos e rochas, a maneira como tais substâncias podem se comportar com diferentes quantidades de água e diferentes tipos de cargas de engenharia e a faixa de valores numéricos prováveis para os diferentes ensaios. Trata-se de um tipo de processo de auto-calibração, para que ao se deparar com um novo depósito de solo ou tipo de rocha, possa ter, antecipadamente, alguma ideia sobre os problemas de engenharia que irá encontrar naquele local. Você também pode começar a avaliar, pelo menos de forma qualitativa, a validade dos resultados dos ensaios laboratoriais e de campo para os materiais ali encontrados.

Também é importante ter conhecimento de geologia. A **Geologia** é, naturalmente, a parte geológica da engenharia geotécnica, e é fundamental que você busque o máximo de exposição possível a ela ao longo de sua trajetória acadêmica. Após um curso básico de geologia física, são recomendados cursos em geomorfologia e geologia de engenharia. A **Geomorfologia** concentra-se nas formas de relevo, que são importantes para os engenheiros geotécnicos porque os solos e as rochas em um local (e, portanto, os problemas de engenharia) estão muito relacionados com o tipo de relevo da região. A **Geologia de Engenharia** concentra-se nas aplicações da geologia, principalmente à engenharia civil, e compartilha muitos temas com a **Engenharia Geotécnica**.

Os aspectos teóricos e analíticos do projeto de engenharia geotécnica também requerem um sólido conhecimento de mecânica dos materiais, incluindo resistência dos materiais e mecânica dos fluidos. Também ajuda se você estiver familiarizado, até certo ponto, com análise estrutural básica, projeto de concreto armado e aço, engenharia hidráulica e hidrologia, topografia e medições de engenharia, engenharia ambiental básica e construção civil. Em outras palavras, praticamente todas as disciplinas de um curso específico de graduação em **Engenharia Civil**.

1.6 OBSERVAÇÕES SOBRE SÍMBOLOS, UNIDADES E NORMAS

Como na maioria das disciplinas, uma notação padrão não é universal na engenharia geotécnica; portanto, tentamos adotar os símbolos utilizados com maior frequência. Por exemplo, a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) determina regras, padrões, medidas, termos e símbolos relacionados a solos, rochas e fluidos que você necessitará.

As unidades empregadas na Engenharia Geotécnica podem ser descritas de forma um pouco confusa e, de forma menos sutil, como algo ainda pior. Há, na temática, certa mistura de unidades métricas baseadas no sistema *cgs*, unidades inglesas ou imperiais de engenharia e unidades métricas europeias híbridas. Com a introdução do sistema universal de unidades, “Le Système International d’Unités” (SI), a profissão teve uma oportunidade ideal de trazer alguma coerência às unidades na prática da Engenharia Geotécnica. Contudo, como as unidades inglesas de engenharia, muitas vezes, ainda são bastante adotadas, os alunos precisam estar familiarizados com os valores específicos dessas unidades para fazerem a conversão para SI. Existem excelentes *sites* de conversão disponíveis na Internet, e você pode encontrar um que atenda às suas necessidades. No Brasil, temos que seguir o que a ABNT preconiza, observando as atualizações anuais. Nos Estados Unidos, a regulamentação é feita pela American Society for Testing and Materials (ASTM), onde as normas permanecem ativas por oito anos, e quando não são reprovadas, são desativadas.

ATIVIDADES SUGERIDAS

- 1.1 Assista a uma palestra com um tema de Engenharia Geotécnica, seja por meio da série de seminários que eventualmente sua associação estudantil possa vir a fornecer ou por minicursos promovidos pela Sociedade Brasileira de Geologia de Engenharia ou pelo Conselho Regional de Engenharia e Agronomia de sua região. Além de aprender algo sobre um tema ou projeto de engenharia geotécnica, você também poderá conhecer o palestrante para angariar futuros estágios, expandir sua rede profissional e entender por que tal profissional se interessou pela prática ou pesquisa geotécnica.
- 1.2 Visite um local (aula prática de campo ou visita técnica) de projetos onde a fase geotécnica ainda esteja em andamento. Idealmente, um engenheiro ou mestre de obras responsável pela obra pode receber você e seus colegas, explicar as fases da obra e quaisquer outros detalhes relacionados ao projeto geotécnico e à construção. Isso o colocará dentro do canteiro da obra.
- 1.3 Converse com um dos professores de geotecnia sobre a pesquisa e/ou consultoria que estiverem realizando e, se estiver interessado, veja se há oportunidades de participar, como estagiário, da pesquisa.

REFERÊNCIAS

- ATTERBERG, A. (1911). “Lerornas Förhållande till Vatten, deras Plasticitetsgränser och Plasticitets-grader,” (“The Behavior of Clays with Water, Their Limits of Plasticity and Their Degrees of Plasticity”), *Kungliga Lantbruk-sakademiens Handlingar och Tidskrift*, Vol. 50, N° 2, pp. 132–158; also in *Internationale Mitteilungen für Boden-kunde*, Vol. 1, pp. 10–43 (“Über die Physikalische Bodenuntersuchung und über die Plastizität der Tone”).
- COLLIN, A. (1846). *Recherches Expérimentales sur les Glissements Spontanés des Terrains Argileux, Accompagnées de Considerations sur Quelques Principes de la Mécanique Terrestre*, Carilian-Goeury and Dalmont, Paris. Translated by W.R. Schrieffer under the title “Landslides in Clays by Alexandre Collin 1846,” University of Toronto Press, Canada, 1956, 161 p. (21 plates).
- COULOMB, C.A. (1776). “Essai sur une application des règles de Maximus et Minimis à Quelques Problèmes de Statique, Relatifs à l’Architecture,” *Mémoires de Mathématique et de Physique, Présentés à l’Académie Royale des Sciences, par Divers Savans, et lûs dans ses Assemblées*, Paris, Vol. 7 (Vol. for 1773 published in 1776), pp. 343–382.
- DARCY, H. (1856). *Les Fontaines Publiques de la Ville de Dijon*, Dalmont, Paris.
- GOODMAN, R.E. (1999). *Karl Terzaghi: The Engineer as Artist*, ASCE Press, 340 p.
- GREGORY, C.H. (1844). “On Railway Cuttings and Embankments with an Account of Some Slips in London Clay, on the Line of the London and Croydon Railway,” *Minutes and Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, Vol. 3, pp. 135–145. Reprinted in *A Century of Soil Mechanics*, Institution of Civil Engineers, London, 1969, 482 p.
- INTERNATIONAL SOCIETY FOR SOIL MECHANICS AND FOUNDATION ENGINEERING (1977). “List of Symbols, Units, and Definitions,” Subcommittee on Symbols, Units, and Definitions, *Proceedings of the Ninth International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Tokyo, Vol. 3, pp. 156–170.
- RANKINE, W.J.M. (1857). “On the Stability of Loose Earth,” Abstracts of the Papers Communicated to the Royal Society of London, *Proceedings of the Royal Society*, London, Vol. VIII, pp. 185–187.
- STOKOE, K.H., II AND LODDE, P.F. (1978). “Dynamic Response of San Francisco Bay Mud,” *Proceedings of the Earthquake Engineering and Soil Dynamics Conference*, Los Angeles, ASCE, Vol. II, pp. 940–959.
- STATENS JÄRNVÄGERS GEOTEKNISKA KOMMISSION (1922). *1914–1922 Slutbetänkande, (1914–1922 Final Report)*, Presented to the Board of the Royal Swedish Railroads, Stockholm, 180 p. (42 plates).
- TERZAGHI, K. (1925). *Erdbaumechanik auf Bodenphysikalischer Grundlage*, Franz Deuticke, Leipzig und Wien, 399 p.
- TERZAGHI, K. (1943). *Theoretical Soil Mechanics*, Wiley, New York, 510 p.
- TERZAGHI, K. AND PECK, R.B. (1967). *Soil Mechanics in Engineering Practice*, 2nd ed., Wiley, New York, 729 p.
- TERZAGHI, K. AND PECK, R.B.; MESRI, G. (1996). *Soil Mechanics in Engineering Practice*, 3rd ed., Wiley, New York, 549 p.

LEITURA RECOMENDADA

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). (2024). ABNT, Rio de Janeiro.