

ARQUITETURA E PROPRIEDADES FÍSICAS DO SOLO

*E quando a cultura cresceu, e foi colhida,
nenhum homem havia esfarelado um torrão de terra quente entre seus dedos
e deixado a terra passar pelas pontas de seus dedos.*
- John Steinbeck, As Vinhas da Ira.

As propriedades físicas do solo influenciam em como o solo funciona no ecossistema e em como ele pode ser mais bem manejado. O sucesso ou fracasso de projetos agrícolas ou de engenharia muitas vezes é dependente das propriedades físicas do solo utilizado. A ocorrência e crescimento de diferentes espécies vegetais estão diretamente relacionados às propriedades físicas do solo, assim como o movimento de água sobre e através dos solos e seus nutrientes e poluentes químicos dissolvidos.

A cor, textura e outras propriedades físicas do solo são utilizadas na classificação de perfis e em levantamentos sobre a aptidão do solo para projetos agrícolas e ambientais. O conhecimento básico sobre as propriedades físicas não são apenas de valor prático, mas servirá como base para a compreensão de muitos aspectos que serão abordados posteriormente.

As propriedades físicas discutidas neste capítulo dizem respeito às partículas sólidas do solo e à maneira como elas se unem formando agregados. Se pensarmos no solo como uma casa, as partículas primárias do solo são os tijolos com os quais a casa é construída. A **textura do solo** descreve o tamanho das partículas do solo. As partículas minerais mais grosseiras são normalmente incorporadas, e cobertas, por argila e outros materiais coloidais. Quando houver predomínio de partículas minerais de maior diâmetro, o solo é classificado como cascalhento, ou arenoso; quando houver predomínio de minerais coloidais, o solo é classificado como argiloso. Todas as transições entre estes limites são encontradas na natureza.

Na construção de uma casa, a maneira como os tijolos estão dispostos determina a natureza das paredes, quartos e corredores. A matéria orgânica e outras substâncias atuam como agente cimentante entre as partículas individuais, favorecendo a formação de aglomerados ou agregados no solo. A **estrutura do solo** descreve a maneira como as partículas do solo estão agregadas. Esta propriedade, portanto, define a configuração do sistema poroso em um solo.

As propriedades físicas estudadas neste capítulo enfatizam as partículas sólidas e os espaços porosos entre as partículas sólidas. Juntas, a textura e estrutura do solo ajudam a determinar a capacidade solo em reter e conduzir água e ar, necessários para a sustentação da vida. Estes fatores também determinam o comportamento dos solos quando utilizados em estradas e fundações de edifícios, ou quando manipulados pelo cultivo. Na verdade, pela sua influência no movimento da água através do solo e fora dele, as propriedades físicas também exercem uma considerável influência sobre a degradação do solo pelo processo erosivo.

1.1 Textura do Solo (Distribuição do Tamanho de Partículas do Solo)

O conhecimento das proporções dos diferentes tamanhos de partículas em um solo (ou seja, a textura do solo) é importante para o entendimento do comportamento e manejo do solo. Durante a classificação do solo em um determinado local, a textura dos diferentes horizontes é, em muitas vezes, a primeira e mais importante propriedade a ser determinada e, portanto, a partir desta informação, um cientista do solo pode tirar muitas conclusões importantes. Além disso, a textura de um solo não é prontamente sujeita a mudanças, por isso é considerada uma propriedade básica do solo.

Natureza das Frações do Solo

O diâmetro das partículas individuais do solo variam em 6 ordens de grandeza, de matações (1m) à argilas submicroscópicas ($<10^{-6}$ m). Os cientistas agrupam estas partículas de acordo com os diversos sistemas de classificação, como mostrado na Figura 1.1. A classificação estabelecida pelo Departamento de Agricultura dos Estados Unidos é utilizada neste texto. Os limites empregados neste sistema de classificação não são puramente arbitrários, mas refletem em grandes mudanças no comportamento das partículas e nas propriedades físicas do solo por elas determinadas.

Matações, cascalhos, seixos rolados e outros fragmentos grosseiros maiores que 2 mm de diâmetro podem afetar o comportamento de um solo, mas eles não são considerados como parte da fração terra fina, para a qual o termo textura do solo é aplicado.

Areia - Partículas denominadas de areia são aquelas com diâmetro entre 0,05 mm e 2 mm. A areia dá a sensação de aspereza entre os dedos. As partículas são geralmente visíveis a olho nu e elas podem ser arredondadas ou angulares (Figura

1.2), dependendo do grau de intemperismo e abrasão que elas tenham sofrido. Partículas de areia grossa podem ser fragmentos de rocha contendo vários minerais, mas a maioria dos grãos de areia é constituída por um só mineral, normalmente quartzo (SiO₂) ou outro silicato primário (Figura 1.3). A dominância do quartzo significa que a areia separada, geralmente, contém poucos nutrientes para as plantas. O maior tamanho das partículas significa que os nutrientes presentes não deverão ser disponibilizados para absorção pelas plantas.

Como as partículas de areia são relativamente grandes, deste modo, os poros entre elas também possuem um diâmetro relativamente grande. Os poros largos em solos arenosos não conseguem reter água contra a força da gravidade (ver Seção 2.2) e, assim, drenam rapidamente e promovem entrada de ar no solo. A relação entre diâmetro de partícula e área superficial específica (área superficial para uma dada massa de partículas) é ilustrada na Figura 1.4. Devido ao seu maior tamanho, partículas de areia têm superfície específica baixa. Deste modo, apresentam pequena capacidade de retenção de água ou nutrientes e não se mantêm unidas em uma massa coerente (ver Seção 1.9). Devido às propriedades descritas, a maioria dos solos arenosos são bem aerados e soltos, mas também inférteis e propensos à seca.

Silte - Partículas menores que 0,05 mm, mas maiores que 0,002 mm de diâmetro são classificadas como silte. Embora similares a areia na forma e composição mineral, as partículas individuais de silte são tão pequenas que não são visíveis a olho nu (Figura 1.2). Ao invés de apresentar sensação de aspereza quando esfregadas entre os dedos, o silte se apresenta suave e sedoso ao toque, como a farinha. Onde o silte é composto por minerais intemperizáveis, o tamanho relativamente menor (e grande área superficial) das partículas permite um intemperismo rápido o suficiente para liberar quantidades significativas de nutrientes para as plantas.

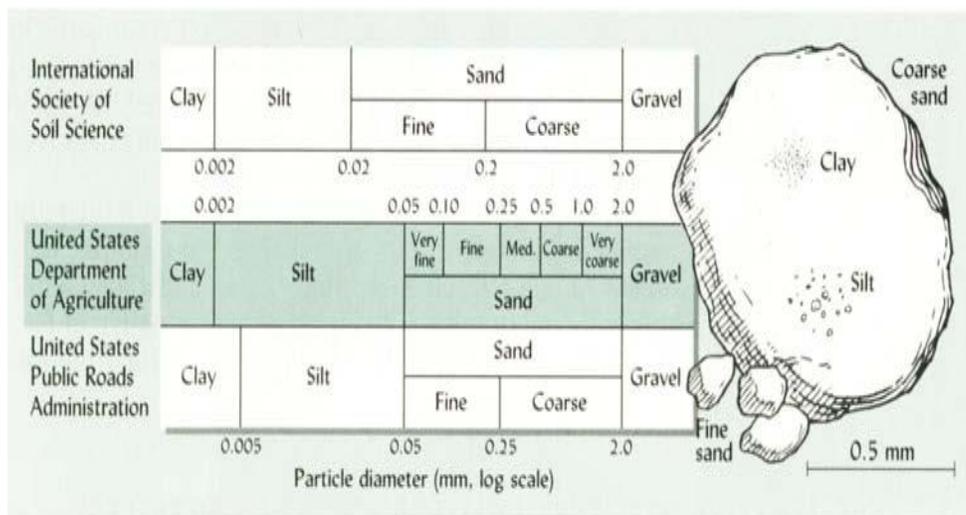


FIGURA 1.1. Classificação das partículas do solo de acordo com seu tamanho. A escala sombreada localizada no centro e os nomes nos desenhos das partículas seguem o sistema do Departamento de Agricultura dos Estados Unidos, o qual é amplamente utilizado em todo o mundo e neste livro. Os outros dois sistemas mostrados também são amplamente utilizados por cientistas do solo e por engenheiros da construção civil. O desenho ilustra os tamanhos das frações do solo (observar a escala).

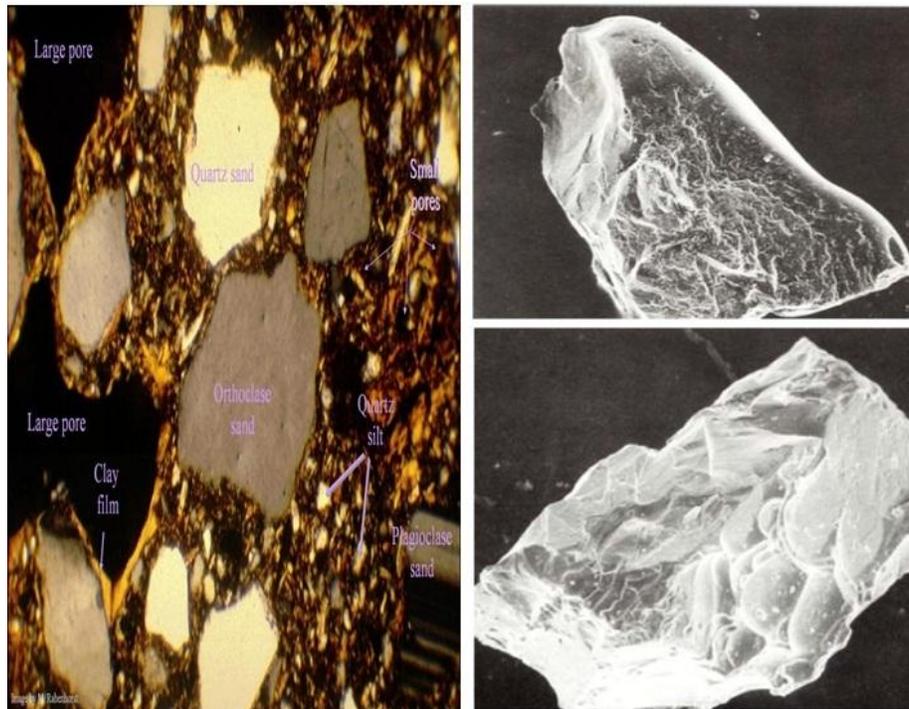


FIGURA 1.2 (*Esquerda*) Uma pequena seção de um solo franco visto através de um microscópio empregando luz polarizada (poros vazios aparecem em preto). As partículas de areia e silte mostradas são irregulares em tamanho e forma, sendo o silte representado pelas partículas menores. Embora o quartzo (*q*) domine a fração areia e silte deste solo, vários outros minerais silicatados podem ser observados (*p* = plagioclásio, *k* = feldspato). Filmes de argila podem ser vistos revestindo as paredes dos poros maiores (setas). A microscopia eletrônica de varredura, em grãos de areia, mostra partículas de quartzo (*inferior direito*) e feldspato (*superior direito*) com aumento de cerca de 40 vezes.

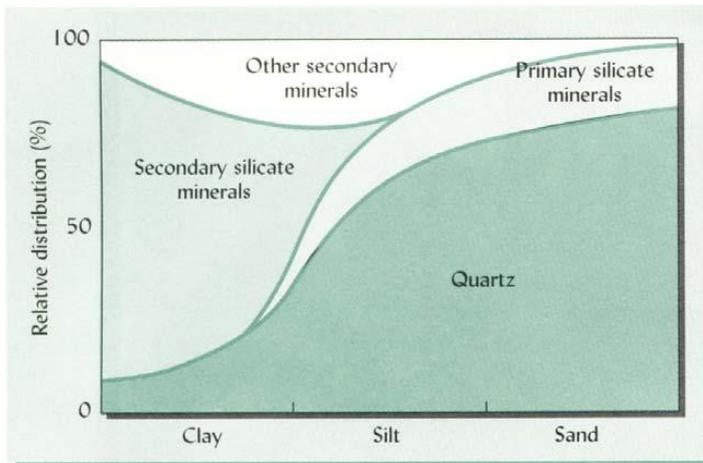


FIGURA 1.3 Relação entre o tamanho das partículas e os tipos de minerais presentes. O quartzo é dominante na fração areia e em frações mais grosseiras de silte. Silicatos primários como o feldspato, hornblenda e mica estão presentes na areia e em menores quantidades na fração silte. Minerais secundários, como óxidos de ferro e alumínio, são predominantes na fração silte de menor diâmetro e na fração argila mais grosseira.

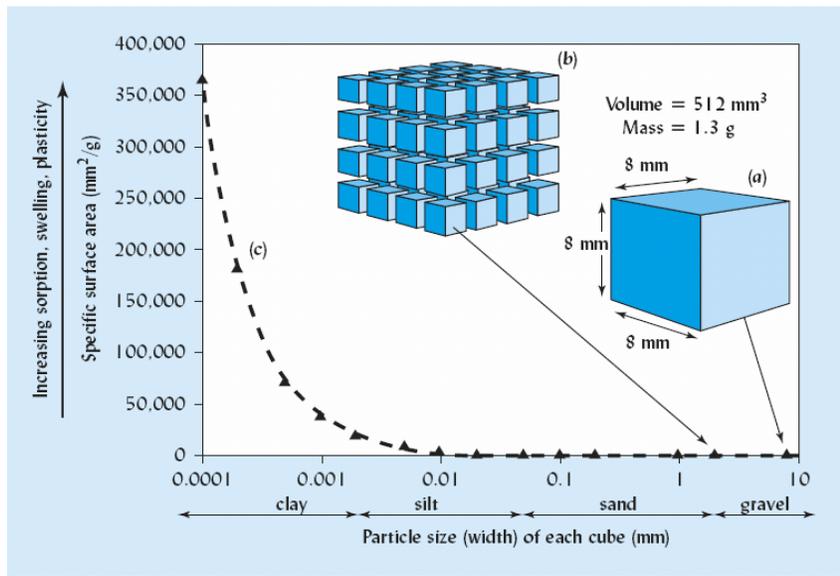


FIGURA 1.4 A relação entre a área superficial de um material de massa conhecida e o tamanho de suas partículas. Considere um único cubo do tamanho de um cascalho com 8 mm de lado e 1,3 gramas de massa (a). Cada lado possui 64 mm² de área superficial. O cubo tem seis lados, com área superficial total de 384 mm² (6 lados x 64 mm²) ou uma superfície específica de 295 cm².g⁻¹ (384/1,3). Se o mesmo cubo fosse dividido em cubos menores de modo que cada um tenha 2 mm de lado (b), então a mesma massa do material seria agora representado por 64 cubos menores (4 x 4 x 4), cubos do tamanho de grãos de areia. Cada face de cada cubo pequeno teria 4 mm²(2 mm x 2 mm) de área superficial, resultando em 24 mm² de área superficial para cada cubo (6 lados x 4 mm² por lado). A área superficial total seria de 1536 mm² (24 mm² por cubo x 64 cubos), ou uma superfície específica de 1182 mm².g⁻¹ (1536/1,3). Esta é quatro vezes maior do que a área superficial do cubo maior. A curva (c) mostra que partículas de argila, que são muito pequenas, tem área superficial milhares de vezes maior que a mesma massa de partículas de silte e centenas de milhares de vezes maior que a mesma massa de areia. A curva da área de superfície específica explica o porquê de quase todo o poder de adsorção, expansão, plasticidade, calor de umedecimento e outras propriedades relacionadas à área superficial estão associadas à fração argila em solos minerais.

Os poros entre as partículas no material siltoso são bem menores (e muito mais numerosos) que os poros presentes entre as partículas de areia, deste modo, o silte retém água e permite uma menor taxa de drenagem. Entretanto, mesmo quando úmido, o silte por si só não exhibe muita pegajosidade ou plasticidade (maleabilidade). A baixa plasticidade, coesão e capacidade de adsorção que algumas frações de silte apresentam é, em grande parte, devida a adesão de filmes de argila à superfície das partículas (ver Figura 2.21). Devido à sua baixa pegajosidade e plasticidade, solos com grandes quantidades de silte e areia fina podem ser altamente suscetíveis à erosão eólica e hídrica. Solos siltosos são facilmente carregados por fluxos de água, num processo chamado “escoamento superficial” (Quadro 1.1).

Argila – Partículas de argila são menores que 0,002 mm. Elas, portanto, possuem uma grande área superficial específica, apresentando uma enorme capacidade de adsorção de água e outras substâncias. Uma colherada de argila pode possuir uma área superficial do tamanho de um campo de futebol americano (ver Seção 8.1). Esta grande superfície de adsorção faz com que partículas de argila mantenham-se unidas em uma massa dura e coesa depois de seca. Quando úmida, a argila é pegajosa e pode ser facilmente moldada (exibe alta plasticidade).

Partículas de argila fina são tão pequenas que se comportam como colóides - se suspensas em água não se depositam prontamente. Diferentemente da maior parte das partículas de areia e silte, partículas de argila tendem a ser moldadas em forma de pequenas lâminas ou placas planas. Os poros entre partículas de argila são muito pequenos e irregulares, ocasionando lento movimento de água e ar no solo. Em solos argilosos os poros entre as partículas são pequenos em tamanho, mas grande em número, permitindo que o solo retenha uma grande quantidade de água, embora uma boa parte desta possa não estar disponível para as plantas (ver Seção 5.9). Cada mineral de argila atribui diferentes propriedades aos solos nos quais são predominantes. Por esta razão, propriedades do solo como contração e expansão, plasticidade, capacidade de retenção de água, resistência do solo e adsorção de elementos químicos, são dependentes do tipo e da quantidade de argila presente no solo.

QUADRO 1.1 SILTE E A FALHA DA REPRESA TETON^a

Uma das mais trágicas e dispendiosas falhas de engenharia na história americana aconteceu ao sul de Idaho em 5 de junho de 1977, menos de um ano após o término da construção de uma grande represa de terra no Rio Teton. Onze pessoas foram mortas e 25.000 ficaram desabrigadas nas cinco horas que foram necessárias para esvaziar o lago de 28 km de comprimento que havia sido formado pela represa. \$ 400 milhões (1977 dólares) foi o valor dos prejuízos causados pelo grande volume de água liberado pelo desmoronamento da represa no vale abaixo. A destruição da represa iniciou com pequenas infiltrações que rapidamente tornaram-se grandes volumes de água, arrastando até mesmo máquinas designadas para reparos no local. A represa Teton foi construída de acordo com um modelo padrão, testado para diques de terra dividido em zonas. Depois de preparar uma base sobre riolito abaixo do solo, a parte central (zona 1) foi construído com material firmemente compactado e coberto com uma camada (zona 2) de material grosseiro de solo aluvial para proteger da erosão hídrica e eólica. A parte central deveria ser construída com uma camada impermeável que impedisse o movimento de água através da represa. Normalmente, materiais argilosos são escolhidos para o centro, por possuírem características de plasticidade e pegajosidade, estes materiais quando úmidos podem ser compactados em uma massa impermeável e maleável que permanece unida e não apresenta fissuras desde que seja mantida úmida. O silte, por outro lado, ainda que possa parecer semelhante a argila no campo, tem pequena ou nenhuma viscosidade ou plasticidade e portanto não pode ser compactado em uma massa coesa como a argila. Uma massa úmida e compactada de silte poderá apresentar fissuras pela falta de plasticidade. Além disso, se a água penetra nestas fissuras, o material siltoso será carregado pelo fluxo de água, aumentando as fissuras e conduzindo mais água. O processo de aumento rápido dos canais de infiltração é chamado de "piping". Este processo pode ser certamente a causa principal do fracasso da represa Teton, pelo fato dos engenheiros construírem a zona 1, (centro da represa), usando material de um depósito de silte de origem eólica ("loess") em lugar de argila. Esta é uma trágica mas útil informação sobre a importância da textura no comportamento do solo.

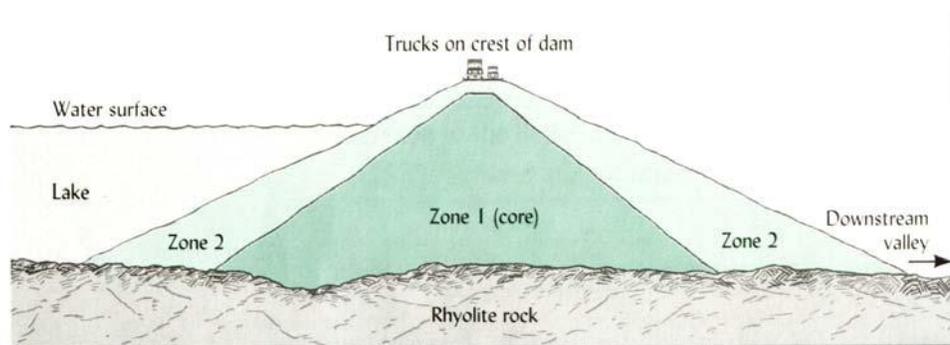


FIGURA 1.5 Diagrama da Barragem de Teton.

^a Baseado no relatório do Grupo de Revisão da Falha da Barragem de Teton do Departamento do Interior dos Estados Unidos (1977).

Influência da área superficial em outras propriedades do solo

À medida que diminui o diâmetro das partículas, a área superficial específica e propriedades relacionadas aumentam significativamente, como mostrado graficamente na Figura 1.4. Argila fina de tamanho coloidal possui área superficial cerca de 10.000 vezes maior do que a mesma massa de areia de tamanho médio. A textura do solo influencia muitas outras propriedades (Tabela 1.1) como resultado de cinco fenômenos fundamentais de superfície:

1. Além das pequenas quantidades de água retida nos pequenos poros do solo, a água também é retida como pequenos filmes aderidos à superfície das partículas do solo. Quanto maior a área superficial, maior a capacidade de retenção de água.
2. Gases e substâncias químicas são atraídos e adsorvidos pela superfície das partículas minerais. Quanto

maior a área superficial, maior a capacidade de retenção de nutrientes e outras substâncias químicas do solo.

3. O processo de intemperismo ocorre na superfície das partículas minerais, liberando elementos constituintes na solução do solo. Quanto maior a área superficial, maior a taxa de liberação de nutrientes para as plantas através de minerais intemperizáveis.

4. As superfícies das partículas minerais muitas vezes apresentam tanto cargas negativas como algumas cargas eletromagnéticas positivas, então estas superfícies das partículas e filmes de água entre eles tendem a se atrair (ver Seção 1.5). Quanto maior a área superficial, maior a tendência das partículas manterem-se unidas em uma massa coesa ou como pequenos agregados.

5. Os microrganismos tendem a se desenvolver e colonizar as superfícies das partículas. Por estas e outras razões, reações microbiológicas nos solos são altamente afetadas pela área superficial específica.

TABELA 1.1 Influência das frações (areia, silte e argila) em algumas propriedades e comportamento dos solos^a

<i>Propriedades/Comportamento do solo</i>	<i>Areia</i>	<i>Silte</i>	<i>Argila</i>
Capacidade de retenção água	Baixa	Média a alta	Alta
Aeração	Boa	Média	Pobre
Taxa de drenagem	Alta	Lenta a média	Muito lenta
Teor de matéria orgânica no solo	Baixo	Médio a alto	Alto a médio
Decomposição da matéria orgânica	Rápida	Média	Lenta
Aquecimento na primavera	Rápido	Moderado	Lento
Susceptibilidade à compactação	Baixa	Média	Alta
Susceptibilidade a erosão eólica	Moderada	Alta	Baixa
Susceptibilidade a erosão hídrica	Baixa	Alta	Solo agregado – baixa Solo não agregado - alta
Potencial de expansão e contração	Muito baixo	Baixo	Moderado a muito alto
Adequabilidade para construção de represas e aterros	Baixa	Baixa	Alta
Capacidade de cultivo após chuva	Boa	Média	Baixa
Potencial de lixiviação de poluentes	Alto	Médio	Baixo
Capacidade de armazenamento de nutrientes	Baixa	Média a alta	Alta
Resistência à mudança de pH	Baixa	Média	Alta

^a: Exceções à estas generalizações ocorrem, como resultado da estrutura do solo e mineralogia da argila.

1.2 Classes Texturais do Solo

Dentre os três grupos principais de *solos arenoso, argiloso e franco*, nomes de classes texturais específicas fornecem uma ideia mais precisa da distribuição de tamanho de partículas e da natureza geral das propriedades físicas do solo. As 14 classes texturais encontradas na Tabela 1.2 apresentam uma sequência gradual desde partículas de areia, as quais possuem textura grosseira, à partículas de argila, que possuem textura muito fina. Na classe arenosa e areia franca ocorre predomínio das propriedades da areia, pois a fração areia compreende pelo menos 70% do material em peso e menos que 15 % do material é argila(ver ligações na Figura 1.6). No entanto, a maioria dos solos está como algum tipo de **franco**.

Francos - O conceito central de **franco** pode ser definido como uma mistura de areia, silte, e partículas de argila que exibe as *propriedades* destas frações em proporções iguais. Esta definição não significa que as três frações estão presentes em quantidades iguais (por isso a classe franco não esta exatamente no meio do triângulo na Figura 4.6). Esta anomalia existe porque uma percentagem relativamente pequena de argila é suficiente para atribuir ao solo propriedades referentes à esta fração, considerando que pequenas quantidades de areia e silte possuem menor influência sobre o comportamento do solo. Um solo franco em que a areia é dominante é classificado como um franco arenoso. Do mesmo modo, alguns solos são classificados como franco siltosos, franco argilo-siltosos, franco argilo-arenosos e franco argilosos. Note na Figura 1.6 que um solo franco pode ter desde pouca até 26 % de argila, mas para ser qualificado como franco arenoso ou franco siltoso, o solo precisa ter no mínimo 45 % de areia ou 50 % de silte, respectivamente.

Fragmentos grosseiros – Se um solo contém uma proporção significativa de partículas maiores que areia (chamados **fragmentos grosseiros**), um adjetivo qualificador pode ser usado como parte do nome da classe textural. Fragmentos grosseiros com diâmetro entre 2 mm e 75 mm, ao longo de seu maior diâmetro, são denominados cascalho ou seixos; os que variam de 75 mm a 250 mm são chamados calhaus; sendo os maiores que 250 mm são chamados pedras ou matacões. Um solo franco arenoso cascalhento é um exemplo de uma classificação textural modificada.



FIGURA 1.7 Alterar a textura do solo pode ser um grande trabalho. Aqui, grandes quantidades de areia (material mais escuro) e cascalho (mais branco) foram importados e estão sendo espalhados para melhorar a jogabilidade de um campo de atletismo em diferentes condições climáticas. As setas mostram as escavadeiras guiadas por laser espalhando uniformemente a areia e os materiais cascalhentos (Fotos cortesia de R. Weil)

Alteração da Classe Textural do Solo

Durante longos períodos de tempo, processos pedológicos (ver Capítulo 2) como iluviação e intemperismo mineral podem alterar a textura de certos horizontes do solo. Da mesma forma, erosão e subsequente deposição pelo declive podem seletivamente remover ou depositar partículas de certos tamanhos. Entretanto, práticas de manejo, geralmente não alteram a classe textural de um solo em escala de campo. Modificar a textura de um dado solo iria requerer a mistura com outros tipos de solos com classes texturais diferentes. Por exemplo, a incorporação de grandes quantidades de areia para alterar as propriedades físicas de um solo argiloso, para uso em casa de vegetação ou em gramados seria considerado uma mudança da textura do solo. Porém, adicionando turfa ou composto em um solo durante a mistura de um substrato não constitui uma mudança na textura, já que esta propriedade se refere apenas a partículas minerais. De fato o termo *textura do solo* não é relevante para meios artificiais que contenham principalmente perlite, isopor, turfa ou outros materiais que não são constituintes do solo.

Grande cuidado deve ser exercido na tentativa de melhorar as propriedades físicas dos solos de textura fina pela adição de areia. Onde as especificações (como para um projeto paisagístico) pedem por um solo de uma determinada classe textural, em geral é aconselhável encontrar solos naturais que atendam as especificações, ao invés de tentar alterar a classe textural misturando areia ou argila. Se a areia não é do tamanho adequado e não é adicionada em quantidades suficientes, materiais de baixa qualidade podem ser originados. Enquanto entre partículas de areia grossa formam poros de grande tamanho, o mesmo não ocorre onde a areia se apresenta misturada a uma matriz siltosa ou argilosa. A mistura de quantidades moderadas de areia fina ou areia variando em tamanho pode gerar um produto mais próximo ao concreto do que a um solo arenoso. Para algumas aplicações (como em gramados de campo de golfe e campos de atletismo, ver Figura 1.7), a necessidade de uma rápida drenagem e resistência a compactação mesmo quando úmido pode justificar a construção de um solo artificial através da seleção cuidadosa de areias uniformes. De forma similar, onde uma superfície lisa e dura é requerida, como em quadras de tênis, um solo argiloso artificial pode ser necessário.

Determinação da Classe Textural pelo Método do “Tato”

A determinação da classe textural é uma das primeiras habilidades de campo que um cientista da área de solos deveria desenvolver. A determinação da classe textural pelo tato é de grande valor prático no levantamento de solos, classificação da terra e qualquer estudo no qual a textura poderá ter um papel importante. A precisão desse método depende em grande parte da experiência, então praticar sempre que possível, começando com solos de textura conhecida para calibrar os dedos.

O triângulo textural (Figura 1.6) deve ser mantido em mente quando se determina a classe textural pelo método do tato, como explicado no Quadro 1.2 e Figura 1.8.

QUADRO 1.2 UM MÉTODO PARA DETERMINAÇÃO DA TEXTURA PELO TATO

A primeira e mais crítica etapa no método da textura pelo tato é amassar uma amostra de solo úmido do tamanho de uma noz, até formar uma massa com consistência uniforme, adicionando água lentamente se necessário. Esta etapa pode levar alguns minutos, mas uma determinação precipitada ocasionará erros, pois agregados de argila e silte podem comportar-se como grãos de areia. O solo deve estar úmido, mas não muito brilhante. Tente amassar a amostra com apenas uma das mãos para utilizar a outra limpa para escrever no caderno de anotações de campo (e apertar a mão do seu cliente).

Enquanto comprime e amassa a amostra, observe sua maleabilidade, pegajosidade e resistência, todas as propriedades associadas com o conteúdo de argila. Um alto conteúdo de silte se traduz numa sensação de maciez e sedosidade, com pouca pegajosidade ou resistência à deformação. Um solo com um conteúdo significativo de areia apresenta sensação de aspereza e faz um rangido quando próximo ao ouvido.

Sinta a quantidade de argila através da compressão de uma massa de solo devidamente úmida entre o polegar e o indicador, fazendo um “fio” de solo. Faça um “fio” tão longo quanto possível, até que este se quebre com o próprio peso (veja Figura 1.8)

Interprete suas observações com os seguintes itens:

1. O solo não adere como uma esfera, desfazendo-se: areia.
2. O solo forma uma esfera, mas não formará um fio: franco-arenosa
3. Fio do solo é friável e quebra-se quando está com menos de 2,5cm de extensão e
 - a. Rangido é audível; sensação de aspereza: franco-arenosa.
 - b. Maciez, sensação de sedosidade; não consegue ouvir o rangido: franco-siltosa.
 - c. Ligeiramente ásperos e sedosos, rangido não claramente audível: franco.
4. Solo exhibe moderada pegajosidade e firmeza, formando fios alongados de 2,5 a 5 cm, e:
 - a. Rangido audível; sensação de aspereza: franco-argilo-arenosa.
 - b. Maciez, sensação de sedosidade; rangido não audível: franco-argilo-siltosa.
 - c. Ligeiramente ásperos e sedosos, rangido não claramente audível: franco-argilosa.
5. Solo exhibe pegajosidade e firmeza dominante, forma fios maiores que 5 cm, e:
 - a. Rangido é audível; sensação de aspereza: argilo-arenosa.
 - b. Maciez, sensação de sedosidade; rangido não audível: argilo-siltosa.
 - c. Ligeiramente ásperos e sedosos, rangido não claramente audível: argila.

Uma melhor estimativa do conteúdo de areia (e, por isso, disposição mais precisa na dimensão horizontal do triângulo de classes texturais) pode ser obtida através do umedecimento, na palma da mão, de um agregado de solo do tamanho de uma ervilha, trabalhando ele entre os dedos até que a palma da sua mão fique coberta com um caldo de materiais provenientes do solo. Os grãos de areia permanecerão completamente visíveis e seu volume comparado à ervilha original poderá ser estimado, assim como o tamanho relativo de suas partículas (fina, média, grossa, etc.).

Este método é melhor apreendido utilizando-se de amostras de classe textural conhecidas. Com prática, determinações acuradas da classe textural podem ser feitas em campo.



FIGURA 1.8 Método do Tato para determinação da classe textural do solo. Uma amostra de solo úmido é esfregada entre o dedo indicador e o polegar, e amassada para formar um fio. (Topo) O “fio” curto, aspereza e aparência não coesiva de um solo de textura franco-arenosa com cerca de 15% de argila. (Centro) A sedosidade, o “fio” uniforme e aparência friável são característicos de textura franco-siltosa. (Baixo) A maciez, a aparência lustrosa e “fios” longos e flexíveis de uma textura argilosa. (Fotos cortesia de R. Weil)

QUADRO 1.3 LEI DE STOKES E O CÁLCULO DO DIÂMETRO DE PARTÍCULAS PELO MÉTODO DA SEDIMENTAÇÃO

A dedução da Lei de Stokes mostra que a velocidade (V) de uma partícula em sedimentação através de um fluido é diretamente proporcional à aceleração da gravidade (g), à diferença entre a densidade de partículas e a densidade do fluido ($\rho_p - \rho_f$) e ao quadrado do efetivo diâmetro das partículas (d^2). O diâmetro efetivo é atribuído pela Lei de Stokes a partículas lisas e redondas. Uma vez que a maioria das partículas do solo não são lisas e arredondadas, as técnicas de sedimentação determinam o diâmetro efetivo, não necessariamente o diâmetro real das partículas do solo. A velocidade de deposição é inversamente proporcional à viscosidade do fluido (η). Como a velocidade é igual à distância (h) dividida pelo tempo (t), pode-se escrever a Lei de Stokes da seguinte maneira:

$$V = \frac{h}{t} = \frac{d^2 g (\rho_p - \rho_f)}{18\eta}$$

Onde: G = aceleração da gravidade = 9,81 newtons por quilograma (9,81 N kg⁻¹)
 η = viscosidade da água a 20 °C = 0,001 newton-segundos por m² (10³ Ns m⁻²)
 ρ_p = densidade das partículas sólidas, para muitos solos = 2,65.10³ kg m⁻³
 ρ_f = densidade do fluido (água) = 1,0.10³ kg m⁻³

Substituindo esses valores na equação, podemos escrever:

$$\begin{aligned} V = \frac{h}{t} &= \frac{d^2 \cdot 9,81 \text{ N kg}^{-1} \cdot (2,65 \cdot 10^3 \text{ kg m}^{-3} - 1,0 \cdot 10^3 \text{ kg m}^{-3})}{18 \cdot 10^{-3} \text{ Ns m}^{-2}} \\ &= \frac{9,81 \text{ N kg}^{-1} \cdot 1,65 \cdot 10^3 \text{ kg m}^{-3}}{18 \cdot 10^{-3} \text{ Ns m}^{-2}} \cdot d^2 = \frac{16,19 \cdot 10^3 \text{ N m}^{-3}}{0,018 \text{ Ns m}^{-2}} \cdot d^2 = \frac{9 \cdot 10^5}{\text{sm}} \cdot d^2 = kd^2 \end{aligned}$$

Onde,
 $k = \frac{9 \cdot 10^5}{\text{sm}}$

Note que $V = kd^2$ é a fórmula simplificada para a Lei de Stokes na qual k representa a constante relacionada à aceleração da gravidade e à natureza do líquido.

Considerando uma amostra de solo em suspensão em um recipiente com 0,1 m (10 cm) de profundidade. Pode-se calcular o tempo de sedimentação necessário para que haja apenas partículas de argila em suspensão.

Estabelecendo-se: $h = 0,1$ m e $d = 2 \cdot 10^{-6}$ m (0,002 mm é o diâmetro do menor silte).

Colocando-se t em evidência:

$$\frac{h}{t} = d^2 k \Rightarrow \frac{t}{h} = \frac{1}{d^2 k} \Rightarrow t = \frac{h}{d^2 k}$$

Assim:

$$t = \frac{0,1 \text{ m}}{(2 \cdot 10^{-6} \text{ m})^2 \cdot 9 \cdot 10^5 \text{ s}^{-1} \text{ m}^{-1}} = 27,777 \text{ segundos} = 463 \text{ minutos} = 7,72 \text{ horas}$$

Por comparação, a menor partícula de areia ($d = 0,05$ mm) faria o mesmo trajeto em apenas 44 segundos.

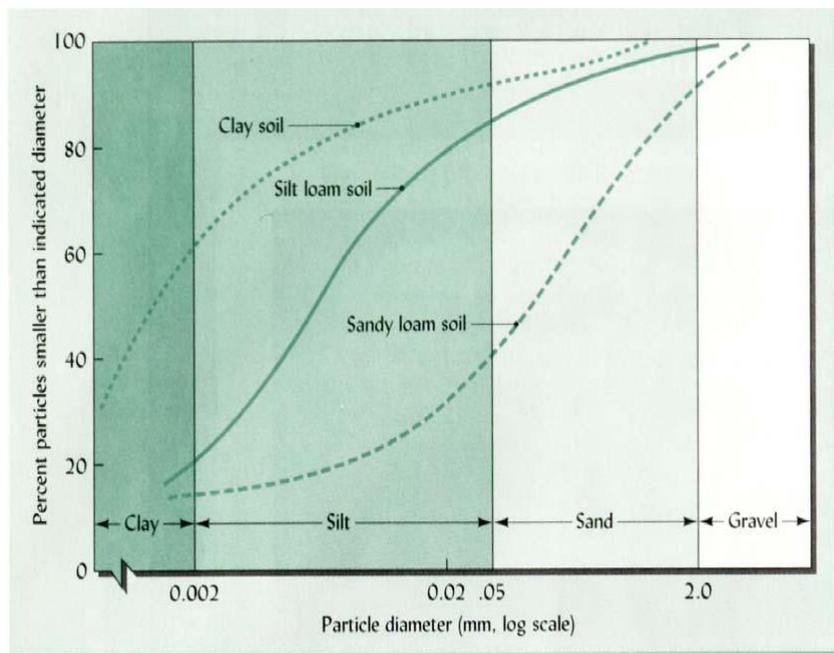


FIGURA 1.10 Distribuição do tamanho de partículas de três solos com ampla variação de textura. Note que há uma transição gradual na distribuição do tamanho de partículas em cada um destes solos.

Análise Laboratorial do Tamanho das Partículas

O primeiro e, às vezes, o passo mais difícil na análise do tamanho de partículas é a dispersão completa de uma amostra de solo em água, de modo que mesmo menores agregados sejam fracionados em partículas primárias, individuais. A dispersão é normalmente realizada com utilização de tratamentos químicos e um agitador de alta velocidade, sacudidor, ou vibrador ultrassônico.

As separações em grupos por tamanho de partículas podem ser realizadas lavando as partículas em suspensão através de um conjunto de peneiras padrão que são graduadas por tamanhos para separar os fragmentos grosseiros e as frações de areia, permitindo que as frações de silte e argila passem. O processo de sedimentação normalmente é utilizado para determinação das frações silte e argila (Figure 1.9). O princípio envolvido é simples. Como as partículas do solo são

mais densas que a água, elas tendem a depositarem-se numa velocidade proporcional ao seu tamanho. Em outras palavras: "quanto maior o tamanho da partícula mais rapidamente elas se depositam". A equação que descreve esta relação é chamada de lei de Stokes (Quadro 1.3).

A Figura 4.10 apresenta as curvas de distribuição de tamanhos de partículas para solos representantes de três classes texturais. O fato destas curvas serem suaves enfatiza que há uma continuidade de tamanhos de partículas entre areia grossa e argila fina.

É importante notar que solos são associados às classes texturais somente com base em partículas minerais do tamanho de areia ou menores; portanto, a percentagem de areia, silte e argila sempre somam 100%. A quantidade de pedras e matácões são quantificadas separadamente. A matéria orgânica não é considerada.

A relação entre tais análises e o nome da classe textural é comumente apresentada diagramaticamente como um gráfico triangular (ver Figura 1.6). Este **triângulo textural** também nos permite usar os dados laboratoriais da análise de tamanho de partículas para verificar a precisão das determinações texturais pelo tato.

1.3 Estrutura dos Solos Minerais

O termo estrutura refere-se ao arranjo de areia, silte, argila e partículas orgânicas no solo. As partículas tornam-se agregadas devido a diversas forças e em diferentes escalas formando unidades estruturais distintas chamadas **peds** ou **agregados**. Quando uma massa de solo é escavada e suavemente desmembrada, ela tende a quebrar em peds ao longo das linhas naturais de fraqueza. Estas linhas exibem baixa resistência tênsil, porque as partículas dentro de um ped ou agregado são mais fortemente atraídas uma às outras do que por partículas do solo circunvizinho. Embora *agregado* e *ped* possam ser usados como sinônimos, o termo *ped* é mais comumente usado para descrever a estrutura em larga escala evidente quando se observa perfis de solo envolvendo unidades estruturais que variam em tamanho desde poucos milímetros a cerca de um metro. Nesta escala, a atração das partículas do solo uma pelas outras nos padrões que definem as unidades estruturais é influenciada principalmente por processos físicos, tais como congelamento-descongelamento, molhar-secar, expansão-contracção, a penetração e expansão das raízes das plantas, a construção de galerias dos animais de solo, e as atividades de pessoas e máquinas. Os peds estruturais não devem ser confundidos com torrões de terra – comprimidos, pedaços coesos de solo que podem se formar artificialmente quando o solo molhado é cultivado ou escavado.

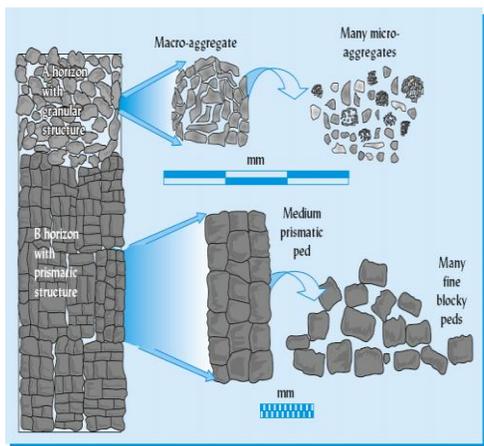


FIGURA 1.11 A organização hierárquica da estrutura do solo. Cada grande unidade estrutural observada em um perfil de solo contém muitas unidades menores. O exemplo de baixo mostra como os grandes agregados prismáticos típicos de horizontes B dividem-se em agregados menores (e assim por diante). O exemplo acima ilustra como microagregados menores que 0,25 mm de diâmetro estão contidos em macroagregados granulares de cerca de 1 mm de diâmetro, típicos de horizontes A. Muitas vezes, os microagregados se formam ao redor e obstruem as pequenas partículas de matéria orgânica inicialmente presas nos macroagregados. Observe as duas escalas diferentes para as estruturas prismáticas e granulares. (Diagrama de cortesia de R. Weil)

A maioria dos grandes peds é composta por, e podem ser divididos em, peds menores ou agregados (Figura 1.11). A rede de **poros** dentro e entre os agregados constituem um aspecto chave da estrutura do solo (ver Seção 1.7). A rede de poros tem grande influência no movimento de ar e água, no crescimento de raízes de plantas, e na atividade dos organismos do solo, incluindo o acúmulo e decomposição da matéria orgânica. Práticas como extração de madeira, pastagem, plantio, o tráfego, e adubação impactam amplamente os solos por meio de seus efeitos na estrutura do solo, principalmente nos horizontes superficiais.

As forças biológicas, químicas, e físicas envolvidas na formação, estabilização e manejo dos agregados do solo de vários tamanhos serão discutidas na Seção 1.5 e 1.6. Primeiramente, iremos examinar a natureza e tipos de estruturas observados nos perfis de solo.

Tipos de Estrutura do Solo¹

Muitos tipos e formas de agregados ocorrem em solos, frequentemente dentro de diferentes horizontes de um perfil

¹ No Manual de Pesquisa de Solos dos Estados Unidos (USDA-NRCS, 2005), um único e maciço grão é descrito como desestruturado.

de solo particular. Alguns solos podem exibir uma condição estrutural em **grãos únicos**, na qual partículas não estão agregadas (Figura 1.12). A areia solta em dunas ou acúmulo de poeira solta como sedimentos recentemente depositados são exemplos dessa condição estrutural em grão único. No extremo oposto, alguns solos (como em certos sedimentos argilosos) ocorrem como grandes massas de material coeso e são descritos como mostrando uma condição estrutural **maciça**. No entanto, a maioria dos solos apresentam algum tipo de agregação e são compostos por agregados que podem ser caracterizados por sua forma (ou tipo), tamanho, e desenvolvimento (ou grau). As quatro principais formas de agregado do solo são esferoidal, laminar, prismática e em blocos (veja abaixo e Figura 1.13).



FIGURA 1.12 Uma raiz de planta crescendo em um solo de textura areia franca (90% de areia). O material parental do solo foi provavelmente bem separado pela ação de ondas em uma antiga praia resultando em grãos de areia de tamanho uniforme. Pouca agregação é evidente neste solo quase sem estrutura (ou estrutura em grãos únicos). A imagem foi tirada usando uma câmera minirhizotron de fibra óptica a cerca de 50 cm de profundidade no horizonte Bw de um Argissolo Vermelho Distrófico na planície costeira do Atlântico médio da América do Norte. (Foto cortesia de R. Weil e G. Chen, Universidade de Maryland)

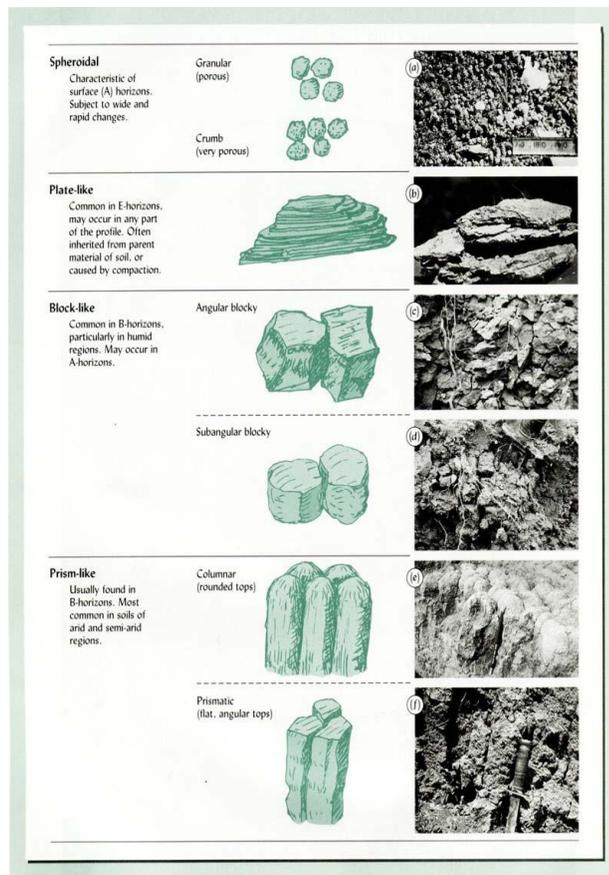


FIGURA 1.13 Os diferentes tipos (formas) de estrutura encontrados em solos minerais. Sua localização típica é sugerida. Os desenhos ilustram suas características essenciais e as fotos indicam como aparecem *no campo*. Por escala, observe o lápis com 15 cm de comprimento em (e) e a lâmina da faca com 3 cm de largura em (d) e (f). [Foto (e) cortesia de J. L. Arndt, Universidade do Estado de Dakota do Norte; as outras cortesia de R. Weil].

Esferoidal - Estrutura granular consiste de **agregados** esferoidais que podem ser separados uns dos outros em um arranjo ligeiramente comprimido (ver Figura 1.13a). Eles normalmente variam de menos de 1 até maiores que 10 milímetros em diâmetro. Em referência a este tipo de estrutura, o termo *agregado* é mais comum do que *ped*. A estrutura

granular caracteriza muitas superfícies de solos (normalmente horizontes A), particularmente aqueles ricos em matéria orgânica. Consequentemente, este é o principal tipo de estrutura de solo afetado pelo manejo. Agregados granulares são particularmente visíveis em solos de pastagens e em solos que têm atividade de minhocas.

Laminar -Estrutura laminada, caracterizada por agregados ou placas horizontais relativamente finas, que pode ser encontrada tanto nos horizontes superficiais como nos subsuperficiais. Na maioria dos casos, as placas têm se desenvolvido como um resultado dos processos de formação do solo. Entretanto, ao contrário de outros tipos de estrutura, a estrutura laminar também pode ser herdada do material de origem do solo, especialmente aqueles depositados por água ou gelo. Em alguns casos, a compactação em solos argilosos por máquinas pesadas, pode formar a estrutura laminar. (ver Figura 1.13b).

Blocos – Agregados em blocos são irregulares e praticamente cúbicos (Figura 1.14), e variam no intervalo de 5 a 50 mm de comprimento. Os blocos individuais não são moldados individualmente, mas são moldados pelas formas dos blocos adjacentes. Quando as bordas dos blocos são ângulos agudos e as faces distintas retangulares, o subtipo é chamado **bloco angular** (Figura 1.13c). Quando alguns arredondamentos têm ocorrido, os agregados são referidos como **blocos subangulares** (Figura 1.13d). Estes tipos são normalmente encontrados no horizonte B, onde eles promovem drenagem, aeração e penetração radicular.

Prismática - Estrutura colunar e prismática são caracterizadas por agregados semelhantes a prismas ou pilares orientados verticalmente que variam em altura entre os diferentes solos e podem ter um diâmetro de 150 mm ou mais. Estrutura colunar (ver Figura 1.13e), a qual possui pilares com partes superiores distintas e arredondadas, é encontrada principalmente em subsolos ricos em sódio (ou seja, horizontes nátricos; ver Seção 3.2). Quando as partes superiores dos prismas são relativamente angulares e horizontalmente planas, a estrutura é designada como prismática (ver Figura 1.13f). Ambas estruturas são normalmente associadas com tipos de argilas expansivas. A estrutura prismática ocorre comumente em horizontes subsuperficiais de regiões áridas e semiáridas e, quando bem desenvolvidas, fornecem uma característica muito marcante ao perfil (ver Figura 10.18). Em regiões úmidas, a estrutura prismática às vezes ocorre em solos mal drenados e em fragipãs (ver Figura 3.30).



FIGURA 1.14 Agregados de tamanho médio com estrutura forte e blocos angulares no horizonte B de um Nitossolo (Ustalf) em uma região semiárida. A faca é mostrada separando um agregado com estrutura em blocos. Observe o revestimento de coloração clara na superfície das argilas iluviais que ajudam a definir e unir os agregados. (Foto cortesia de R. Weil).

Descrição da Estrutura do Solo no Campo

Na descrição da estrutura do solo (ver Tabela 19.1), não é observada somente o *tipo* (forma) dos agregados estruturais presentes, mas também o tamanho relativo (pequeno, médio ou grande) e grau de desenvolvimento ou distinção dos agregados (*graus* como forte, moderado, ou fraco). Por exemplo, o solo mostrado na Figura 1.13d pode ser descrito como tendo “fraco, pequeno com estrutura em blocos subangulares”. Geralmente, a estrutura de um solo é facilmente

observada quando o solo está relativamente seco. Quando úmidos, os agregados estruturais podem expandir e pressionar os demais, tornando os agregados individuais menos definidos. Agora, nós iremos voltar nossa atenção para a informação e estabilização da estrutura do solo, particularmente os agregados granulares que caracterizam horizontes superficiais.

1.4 Formação e Estabilização dos Agregados do Solo

A agregação granular da superfície dos solos é uma propriedade do solo altamente dinâmica. Alguns agregados se desintegram e outras novas formas como mudança das condições do solo. Geralmente, os menores agregados são mais estáveis que os maiores, então a manutenção dos tão apreciados grandes agregados exige muito cuidado. Vamos discutir meios práticos de manejo da estrutura do solo depois de considerar os fatores responsáveis pela formação e estabilidade dos agregados.

Organização Hierárquica dos Agregados do Solo²

Os horizontes superficiais são normalmente caracterizados pela estrutura granular arredondada que apresenta uma hierarquia na qual **macroagregados** (0,25 a 5 mm de diâmetro) relativamente grandes são compostos de **microagregados** (2 a 250 µm) menores. Estes últimos, por sua vez, são compostos de pequenos agrupamentos de argila e matéria orgânica com apenas alguns µm de comprimento. Pode-se facilmente demonstrar a existência dessa *hierarquia de agregação* selecionando alguns dos maiores agregados de um solo e, cuidadosamente, esmagando-os ou escolhê-los a parte para separá-los em muitos pedaços de menor tamanho. Então, tente esfregar o menor desses pedaços de solo entre o polegar e o indicador. Percebe-se que até mesmo as menores partículas de solo, geralmente, dividem-se em uma mancha de partículas ainda menores de argila, silte e húmus. A organização hierárquica dos agregados parece ser uma característica da maioria dos solos, com exceção de certos Latossolos e alguns Neossolos muito jovens. Pequenas partículas de matéria orgânica estão, muitas vezes, oclusas no interior de macro e microagregados. Em cada nível na hierarquia de agregados, diferentes fatores são responsáveis pela agregação das sub unidades.

Fatores que influenciam a formação e estabilidade de agregado nos solos

Ambos os processos biológicos e físico-químicos (abióticos) estão envolvidos na formação dos agregados do solo. Os processos físico-químicos tendem a ser mais importantes nas menores dimensões, e os processos biológicos nas maiores. Os processos físico-químicos de formação de agregados estão principalmente associados com argilas e, portanto, tendem a ser de maior importância em solos de textura fina. Em solos arenosos que possuem pouca argila, a agregação é quase totalmente dependente de processos biológicos.

Processos físico-químicos

Os mais importantes entre os processos físico-químicos são (1) floculação, a atração mútua entre argila e moléculas orgânicas; e (2) a expansão e contração das massas de argila.

² A organização hierárquica dos agregados do solo e o papel da matéria orgânica do solo na sua formação foram apresentados pela primeira vez por Tisdall e Oades (1982). Para uma revisão dos avanços nessa área durante as duas décadas seguintes, ver Six et al. (2004).

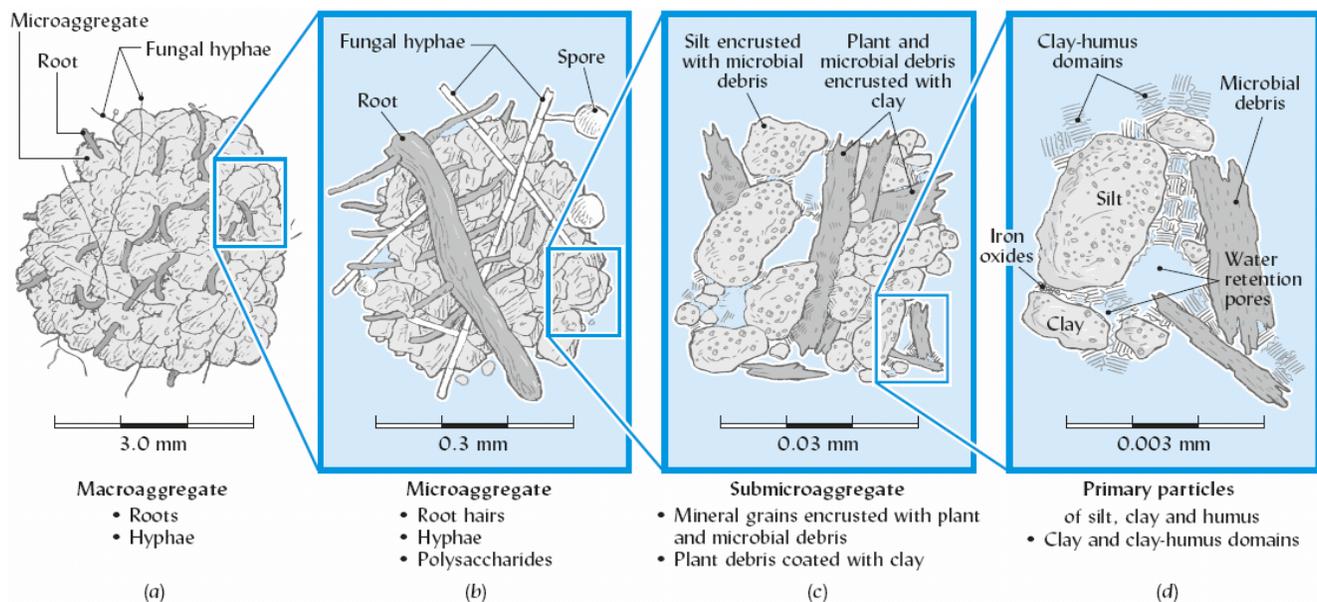


FIGURA 1.15 Agregados de maior tamanho são normalmente compostos de aglomerações de agregados de menor tamanho. A ilustração mostra quatro níveis hierárquicos de agregação no solo. Os diferentes fatores importantes para agregação em cada nível são indicados. (a) Um *macroagregado* composto por muitos *microagregados* unidos principalmente por uma rede pegajosa formada por hifas de fungos e raízes finas. (b) Um *microagregado*, consistindo principalmente de grãos finos de areia e pequenos aglomerados de silte, argila e substâncias orgânicas unidas por pelos radiculares, hifas de fungos e gomas produzidas por microrganismos. (c) Um *submicroagregado* muito pequeno consistindo de partículas finas de silte cobertas com matéria orgânica e pequenas partes de plantas e microrganismos (chamada *matéria orgânica particulada*), cobertas com arranjos ainda menores de argila, húmus, e óxidos de Fe ou Al. (d) Aglomerados de partículas de argila interagindo com óxidos de Fe ou Al e polímeros orgânicos na menor escala. Estes aglomerados ou *agrupamentos* organo-argilosos são ligados às superfícies das partículas de húmus e partículas minerais de menor tamanho. (Diagrama cortesia de R. Weil)

Floculação das argilas e a função dos cátions adsorvidos - Exceto em solos muito arenosos que são quase desprovidos de argila, a agregação começa com a **floculação** das partículas de argila em aglomerados microscópicos (Figura 1.16). Se duas partículas de argila aproximarem-se o suficiente, cátions comprimidos na camada entre elas atrairão as cargas negativas das duas partículas, servindo assim como pontes que mantêm as partículas unidas. Estes processos conduzem a formação de uma pequena “pilha” de partículas paralelas de argila, denominado *agrupamento de argila*. Outros tipos de agrupamentos de argila são mais aleatórios na orientação, se assemelhando a uma casa de cartas. Eles se formam quando as cargas positivas nas bordas das partículas de argila atraem as cargas negativas nas superfícies planas (Figura 1.16). Cátions polivalentes (por exemplo, Ca^{+2} , Fe^{+2} e Al^{+3}) também se complexam com moléculas hidrofóbicas de húmus, permitindo que se liguem às superfícies da argila. As partículas de argila/húmus formam pontes que unem umas as outras e às finas partículas de silte (principalmente quartzo), criando o agrupamento de menor dimensão na hierarquia dos agregados do solo (Figura 1.15d). Estes agrupamentos, auxiliados pela influência floculante dos cátions polivalentes (por exemplo, Ca^{+2} , Fe^{+2} e Al^{+3}) e do húmus, fornecem grande parte da estabilidade em longo prazo dos *microagregados* menores (< 0,25 mm). Em certos solos argilosos altamente intemperizados (Argissolos e Latossolos) a ação cimentante dos óxidos de ferro e outros componentes inorgânicos produzem pequenos agregados muito estáveis, chamados de **pseudo-areia**.

Quando cátions monovalentes, especialmente o Na^{+} (ao invés de outros cátions polivalentes como Ca^{+2} ou Al^{+3}) são proeminentes, como em alguns solos de regiões áridas e semiáridas, as forças de atração não são capazes de superar a repulsão natural entre partículas de argila carregadas negativamente (Figura 1.16). As partículas de argila não podem se aproximar o suficiente para flocular, assim permanecem na sua forma dispersa, em condição semelhante a um gel, que faz com que o solo se torne quase sem estrutura, impermeável à água e ao ar, e indesejado para suportar o crescimento de plantas (ver Seção 10.6).

Mudanças de volume em materiais argilosos. À medida que o solo seca e a água é retirada, as partículas nos agrupamentos de argila se aproximam, fazendo com que os agrupamentos e, portanto, a massa de solo se contraia em volume. Quando a massa de solo se contrai, fissuras se abrem ao longo das linhas de fraqueza. Ao longo de muitos ciclos (como ocorre entre os eventos de chuva ou irrigação no campo), a rede de fissuras se torna melhor definida. As raízes das plantas também possuem um efeito distinto na secagem à medida que retiram a umidade do solo em suas imediações. A absorção de água, especialmente por raízes fibrosas de gramíneas perenes, acentua os processos físicos de agregação associados aos ciclos de umedecimento e secagem. Este efeito é uma das muitas maneiras em que processos físicos e biológicos interagem no solo.

Os ciclos de congelamento e descongelamento têm um efeito similar, uma vez que a formação de cristais de gelo é

um processo de secagem que também retira água dos agrupamentos de argila. As ações de expansão e contração que acompanham os ciclos de congelamento-descongelamento e umedecimento-secagem nos solos criam fissuras e pressões que, alternadamente, separam grandes massas de solos e comprimem partículas do solo em agregados estruturais definidos. Os efeitos de agregação destes ciclos de temperatura e umidade são mais pronunciados em solos com elevado teor de argilas expansivas (ver Capítulo 8), especialmente Vertissolos, Molissolos e alguns Luvisolos (ver Capítulo 3).

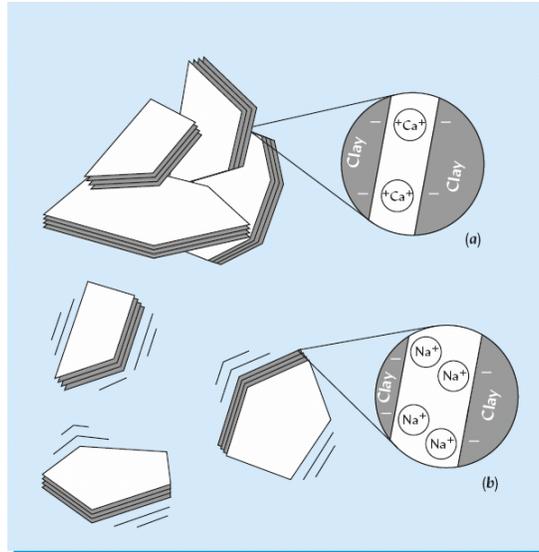


FIGURA 1.16 A função dos cátions e bactérias na flocculação das argilas. (a) Os cátions di e trivalentes, como Ca^{+2} e Al^{+3} , são fortemente adsorvidos e podem, efetivamente, neutralizar as cargas negativas na superfície das partículas de argila. Estes cátions também podem formar pontes que unem estas partículas. (b) Íons monovalentes, especialmente o Na^+ , com um raio hidratado relativamente grande, podem provocar repulsão entre as partículas de argila, criando uma condição de dispersão. Três fatores contribuem com a dispersão: (1) o íon hidratado de sódio, com tamanho relativamente grande, não se aproxima o suficiente da partícula da argila para efetivamente neutralizar as cargas negativas e (2) a única carga do sódio não é eficiente em formar pontes entre as partículas de argila, e (3) comparados aos íons di ou trivalentes, 2 ou 3 vezes mais íons monovalentes devem se agrupar entre as partículas de argila, a fim de neutralizar as cargas da superfície da argila. (c) de acordo com as cargas em suas paredes celulares e compostos pegajosos exsudados, as bactérias (claro) podem floccular as partículas de argila (escuro) como mostrado na imagem do tomógrafo de raio-X. [Diagramas (a) e (b) de cortesia de R. Weil; diagrama (c) de Thieme et al., 2003]

Processos Biológicos

Atividades de organismos do solo. Dentre os processos biológicos de agregação, os mais notáveis são (1) as atividades de escavação e moldagem dos animais de solo, (2) a aglutinação de partículas por redes pegajosas de raízes e hifas de fungos, e (3) a produção de gomas orgânicas por microrganismos, especialmente bactérias e fungos. Minhocas (e cupins) deslocam partículas de solo, muitas vezes ingerindo e formando-as em agregados ou grumos (ver Capítulo 11). Em alguns solos de floresta, o horizonte superficial consiste principalmente de agregados formados por minhocas (ver, por exemplo, Figura 1.13a). As raízes das plantas também movem partículas à medida que abrem caminho através do solo. Este movimento pressiona as partículas de solo a entrarem em contato uma com outras, estimulando a agregação. Ao mesmo tempo, os canais criados pelas raízes das plantas e pelos organismos do solo servem como macroporos, quebrando torrões e ajudando a definir as unidades estruturais de maior tamanho do solo.

As raízes das plantas (principalmente pelos radiculares) e hifas de fungos exsudam polissacarídeos semelhantes a açúcares e outros compostos orgânicos, formando redes pegajosas que unem as partículas do solo e os pequenos microagregados em macroagregados maiores (Figura 1.15a e Figura 1.19). Os fungos filamentosos que se associam com raízes de plantas (denominados *micorrizas*; ver Seção 11.9) produzem uma proteína pegajosa do açúcar denominada glomalina, que, provavelmente, é um eficiente agente cimentante (Quadro 1.4).

As bactérias também produzem polissacarídeos e outras gomas orgânicas à medida que elas decompõem os resíduos de plantas. Os polissacarídeos bacterianos são mostrados entremeados com argila em uma escala muito pequena na Figura 1.20. Muitas destas raízes e gomas orgânicas produzidas por microrganismos resistem à dissolução pela água e, portanto não apenas aumentam a formação dos agregados do solo, mas também ajudam a assegurar sua estabilidade por períodos de meses até alguns anos. Estes processos são mais observados em solos superficiais, onde a atividade de raízes e animais, e a acumulação de matéria orgânica são maiores.

QUADRO 1.4 GLOMALINA E AGREGADOS LEVAM SIMBIOSE A OUTRO NÍVEL^a

Cientistas continuam a descobrir novas maneiras em que microrganismos do solo, especialmente os fungos, ajudem a criar e estabilizar os agregados do solo. Certos fungos micorrízicos vivem em simbiose com as raízes de muitas plantas, nativas e cultivadas. As plantas fornecem ao fungo açúcares e o fungo ajuda as plantas a obter nutrientes do solo. Recentemente, cientistas descobriram uma mistura de glicoproteínas (açúcar-proteínas), chamada glomalina, que são produzidas pelas hifas desses fungos. Embora a função da glomalina no fungo ainda esteja sobre investigação, quantidades substanciais de proteínas relacionadas a ela têm sido identificadas nos solos. Acredita-se que essas glicoproteínas ligadoras de Ferro são bem resistentes e portanto são acumuladas em altos níveis nos solos.

Várias observações apontam para os seguintes papéis das glomalinas nos solos. (1) As proteínas relacionadas as glomalinas são usualmente encontradas em altas concentrações em agregados estáveis ao invés de em agregados não estáveis, tanto em solos temperados como tropicais. (2) Utilizando técnicas de imunofluorescência, cientistas do solo podem detectar proteínas relacionadas a glomalina nas superfícies dos agregados do solo (Figura 1.17). (3) Um experimento utilizando pequenas e grandes esferas de vidro para simular solos não agregados e agregados, sugere que os fungos possam produzir glomalina parcialmente para aumentar a agregação do solo e criar poros maiores que permitam um crescimento melhor de suas hifas (Figura 1.18). Raízes de cenoura e fungos micorrízicos foram cultivados em contêineres com barreiras, que permitiam o crescimento do fungo, mas não das raízes, em câmaras preenchidas com esferas de vidro largas (1 mm de diâmetro) ou minúsculas (0,1 mm de diâmetro). Embora o crescimento radicular e a infecção pelos fungos micorrízicos tenha sido praticamente igual para os dois tipos de esferas, as hifas nas esferas menores cresceram apenas 1/6 do tamanho das hifas nas esferas maiores, sugerindo que a falta de poros maiores pode restringir o crescimento dos fungos nos solos. Entretanto, as hifas que cresceram nas esferas menores produziram 7 vezes mais glomalina total e 44 vezes mais glomalina por unidade de comprimento de hifa, quando comparadas as hifas das esferas maiores.

Portanto, parece que o investimento da fotossíntese das plantas (açúcar) na relação com o fungo, pode indiretamente ajudar a estimular um solo com melhor agregação, o qual é mais adequado para a sobrevivência e para o crescimento, tanto de plantas como de fungos. Gerentes agrícolas podem tomar vantagem desse conhecimento ao utilizar práticas, como redução do preparo do solo e aplicação de cobertura morta, que favoreçam os fungos que estimulam a agregação do solo.

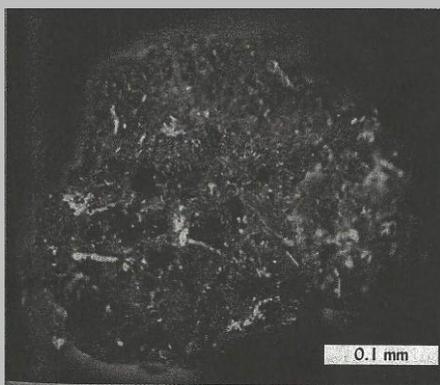


FIGURA 1.17 Agregados do solo com áreas brancas fluorescentes, indicando a presença de glomalina devido sua reação com um anticorpo específico. (Imagem cortesia de Kris Nichols, USDA/ARS, Mandadn, ND)

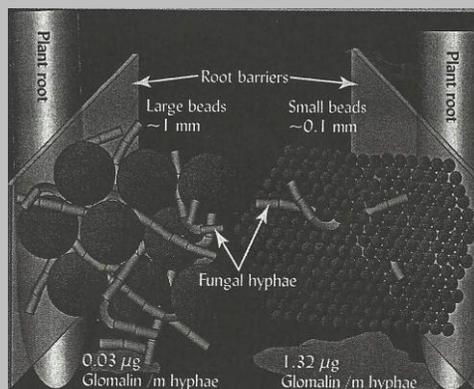


FIGURA 1.18 Experimento sugerindo que os fungos produzem glomalina parcialmente para agregar o solo e criar poros largos que permitam o melhor crescimento das hifas. (Diagrama cortesia de R. Weil, com base em dados de Rilling e Steinberg, 2002)

^a Para correlação entre as proteínas da glomalina e a agregação do solo, veja Wright e Anderson (2000); para uma atualização da natureza das proteínas relacionadas a glomalina veja Rilling (2004).

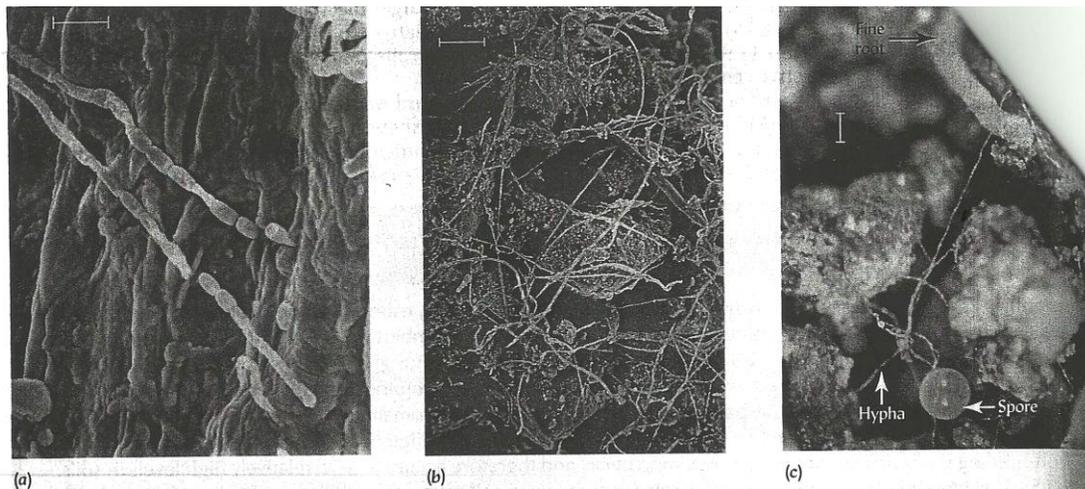


FIGURA 1.19 Hifas de fungos aglomerando partículas de solos em agregados. (a) Visão aproximada de uma hifa crescendo sobre a superfície de um grão mineral incrustado com microrganismos. Bar = 10 μm . (b) Um estágio avançado de agregação durante a formação de um solo de dunas de areia. Repare que a rede de hifas de fungos e o encrostamento de grãos minerais com restos orgânicos. Bar = 50 μm . (c) Associação com raiz por hifa de um fungo do gênero *Gigaspora*, interconectando partículas de um solo franco arenoso do Oregon. Repare também o esporo do fungo e a raiz da planta. Bar = 320 μm . [Fotos (a) e (b) cortesia de Sharon L. Rose, Universidade de Willamette; foto (c) cortesia de R. P. Schreiner, USDA-ARS, Corvallis, Or].

Influência da matéria orgânica. Na maioria dos solos da região temperada, a formação e estabilização dos agregados granulares é principalmente influenciada pela matéria orgânica do solo (ver Figura 1.21). A matéria orgânica fornece o substrato energético que torna possível a, anteriormente mencionada, atividade biológica. Durante o processo de agregação, as partículas minerais do solo (silte e areia fina), são cobertas com resíduos decompostos de plantas e outros materiais orgânicos. Durante o processo de agregação, as partículas minerais do solo (silte e areia fina) tornam-se revestidas e incrustadas com pedaços de resíduos vegetais em decomposição e outros materiais orgânicos. Polímeros orgânicos complexos resultantes do declínio da interação química com partículas de argila silicatada e óxidos de ferro e alumínio. Estes compostos ajudam a orientar argilas em conjuntos (agrupamentos), que formam pontes entre as partículas individuais do solo, assim ligando-as em agregados estáveis em água (ver Figura 1.15d). A Figura 1.20 pode-se observar diretamente os polímeros das bactérias e os agrupamentos organo-minerais que unem as partículas de solo.

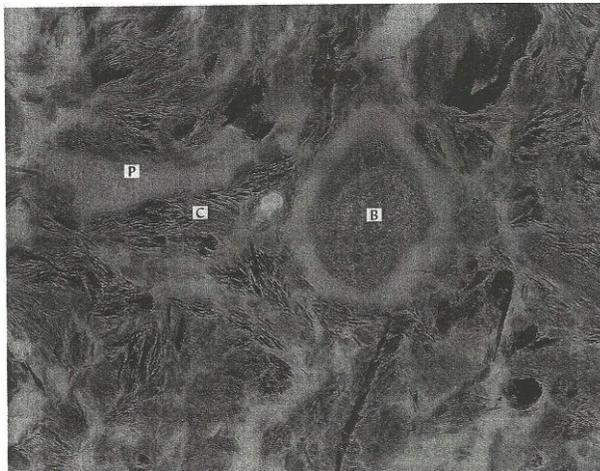


FIGURA 1.20 Uma ilustração de microscopia eletrônica de varredura mostrando a interação entre materiais orgânicos e argilas silicatadas em agregados estáveis em água. Os materiais de coloração escura (C) são grupos de partículas de argila que estão interagindo com polissacarídeos orgânicos (P). Uma bactéria (B) também está envolta por polissacarídeos. Note a orientação geralmente paralela das partículas de argila, característico de agrupamentos de argila. [De Emerson et al., 1986; fotografia fornecida por R. C. Foster, CSIRO, Glen Osmond, Austrália].

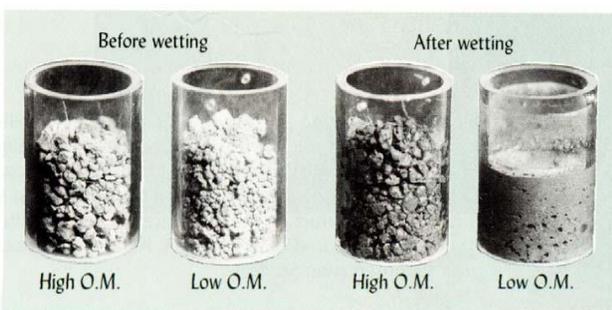


FIGURA 1.21 Agregados de solos com alto teor de matéria orgânica são muito mais estáveis que aqueles provenientes de solos com baixo teor deste constituinte. Os agregados com baixo teor de matéria orgânica se desfazem quando umedecidos; aqueles com alto teor em matéria orgânica mantêm sua estabilidade. (Foto cortesia de N. C. Brady)

QUADRO 1.5 PREPARANDO UMA BOA CAMADA PARA A SEMEADURA

No começo da época de crescimento da cultura, uma das principais atividades de um agricultor é a preparação de uma boa cama de semente para assegurar que o plantio seja uniforme e as plantas cresçam rapidamente, uniformemente, e bem espaçadas.

Uma boa cama de semente consiste de solo solto suficiente para possibilitar fácil alongamento das raízes e emergência das sementes (Figura 1.22). Ao mesmo tempo, ela deve ser acondicionada firmemente, de maneira a assegurar um bom contato entre a semente e a água do solo para que a semente possa embeber-se de água facilmente no início do processo de germinação. A camada deveria ser também livre de grandes torrões. As sementes poderiam cair entre tais torrões e se alojarem em profundidades que impeçam uma emergência apropriada, além de não manter contato suficiente com o solo.

O preparo pode ser preciso para desfazer camadas de solo compactado, ajudando no controle de ervas daninhas e, no caso de climas frios, ajudando o solo a secar e se aquecer mais rapidamente. Por outro lado, a cama de semente pode ser preparada com pouco ou nenhum preparo do solo, se as condições de solo e clima são favoráveis e se uma cobertura morta ou algum herbicida é usado para controlar as plantas daninhas.

Plantadores mecânicos podem ajudar na manutenção de uma boa cama de semente. Muitos plantadores são equipados com discos de metal afiados projetados para trilhar um caminho através dos resíduos de plantas na superfície do solo. Máquinas de plantio direto, usualmente, além dos discos de corte, possuem dois discos de metal afiados chamados de “disco duplo desencontrado articulado” que abrem um sulco no solo, no qual as sementes são lançadas (Figura 1.23). Muitos plantadores também têm uma roda que pressiona o solo e segue atrás do lançador de sementes, adensando o solo suficientemente para assegurar que o sulco se feche e a semente seja colocada em contato com a água contida no solo.

Idealmente, apenas uma estreita faixa na linha de semente é preparada para criar uma zona de germinação da semente, enquanto que o solo entre as linhas da cultura é deixado o mais solto possível para possibilitar uma boa zona de enraizamento. A superfície de enraizamento pode ser deixada com um aspecto rugoso da superfície para aumentar a infiltração de água e diminuir a erosão. Os mesmos princípios podem ser aplicados para um jardineiro que esteja fazendo a semente com as mãos.



FIGURA 1.22 Uma semente de feijão emergindo em um canteiro (Foto cortesia de R. Weil)

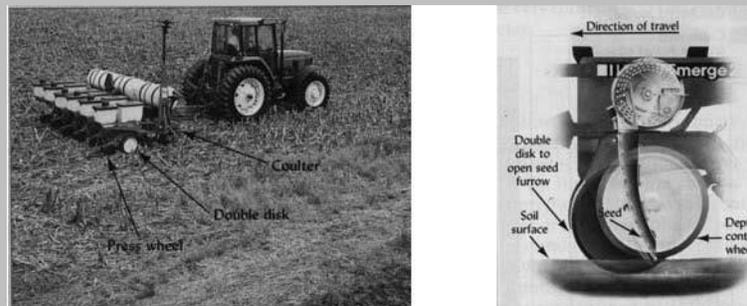


FIGURA 1.23 Uma máquina de plantio direto em ação e um diagrama mostrando como ela funciona. (Foto e diagrama cortesia de Deere & Company, Moline)



FIGURA 1.24 Solo desestruturado (à esquerda) e solo bem granulado (à direita). Raízes de plantas e especialmente húmus são fatores principais na granulação do solo. Deste modo, gramíneas tendem a estimular o desenvolvimento de uma estrutura granular no horizonte superficial de solos cultivados (Cortesia do USDA - Serviço de Conservação de Recursos Naturais).

Influência do cultivo do solo. O cultivo do solo pode ter efeitos favoráveis ou desfavoráveis sobre a agregação. Se o solo não está muito úmido ou muito seco, o cultivo pode quebrar os torrões em agregados naturais, criando, temporariamente, uma condição de solo solto e poroso favorável ao fácil crescimento de raízes jovens e à emergência das plântulas presentes (ver Quadro 1.5). O cultivo do solo também pode incorporar matéria orgânica no solo e matar plantas daninhas.

Durante longos períodos, no entanto, o cultivo do solo muito se acelera a perda oxidativa da matéria orgânica, assim, enfraquece os agregados do solo. As operações de cultivo do solo, especialmente se conduzidas com solo úmido, também tendem a esmagar ou destruir os agregados do solo, resultando em redução da macroporosidade e a criação de uma condição *compactada* (ver Figura 1.24).

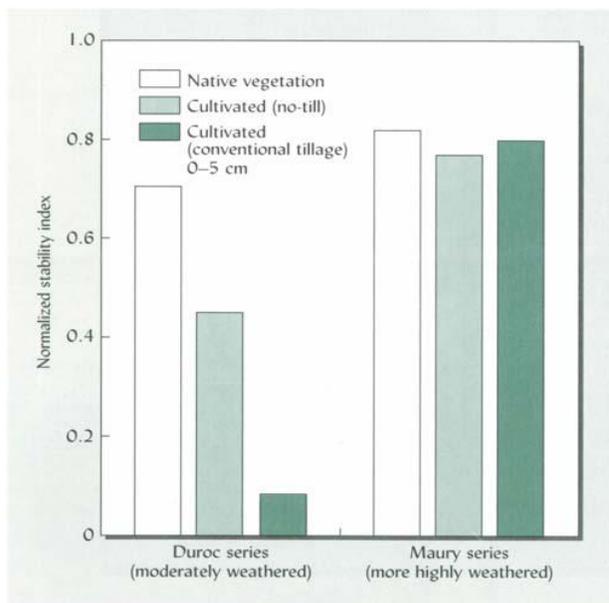


FIGURA 1.25 A interação da matéria orgânica do solo com a fração argila de solos moderadamente intemperizados como os das séries Duroc explica é responsável por grande parte da estabilidade dos agregados destes solos. Consequentemente, quando esses solos são cultivados, a estabilidade dos agregados declina, já que tal cultivo e diminui o conteúdo de matéria orgânica, especialmente quando se utiliza o manejo convencional. Em contraste, em solos altamente intemperizados como os das séries Maury, a estabilidade dos agregados é menos dependente dos teores de matéria orgânica que da interação dos compostos de óxido de ferro com certos silicatos de argila como a caulinita. O sistema de manejo utilizado também tem causado efeitos na estabilidade dos agregados altamente intemperizados. Esta figura sugere que solos cultivados nos trópicos em solos altamente intemperizados têm maior estabilidade de agregados em comparação com solos similares de zonas temperadas. (Retirado de Six et al. (2000))

Influência dos óxidos de ferro e alumínio. Muitos dos solos altamente intemperizados dos trópicos (especialmente Latossolos) possuem grande quantidades de sesquióxidos de ferro e alumínio (em grande parte na forma amorfa) que revestem as partículas do solo e cimentam os agregados do solo, prevenindo assim sua pronta desagregação quando o solo é cultivado. Comparado aos solos de regiões mais temperadas com quantidades similares de matéria orgânica, como os solos tropicais, tendem a ter maior estabilidade de agregados, e sua agregação é menos dependente da matéria orgânica no solo (Figura 1.25).

1.5 Preparo e Manejo Estrutural do Solo

Quando protegidos sob vegetação densa e não perturbados pelo cultivo, a maioria dos solos (exceto talvez alguns solos com vegetação escassa em regiões áridas) possui estrutura superficial suficientemente estável para permitir uma rápida infiltração de água e prevenir o encrostamento. Porém, para o gestor de solos cultivados, o

desenvolvimento e manutenção da estabilidade superficial da estrutura do solo é o maior desafio. Muitos estudos têm mostrado que agregação e propriedades desejáveis do solo como a taxa de infiltração de água, diminuem sob longos períodos de cultivo na linha da cultura (Tabela 1.3).

Cultivo e Manejo do Solo

Simplesmente definida, o **manejo** se refere à condição física do solo em relação ao crescimento de plantas. O manejo não depende apenas da formação e estabilidade dos agregados, mas também de fatores como densidade do solo (ver Seção 1.7), teor de água no solo, grau de aeração, taxa de infiltração de água, drenagem, e capacidade de retenção de água. Como seria de esperar, o manejo muda frequentemente, rapidamente e consideravelmente. Por exemplo, a trabalhabilidade de solos de textura fina pode ser alterada drasticamente por uma pequena mudança na umidade.

Um importante aspecto do manejo é a **friabilidade** do solo (ver também Seção 1.9). Solos são considerados friáveis se seus torrões não estão pegajosos ou duros, mas se quebram facilmente, revelando seus agregados constituintes. Geralmente, a **friabilidade do solo** é maior quando a **força tênsil** (ou seja, a força necessária para separar) de agregados individuais é relativamente alta comparada à força tênsil dos torrões. Esta condição permite que as forças de cultivo ou escavação facilmente quebrem os grandes torrões, enquanto os agregados resultantes permaneçam estáveis. Como seria de esperar, a friabilidade pode ser afetada significativamente por mudanças no conteúdo de água do solo, especialmente para solos de textura fina. Cada solo, normalmente tem um teor de água ideal para maior friabilidade (Figura 1.26).

Solos argilosos são especialmente propensos a encharcamento e compactação devido à sua alta plasticidade e coesão. Quando solos argilosos encharcados secam, eles normalmente tornam-se densos e duros. O momento adequado para o tráfego é mais difícil em solos argilosos do que em solos arenosos, pois solos argilosos levam muito mais tempo para secar a uma umidade adequada e, também podem se tornar muito secos para trabalhar facilmente. O aumento do teor de matéria orgânica do solo, normalmente, aumenta a friabilidade do solo e pode aliviar parcialmente a suscetibilidade de um solo argiloso a danos estruturais durante o cultivo e tráfego (Figura 1.27).

Alguns solos argilosos de regiões tropicais úmidas são mais facilmente manejados que aqueles descritos anteriormente. A fração argila destes solos é dominada por óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio, os quais não são tão plásticos, pegajosos e difíceis de serem trabalhados. Estes solos podem ter propriedades físicas muito favoráveis, desde que retenha grandes quantidades de água, porém tenha agregados estáveis que respondam como solos arenosos ao cultivo após chuva.

Agricultores em regiões temperadas geralmente encontram seus solos muito úmidos para o cultivo pouco antes da época de plantio (início da primavera), enquanto agricultores em regiões tropicais podem enfrentar o problema inverso, de com solos muito secos para o cultivo pouco antes do plantio (fim da época seca). Em regiões tropicais e subtropicais com uma longa época seca, os solos devem ser cultivados em um estado muito seco a fim de preparar a terra para o plantio com o aparecimento das primeiras chuvas. O cultivo em tais condições de seca pode ser muito difícil e pode resultar em torrões duros se o solo contiver muita argila silicatada do tipo pegajosa.

TABELA 1.3 Efeito do tempo de cultivo de milho na matéria orgânica do solo, estabilidade dos agregados e infiltração^a, em cinco solos franco-siltosos do sudeste da França.

Em solos com baixos níveis de matéria orgânica, os agregados facilmente são destruídos pela ação da água, formando agregados menores e materiais dispersos que selam a superfície do solo e inibem a infiltração. Um nível de 3% de matéria orgânica no solo, pode ser suficiente para uma boa estabilidade estrutural nestes solos franco-siltosos de regiões temperadas.

<i>Tempo de Cultivo, anos</i>	<i>Matéria Orgânica, %</i>	<i>Estabilidade de Agregados (DMP^b), mm</i>	<i>Infiltração</i>	
			<i>% da chuva total</i>	<i>Antes do selamento, mm</i>
100	0,7	0,35	25	6
47	1,6	0,61	34	9
32	2,6	0,76	38	15
27	3,1	1,38	47	25
15	4,2	1,52	44	23

^a Infiltração é a quantidade de água que entra no solo quando 64 mm de “chuva” são aplicados durante um período de 2 horas.

^b DMP = diâmetro médio ponderado, ou tamanho médio dos agregados que permaneceram intactos após peneirados em água.

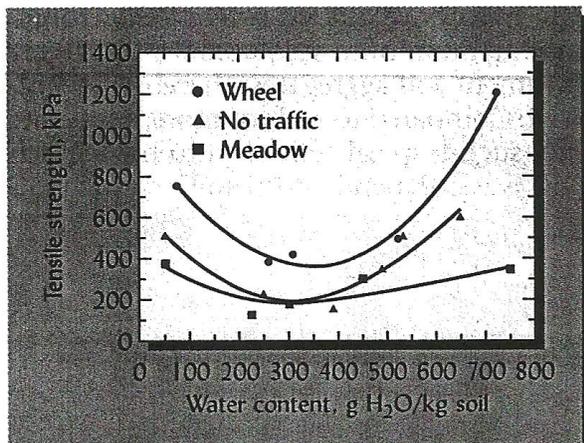


FIGURA 1.26 Influência do preparo e do tráfego do rodado sobre a resistência do solo em vários conteúdos de água. Resistência tênsil (medida em quilopascal, kPa) é a força necessária para quebrar torrões do solo. Quanto menor essa força, mais fácil é de destorrear esse solo e maior é sua friabilidade e trabalhabilidade. As duas curvas de cima representam o solo das trilhas dos rodados (●) e da porção não trafegada (Δ) de um solo argilo calcáreo cultivado na Inglaterra. A curva de baixo representam mesmo solo em uma campina adjacente não cultivada por anos (Υ). Parece haver um conteúdo de água ótimo em que o solo tem resistência tênsil mais baixa e por isso é mais friável (próximo a 300g/kg para este solo). Também, quanto menos trafegado e preparado, mais friável é o solo (menor resistência tênsil), especialmente quando muito seco ou muito úmido. [Retirado de Watts e Dexter (1997)].

Preparo Convencional e a Produção da Cultura

Desde a Idade Média, o arado de aiveca têm sido o implemento de preparo primário mais utilizado no mundo ocidental³. O seu propósito é elevar, girar e inverter o solo enquanto incorpora os resíduos de culturas e os detritos animais na camada arável (Figura 1.28). O arado de aiveca é normalmente complementado com o arado de disco, que é utilizado para cortar os resíduos e incorporá-los parcialmente ao solo. Nas práticas convencionais, como o cultivo primário é seguido por uma série de operações de cultivo secundárias, como gradagens para eliminar plantas daninhas e quebrar torrões, preparando assim uma cama de semeadura adequada.

Após o plantio da cultura, o solo pode receber outras operações secundárias de cultivo, com o objetivo de controlar plantas daninhas e romper o encrostamento superficial do solo. Na agricultura mecanizada, todas as operações de cultivo convencionais são realizadas com tratores e outros equipamentos pesados que podem trafegar sobre a área diversas vezes antes que a cultura seja finalmente colhida. Em muitas partes do mundo, os agricultores usam enxadas ou implementos de tração animal para revolver o solo. Apesar de humanos e animais de tração não serem tão pesados quanto tratores, seu peso é aplicado no solo em uma área relativamente pequena (pé ou casco), e assim também pode causar uma compactação considerável.

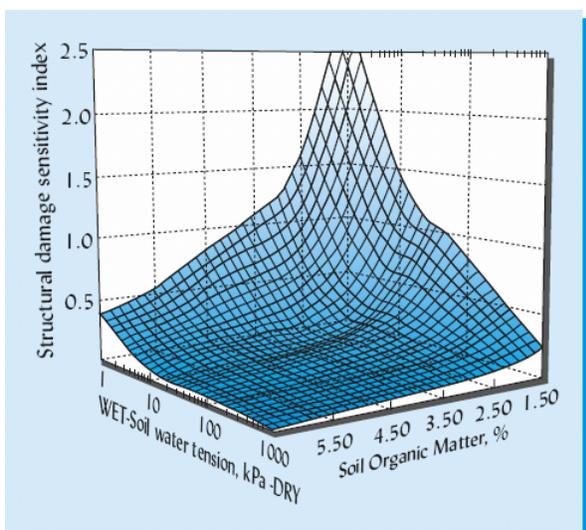


FIGURA 1.27 A Sensibilidade de solos de textura fina ao dano mecânico gerado pelo preparo é aumentado com o molhamento e reduzido pela matéria orgânica. O índice de sensibilidade no eixo vertical é baseado principalmente na tendência a dispersão de argila que está associada com a pulverização e a destruição dos agregados do solo. O solo é especialmente suscetível a esse tipo de dano quando excessivamente úmido (mais úmido do que a capacidade de campo definida na Seção 2.8). Também é evidente que um alto nível de material orgânico do solo ajuda a proteger a argila agregada durante o preparo do solo. As relações mostram-se aplicadas a solos argilosos e poderiam ser menos extremas em solos arenosos. [Gráfico baseado em dados de Watts e Dexter (1997)].

³ Para uma crítica antecipada, mas ainda valiosa do arado de aiveca, consulte Faulkner (1943).



FIGURA 1.28 Enquanto a ação exercida pelo arado de aiveca revira as camadas superiores do solo (15 a 20 cm) o contrabalanço abaixo força e compacta as camadas mais profundas. Esta zona compactada pode se desenvolver em um “pé de arado”. Isto pode ser facilmente compreendido se imaginarmos que ao levantarmos um peso nossos pés pressionam o chão abaixo (Foto cortesia de R. Weil).

Cultivo Conservacionista e Manejo do Solo

Nos últimos anos, têm sido desenvolvidos sistemas de manejo das terras agrícolas que minimizam a necessidade de cultivo do solo. Uma vez que estes sistemas deixam consideráveis quantidades de resíduos vegetais sobre ou perto da superfície do solo, protegendo-o contra a erosão (ver Seção 17.6 para uma discussão detalhada). Por esta razão, as práticas adotadas nestes sistemas são chamadas de *cultivo conservacionista*. O Departamento de Agricultura do Estados Unidos definem *cultivo conservacionista* como aquele que deixa pelo menos 30% da superfície do solo coberta por resíduos. A Figura 1.29 ilustra uma operação de plantio direto, onde uma cultura é plantada sobre resíduos de outra, com praticamente nenhuma mobilização. Outros sistemas de cultivo mínimo como a escarificação permitem alguma mobilização do solo, mas ainda assim deixam uma grande quantidade de resíduos de culturas na superfície. Estes resíduos orgânicos protegem o solo da ação do impacto das gotas de chuva e da ação abrasiva do vento, reduzindo, portanto, a erosão eólica e hídrica e mantendo a estrutura do solo.

Encrostamento Superficial do Solo

As gotas de água caindo durante chuvas pesadas ou irrigação por aspersão quebram os agregados expostos na superfície do solo. Em alguns solos, a diluição dos sais por esta água estimulam a dispersão das argilas. Uma vez que os agregados se dispersam, pequenas partículas e argila dispersa tendem a serem carregadas, obstruindo os poros do solo. Logo a superfície do solo é coberta com uma fina camada de um material fino e sem estrutura definida denominado **selamento superficial**. O selamento superficial inibe a infiltração de água e aumenta as perdas por erosão.

A medida que o selamento superficial seca, forma-se uma crosta endurecida. Plântulas, se emergir alguma, somente podem fazê-lo através do trincamento desta crosta. Um solo com formação de crostas é comparado com outro de agregados estáveis na Figura 1.30. A formação da crosta logo após a semeadura da cultura permitirá que poucas sementes emerjam, fazendo com que a cultura tenha que ser replantada. Em regiões áridas e semiáridas, o selamento e encrostamento do solo pode causar consequências desastrosas pelo aumento das perdas por escoamento superficial, deixando pouca água disponível para o crescimento das plantas.

O encrostamento pode ser minimizado mantendo-se alguma cobertura vegetal ou morta sobre o solo, reduzindo o impacto das gotas de chuva. Uma vez que a crosta se formou, pode ser necessário ajudar a cultura recentemente plantada pelo rompimento do encrostamento com um cultivo leve (como uma enxada rotativa), preferencialmente enquanto o solo ainda está úmido.



FIGURA 1.29 Uma ilustração de um sistema de cultivo conservacionista. O trigo está sendo colhido (no fundo) e a soja está sendo plantada (em primeiro plano). O sistema de plantio direto permite economia de custos em combustíveis, tempo e ajuda a conservar o solo. (Cortesia da Corporação de Allis-Chalmers)

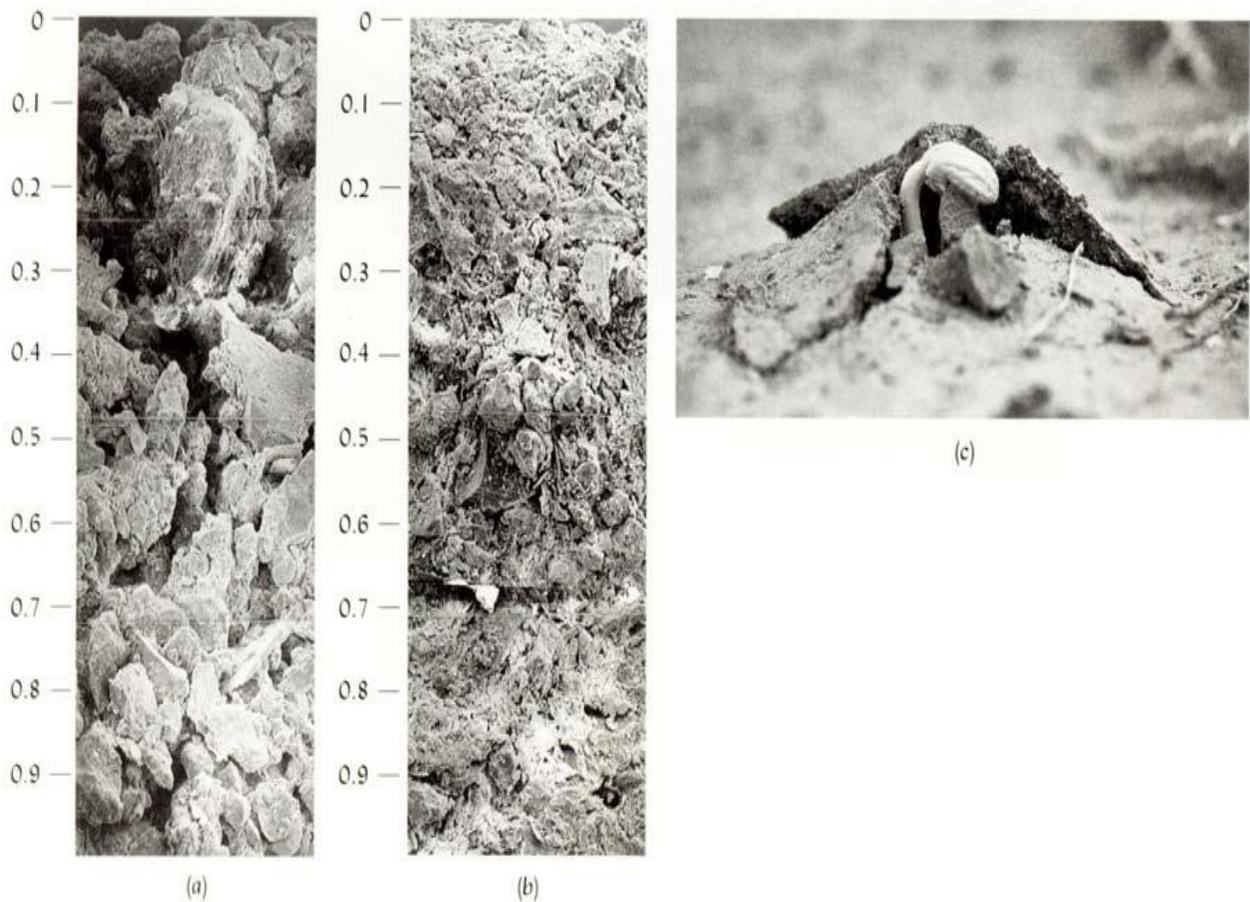


FIGURA 1.30 Micrografia eletrônica de varredura de uma camada superficial de 1 mm de solo com agregação estável (a) comparada com uma camada de agregados não estáveis (b). Note que os agregados na camada superior foram destruídos formando uma crosta superficial. A plântula de feijão (c) deve quebrar esta crosta superficial em seu processo de germinação. [Fotos (a) e (b) de O'Nofik e Singer (1984), usadas com permissão da Sociedade Americana de Ciência do Solo; foto (c) cortesia de R. Weil].

Condicionadores de solo

A melhoria do manejo da matéria orgânica do solo e uso de certos corretores de solo podem “condicionar” o solo e ajudar a prevenir a dispersão da argila e formação de encrostamentos (ver também Seção 10.10).

Gesso. O gesso (sulfato de cálcio) é amplamente disponível em sua forma extraída relativamente pura, ou como um componente principal de vários subprodutos industriais. O gesso tem se mostrado efetivo na melhora das condições físicas de muitos tipos de solo, desde alguns solos ácidos altamente intemperizados até alguns solos pouco salinos e com alto teores de sódio de regiões semiáridas (ver Capítulo 10). Os produtos de gesso mais solúveis fornecem eletrólitos suficientes (cátions e ânions) para promover a floculação e inibir a dispersão dos agregados, prevenindo, dessa forma, o encrostamento superficial. Experimentos de campo têm mostrado que solos tratados com gesso permitem uma maior infiltração e são menos sujeitos à erosão que solos não tratados. Da mesma forma, o gesso pode reduzir a resistência de camadas sub-superficiais, permitindo uma maior penetração das raízes e posterior absorção de água do subsolo pelas mesmas.

Polímeros Orgânicos. Alguns polímeros orgânicos sintéticos podem estabilizar a estrutura do solo da mesma maneira que fazem os polímeros orgânicos naturais, como os polissacarídeos. Enquanto grandes aplicações destes polímeros seriam inviáveis economicamente, tem sido apresentado que mesmo quantidades muito pequenas podem inibir efetivamente formação de crosta se aplicadas apropriadamente. Por exemplo, a poliácridamida (PAM) é efetiva na estabilização de agregados superficiais quando aplicada a taxas tão baixas quanto 1 a 15 mg.L⁻¹ na água de irrigação ou pulverizada a taxas tão baixas quanto 1 a 10 kg.ha⁻¹. A Figura 1.31 apresenta o efeito estabilizante de poliácridamidas sintéticas usadas na água de irrigação. Um conjunto de relatórios de pesquisa indicou que os melhores resultados podem ser obtidos combinando o uso de PAM e produtos de gesso.

Outros condicionadores de solo. Diversas espécies de algas que vivem próximas à superfície do solo são conhecidas por produzirem compostos estabilizadores de agregados muito eficientes. A aplicação de pequenas quantidades de preparados comerciais contendo essas algas pode trazer uma melhoria significativa a estrutura superficial do solo. A quantidade de corretivo necessária é muito pequena porque a alga, uma vez estabilizada no solo, podem se multiplicar.

Diversos materiais húmicos são comercializados por seus efeitos condicionadores de solo quando incorporados em baixas taxas (menos que 500 kg.ha⁻¹). No entanto, pesquisas cuidadosamente conduzidas em muitas universidades não conseguiram demonstrar que estes materiais têm afetado significativamente a estabilidade de agregados ou de rendimento, como alegado.

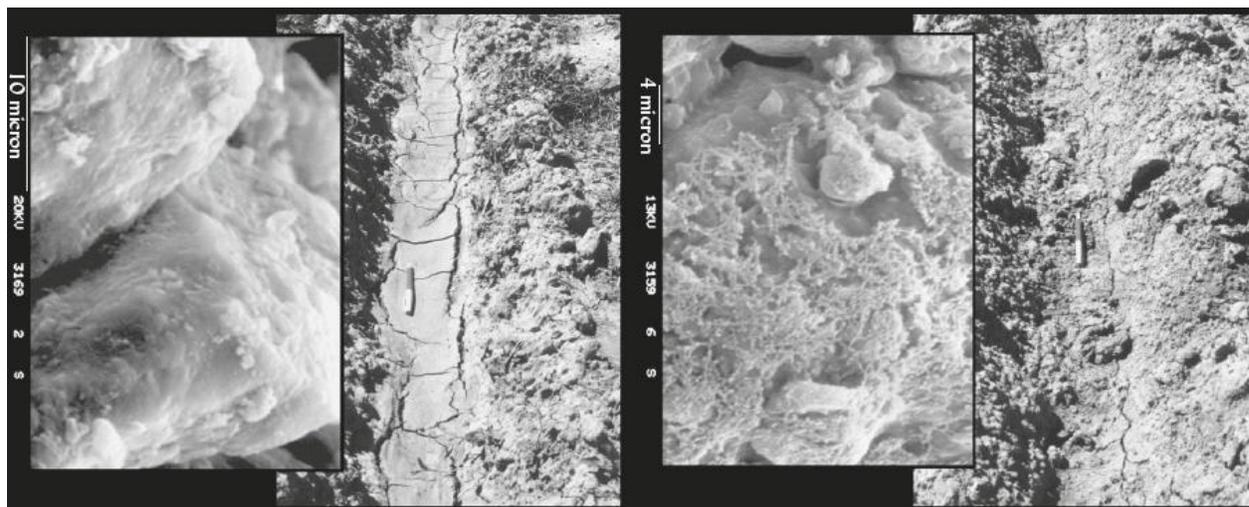


FIGURA 1.31. O efeito dramático da estabilização de uma poliácridamida sintética (PAM), que foi utilizada em doses de 1 a 2 kg.ha⁻¹ por irrigação em sulcos mostrados a direita, mas não nos sulcos mostrados a esquerda (note as canetas utilizadas como escala). PAM aumentou a infiltração de 15 a 50% em solos de textura média a fina. Micrografia eletrônica de varredura (escala na borda esquerda) revela a estrutura dos respectivos solos. Veja a rede parecendo malhas de PAM envolvendo as partículas de solos tratadas. Essa PAM pesa cerca de 12 a 15 Mg por mol de água com solução aniônica. [Fotos cortesia de C. Ross de Ross et al. (2003)]

Guia geral para o manejo do solo

Embora cada solo apresente problemas e oportunidades únicas, os seguintes princípios são geralmente relevantes no manejo do solo:

1. Minimizar o cultivo na lavoura, especialmente aração, gradagem e enxada rotativa, que reduzem a perda de

materiais orgânicos estabilizantes.

2. Sincronizar as atividade de tráfego de máquinas para ocorrer quando o solo estiver o mais seco possível e restringir o cultivo para períodos com ótimas condições de umidade do solo diminuirá a destruição da estrutura do solo.

3. Cobrindo a superfície do solo com resíduos de culturas ou adicionando matéria orgânica através de detritos vegetais, estimula a atividade de minhocas, e protege os agregados do solo do impacto das gotas de chuva e da radiação solar direta.

4. A adição de resíduos de culturas, compostos, e esterco de animais ao solo é uma medida efetiva em estimular os microrganismos no fornecimento de produtos decompostos que ajudam na estabilização dos agregados do solo.

5. A inclusão de gramíneas na rotação favorece a estabilização de agregados por ajudar a manter a matéria orgânica no solo, as raízes finas das plantas providenciam máxima influência na agregação e asseguram um período sem lavoura.

6. Usando cultivos de cobertura e adubo verde, onde esta prática fornece uma outra boa fonte de ação das raízes e matéria orgânica para o manejo estrutural do solo.

7. A aplicação do gesso (ou pedra calcária se o solo é ácido) ou em combinação com polímeros sintéticos podem ser muito úteis na estabilização dos agregados superficiais, especialmente em solos irrigados.

A manutenção de um alto grau de agregação é um dos mais importantes objetivos do manejo do solo. Isto é assim em grande parte porque a capacidade do solo em desempenhar as funções necessárias no ecossistema é fortemente influenciada pela porosidade e densidade do solo, propriedades que serão consideradas agora.

1.6 Densidade do Solo

Densidade de Partículas

A **densidade de partículas** D_p é definida como a massa por unidade de volume de *sólidos* do solo (ao contrário do volume do *solo*, que incluiria também o espaço entre as partículas). Assim, se 1 metro cúbico (m^3) de sólidos do solo pesa 2,6 megagramas (Mg), a densidade de partículas é de $2,6 \text{ Mg.m}^{-3}$ (que também pode ser expressa como 2,6 gramas por centímetro cúbico)⁶.

A densidade de partículas é basicamente o mesmo que **massa específica** de uma substância sólida. A composição química e estrutura cristalina de um mineral determinam sua densidade de partículas. A densidade de partículas *não* é afetada pelo espaço poroso, e conseqüentemente não está relacionada ao tamanho de partículas ou ao arranjo das partículas (estrutura do solo).

A densidade de partículas da maioria dos solos minerais varia entre os estreitos limites de 2,60 a 2,75 Mg.m^{-3} porque quartzo, feldspato, mica, e os coloides silicatados, que normalmente compõem a principal porção dos solos minerais, possuem densidade neste intervalo.

Para cálculos em geral relativos à superfície arável dos solos minerais (1 a 5% de matéria orgânica), uma densidade de partícula de cerca de $2,65 \text{ Mg.m}^{-3}$ pode ser assumida se a densidade de partícula real não é conhecida. Este número poderia ser ajustado para cima de $3,0 \text{ Mg.m}^{-3}$, ou superior, quando grandes quantidades de minerais de alta densidade como magnetita, granada, epidoto, zircão, turmalina, ou hornblenda estão presentes. Da mesma forma, seria reduzido para solos conhecidos por serem ricos em matéria orgânica, que tem uma densidade de partícula de apenas 0,9 a $1,4 \text{ Mg.m}^{-3}$.

Densidade do Solo

Outra importante medida de massa do solo é **densidade do solo** D_b , que é definida como a massa por unidade de volume de solo seco. Este volume inclui tanto sólidos como poros. Um estudo cuidadoso da Figura 1.32 deve deixar claro a distinção entre densidade de partículas e densidade do solo. Ambas expressões de densidade usam apenas a massa de sólidos em um solo; portanto, qualquer água presente é excluída da consideração.

Existem diversos métodos para determinação da densidade do solo baseados na obtenção de um volume conhecido de solo, secando-o para remoção da água, e obtendo-se sua massa seca⁷. Um equipamento especial de amostragem (Figura 1.13) pode obter uma amostra de volume conhecido sem perturbar a estrutura natural do solo. Para solos superficiais, talvez o método mais simples seja cavar um pequeno buraco, secar e pesar todo o solo escavado, e então determinar o volume do solo forrando o buraco com uma película plástica e preenchendo-o completamente com um volume conhecido de água. Este método é bem adaptado a solos pedregosos em que é difícil usar um amostrador.

⁶ Uma vez que $1 \text{ Mg} = 1$ milhão de gramas e $1 \text{ m}^3 = 1$ milhão de centímetros cúbicos, $1 \text{ Mg.m}^{-3} = 1 \text{ g.cm}^{-3}$.

⁷ Um método instrumental que mede a resistência do solo a passagem dos raios gama é usado na pesquisa do solo, mas não é discutido aqui.

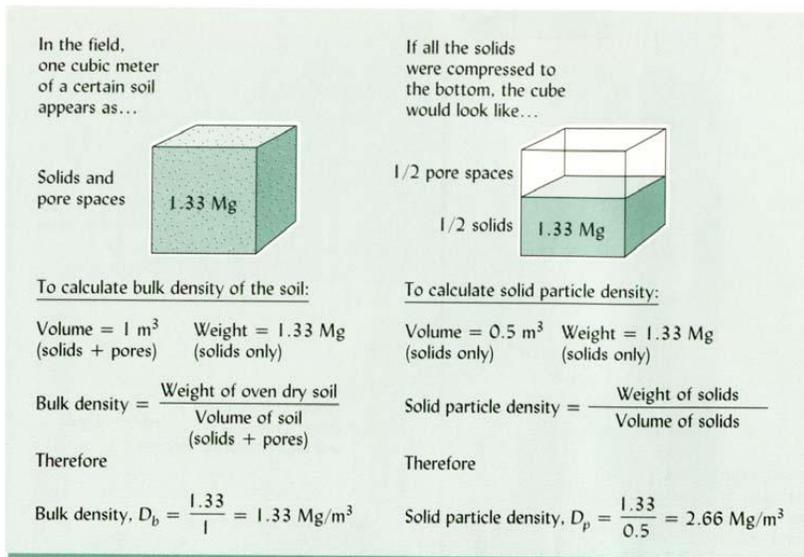


FIGURA 1.32 A Densidade do solo, D_b , e densidade de partículas do solo, D_p . Densidade do solo é a massa das partículas sólidas em um volume padrão de solo de um campo (sólidos mais espaço poroso ocupado por ar e água). Densidade de partículas é a massa de partículas sólidas em um volume padrão destas partículas sólidas. Siga os cálculos com cuidado e a terminologia deve ser clara. Neste caso específico, a densidade do solo é a metade da densidade de partículas, e os poros são 50%.

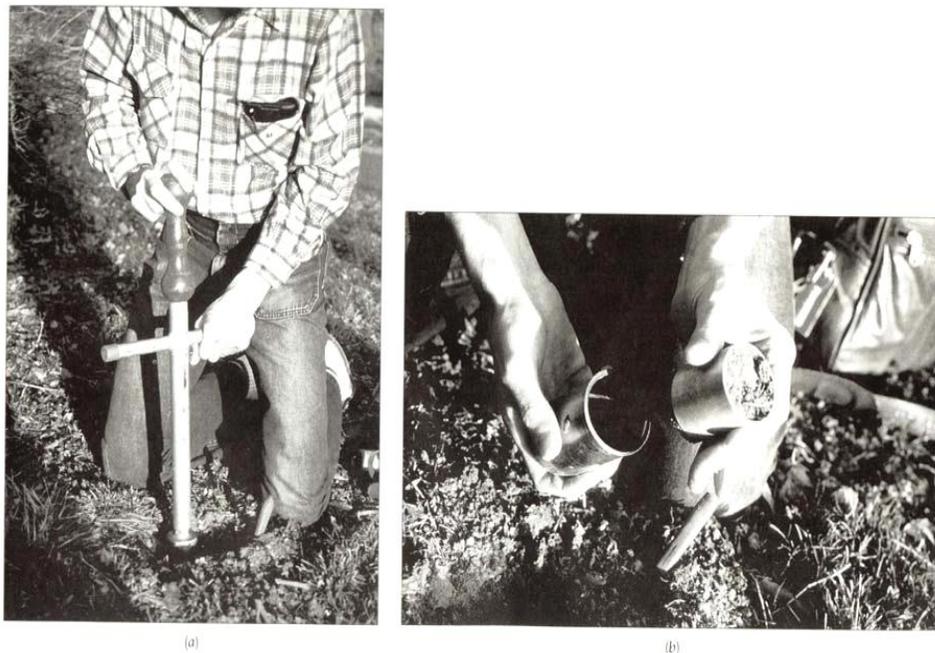


FIGURA 1.33 Um amostrador especial projetado para retirar uma amostra cilíndrica de solo sem causar distúrbios ou compactação (a). O amostrador contém um cilindro interno que é conduzido através do solo por meio de impactos de um martelo. O cilindro interno (b) contendo uma amostra indeformada de solo, é então removido e aparado nas extremidades com uma faca para render uma amostra cujo volume pode ser facilmente calculado pelo seu comprimento e diâmetro. O peso do solo da amostra é então determinado após a secagem em estufa. (Fotos cortesia de R. Weil)

Fatores que Afetam a Densidade do Solo

Solos com uma maior proporção de espaço poroso que sólidos possuem menor densidade de solo que aqueles que estão mais compactados e possuem menos espaço poroso. Consequentemente, qualquer fator que influencie o espaço poroso do solo afetará a densidade do solo. Intervalos típicos de densidade do solo para diversos materiais de solo e condições estão ilustrados na Figura 1.34. Seria conveniente estudar esta figura até conseguir uma boa noção desses intervalos de densidade do solo.

Efeito da textura do solo – Como ilustrado na Figura 1.34, solos de textura fina como franco siltosos,

argilosos e franco argilosos, geralmente possuem menor densidade do solo do que os solos arenosos⁸. Isto é verdade porque as partículas sólidas dos solos de textura fina tendem a se organizar em grânulos porosos, principalmente se apresentar teor de matéria orgânica adequado. Nestes solos agregados, existem poros tanto entre *como* dentro dos grânulos. Esta condição garante um alto espaço poroso total e baixa densidade do solo. Em solos arenosos, entretanto, o conteúdo de matéria orgânica geralmente é baixo, as partículas sólidas estão menos suscetíveis a formarem agregados, e a densidade do solo é normalmente maior que em solos de textura fina. Quantidades similares de poros grandes estão presentes tanto em solos arenosos como em solos de textura fina bem agregados, mas os solos arenosos possuem pouco dos pequenos, poros internos dos agregados, e deste modo apresentam menor porosidade total (Figura 1.35).

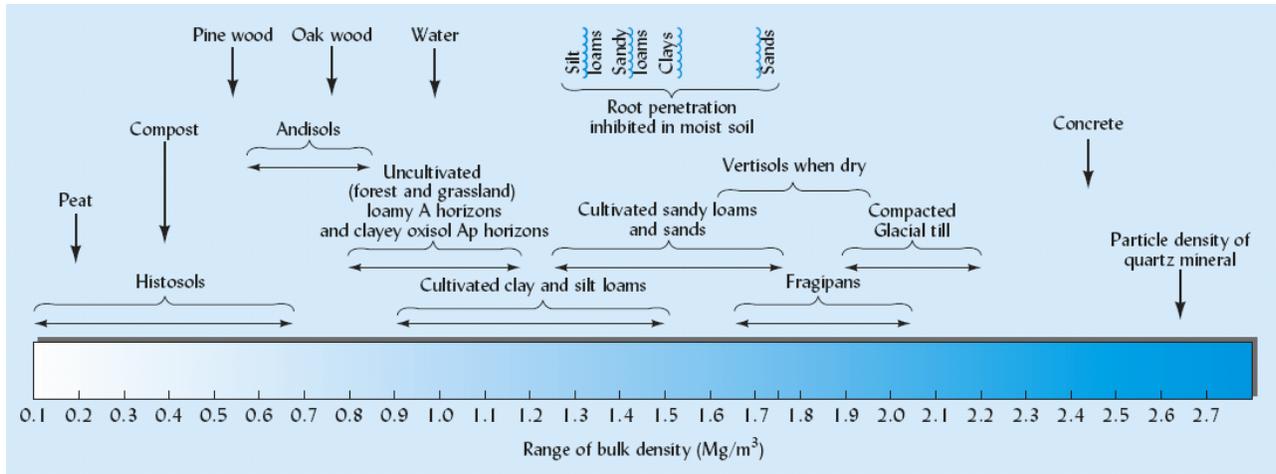


FIGURA 1.34 Densidade do solo típica de diversos tipos e materiais de solo.

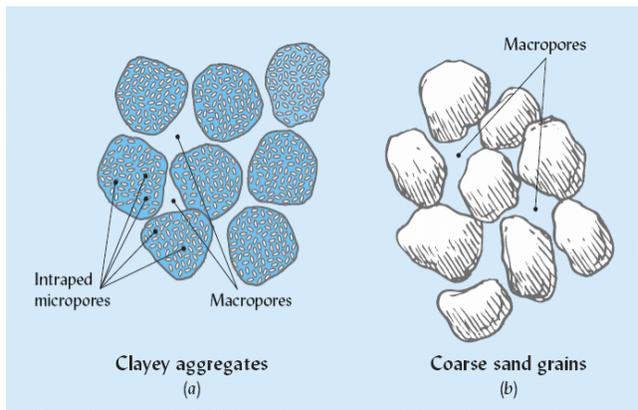


FIGURA 1.35 Uma comparação esquemática de solos arenosos e argilosos mostrando as quantidades relativas de grandes (macro-) poros e pequenos (micro-) poros em cada. Há menos espaço poroso total em solos arenosos que em argilosos porque os solos argilosos contêm um grande número de pequenos poros dentro de seus agregados (a), mas as partículas de areia (b), ao mesmo tempo que similares em tamanho aos agregados de argila, não contém poros em seu interior. Esta é a razão porque, entre os solos superficiais, aqueles com textura grossa são normalmente mais densos que os de textura fina. (Diagrama cortesia de R. Weil)

Enquanto solos arenosos geralmente possuem alta densidade do solo, o arranjo dos grãos de areia também afeta sua densidade do solo (ver Figura 1.36). Grãos ligeiramente comprimidos podem preencher tão pouco como 52 % do volume total, enquanto nos grãos fortemente comprimidos podem preencher tanto quanto 75 % do volume. Assumindo que grãos consistem de quartzo com uma densidade de partículas de $2,65 \text{ Mg}\cdot\text{m}^{-3}$, então o intervalo correspondente de densidade do solo de areia ligeiramente a fortemente comprimida seria de $1,38$ a $1,99 \text{ Mg}\cdot\text{m}^{-3}$ ($0,52 * 2,65 = 1,38$ e $0,75 * 2,65 = 1,99$), não muito diferente do intervalo realmente encontrados em solos muito arenosos. A densidade do solo é geralmente menor se a maior parte das partículas de areia for de uma classe de tamanho (ou seja, areia bem separada), enquanto uma mistura de diferentes tamanhos (ou seja, areia bem graduada) é provável que se tenha uma densidade do solo particularmente alta. No último caso, as partículas menores preenchem parcialmente os espaços entre as partículas maiores. Os materiais mais densos são aqueles caracterizados tanto por uma mistura de tamanhos de areia como por um arranjo fortemente comprimido.

Profundidade no perfil do solo – quanto mais profundo no perfil do solo, a densidade do solo é

⁸ Este fato pode parecer absurdo a princípio porque os solos arenosos são comumente chamados de solos “leves”, enquanto argilosos e franco argilosos são chamados de solos “pesados”. Os termos *pesado* e *leve*, neste contexto, não se referem à massa por unidade de volume de solo, mas a quantidade de esforço que deve ser exercida para manejar estes solos com implementos de preparo – as argilas pegajosas sendo mais difíceis para cultivar.

normalmente maior, provavelmente como resultado do menor conteúdo de matéria orgânica, menor agregação, menos raízes e outros organismos presentes no solo, e compactação causada pela massa das camadas superiores. Subsolos muito compactos podem apresentar densidade do solo de $2,0 \text{ Mg.m}^{-3}$ ou ainda maior. Muitos solos formados a partir de deposição glacial (ver Seção 2.13) possuem subsolos extremamente densos, como resultado da compactação sofrida pela enorme massa de gelo.

Importância da Densidade do Solo

Para engenheiros envolvidos com o movimento do solo durante as construções, ou para paisagistas trazendo camada superficial do solo por caminhões, o conhecimento da densidade de solo de diversos solos é útil na estimativa da massa de solo a ser movimentada. Um solo mineral típico de textura média possui uma densidade do solo de $1,25 \text{ Mg.m}^{-3}$, ou 1250 quilogramas em um metro cúbico.⁹ As pessoas são frequentemente surpreendidas pela forma como o solo é pesado. Imagine-se dirigindo sua caminhonete para um viveiro onde solo superficial natural é vendido por volume e enchendo sua carroceria completamente. Claro que você não gostaria realmente de fazer isso, como a carga pode quebrar seu eixo traseiro; você certamente não seria capaz de se afastar com a carga. Uma típica caminhonete com capacidade de carga de “meia tonelada” (1000 lb ou 454 kg) poderia transportar menos que $0,4 \text{ m}^3$ deste solo, mesmo que a carroceria da caminhonete tenha espaço para cerca de cinco vezes esse volume de material.

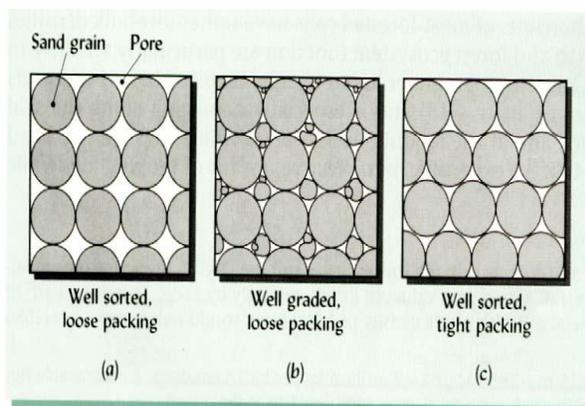


FIGURA 1.36 A uniformidade do tamanho dos grãos e o tipo de arranjo afetam significativamente a densidade do solo de materiais arenosos. Materiais consistindo de todos os tamanhos semelhantes são denominados *bem classificados* (ou mal graduados). Aqueles com uma variedade de tamanho dos grãos são *bem graduados* (ou mal classificados). Em ambos os casos, a compactação das partículas em um arranjo apertado marcadamente aumenta a densidade do solo e diminui sua porosidade. Note que a distribuição de tamanho da areia e partículas de cascalho pode ser descrita como graduada e classificada, os dois termos tendo essencialmente significados opostos. Geólogos geralmente falam de rios com grãos de areia classificadas pelo tamanho foram estabelecidas como depósitos. Engenheiros, em geral, estão preocupados quanto a areia consistir ou não de uma graduação de tamanhos (ou seja, é bem graduada ou não).

A massa de solo em 1 ha a uma profundidade de aração normal (15 cm) pode ser calculada a partir da densidade do solo. Se assumir uma densidade de solo de $1,3 \text{ Mg.m}^{-3}$ para uma típica superfície arável do solo, uma tal porção do sulco de um hectare com 15 cm de profundidade pesa cerca de 2 milhões de kg.¹⁰ Esta estimativa da massa da superfície do solo em um hectare de terra é muito útil no cálculo das taxas de aplicação de calcário e fertilizantes, e taxas de mineralização da matéria orgânica (ver Quadro 8.4, 9.4, 10.4, e 13.1 para exemplos detalhados). No entanto, esta massa estimada deve ser ajustada se a densidade do solo for outra que não $1,3 \text{ Mg.m}^{-3}$ ou a profundidade da camada considerada for superior ou inferior a 15 cm.

Práticas de Manejo Afetando a Densidade do Solo

Mudanças na densidade do solo para um dado tipo de solo são facilmente medidas e podem alertar os gerentes do solo das alterações na qualidade do solo e no funcionamento do ecossistema. Aumentos na densidade do solo geralmente indicam um ambiente mais limitado para o crescimento das raízes, redução da aeração, e mudanças indesejáveis nas funções hidrológicas, como a redução na infiltração de água.

Solos de floresta – Os horizontes superficiais da maioria dos solos de floresta possuem densidades do solo muito baixas (ver Figura 1.34). O crescimento de árvores e a função do ecossistema florestal são particularmente sensíveis ao aumento na densidade do solo. A colheita convencional da madeira geralmente perturba e compacta 20 a 40 % da superfície da floresta (Figura 1.37) e é especialmente prejudicial ao longo dos carregadores, onde toras são arrastadas, e nas plataformas de embarque - locais onde toras são empilhadas e carregadas em caminhões (Tabela 1.4).

⁹ A maioria das mensagens comerciais dos paisagistas e engenheiros nos Estados Unidos da América ainda utilizam unidades inglesas. Para converter valores de densidade do solo dados em Mg.m^{-3} para valores de lb.yd^{-3} , multiplica-se por 1686. Então, 1 yd^3 de um típico solo mineral de textura média com uma densidade de $1,25 \text{ Mg.m}^{-3}$ pesaria mais de 1 tonelada ($1686 \times 1,25 = 2108 \text{ lb.yd}^{-3}$)

¹⁰ $10.000 \text{ m}^2.\text{ha}^{-1} \times 1,3 \text{ Mg.m}^{-3} \times 0,15 \text{ m} = 1950 \text{ Mg.ha}^{-1}$, ou cerca de 2 milhões de quilos por hectare para uma profundidade de 15 cm. Um valor equivalente no sistema inglês é 2 milhões lb por acre – porção do sulco de 6 a 7 polegadas de profundidade.

Um meio caro, porém eficiente, de deslocar toras enquanto minimiza a degradação por compactação do solo da floresta é o uso de cabos amarrados entre torres ou pendurados em balões grandes.



FIGURA 1.37 Colheita de madeira com um convencional skidder com pneus de borracha em uma floresta boreal no oeste de Alberta, Canadá. Tais práticas causam significativa compactação do solo que pode prejudicar as funções dos ecossistemas do solo por muitos anos. As práticas de colheita da madeira podem reduzir tais danos aos solos da floresta incluindo corte seletivo, uso de veículos com tração flexível e transporte de toras por cabos suspensos, e abstendo-se da colheita durante condições úmidas. (Foto cortesia de Andrei Startsev, Centro Ambiental de Alberta)

TABELA 1.4 Efeitos da Colheita de Madeira na Densidade dos Solos a Diferentes Profundidades em Dois Argissolos Florestados na Georgia.

Skidders com pneus de borracha foram utilizados para colher as toras. Observe os maiores valores de densidade do solo nos solos franco arenosos comparados ao franco argilosos, e o grande efeito da colheita de madeira nas linhas de tráfego.

Profundidade do solo (cm)	Densidade do solo ($Mg\ m^{-3}$)		
	Antes da colheita	Após a colheita, no interior dos talhões	Após a colheita nas linhas de tráfego
Franco-arenoso			
0-8	1,25	1,50	1,47
8-15	1,40	1,55	1,71
15-23	1,54	1,61	1,81
23-30	1,58	1,62	1,77
Franco-argiloso			
0-8	1,16	1,36	1,52
8-15	1,39	1,49	1,67
15-23	1,51	1,51	1,66
23-30	1,49	1,46	1,61



FIGURA 1.38. Impacto de campistas na densidade do solo de florestas, e os consequentes efeitos na taxa de infiltração da água da chuva e nas perdas pelo escoamento superficial (ver setas brancas). Na maioria dos acampamentos, a área de mais impactada estende-se por cerca de 10 m da fogueira ou da barraca. Gestores de áreas recreativas devem considerar cuidadosamente como proteger solos susceptíveis à compactação que podem levar à morte da vegetação e aumentar a erosão.

O uso intensivo dos solos na recreação e de transporte nas florestas e em outras áreas com vegetação natural dos solos nas florestas também pode levar ao aumento da densidade do solo. Tais efeitos podem ser vistos em estradas

de acesso, trilhas e campings são encontrados (Figura 1.38). Uma importante consequência do aumento da densidade do solo é a diminuição da capacidade do solo absorver água, por isso, aumenta as perdas por escoamento superficial. Os danos decorrentes de andarilhos podem ser minimizados restringindo o tráfego a pé à trilhas bem planejadas e estabelecidas que podem incluir uma espessa camada de lascas de madeira, ou até mesmo calçadas suspensas, no caso dos caminhos intensamente trafegados sobre solos muito frágeis, como em solos úmidos.

Solos Urbanos – Em áreas urbanas, árvores plantadas para fins de paisagismo têm de, frequentemente, confrontar com solos severamente compactados. Embora normalmente não seja prático modificar toda a zona radicular das árvores, diversas práticas podem ajudar (ver também Seção 7.6). Primeiro, fazendo a cova do plantio do maior tamanho possível proporcionará uma zona de solo solto para o crescimento inicial das raízes. Segundo, uma espessa camada de cobertura morta espalhada na linha de gotejamento (mas não muito perto do tronco) irá reforçar o crescimento da raiz, pelo menos próximo à superfície. Terceiro, para as raízes das árvores podem ser determinados caminhos para a expansão cavando uma série de valas estreitas que saem do buraco de plantio e enchimento com o solo frouxo e enriquecido.

Em alguns ambientes urbanos, pode ser conveniente criar um “solo artificial”, que inclui uma armação de cascalho grosso angular para proporcionar força e estabilidade, e uma mistura de solo superficial de textura franca e matéria orgânica para fornecer nutrientes e capacidade de retenção de água. Também, grandes quantidades de areia e materiais orgânicos são às vezes misturadas em alguns centímetros da parte superior do solo de textura fina em que colocam um gramado verde para ser cultivado.

Telhado verde – A densidade do solo é essencial no projeto de jardins suspensos. A massa de solo envolvida deve ser minimizada, de modo que a relação custo-benefício do projeto estrutura tenha resistência suficiente para suportar a carga do solo. Poderia escolher cultivar apenas plantas com raízes superficiais, como *Sedum* (gênero da família das Crassulaceae) ou gramados de modo que uma camada relativamente fina de solo (digamos, 15 cm) poderia ser utilizada, preservando a massa total de solo de ser muito grande. Também pode ser possível reduzir o custo de construção pela seleção de um solo natural que tenha uma baixa relação de densidade do solo, como alguns solos francos bem agregados ou solos de turfa. Muitas vezes um meio de cultura artificial é criado de materiais de pouco peso como perlita e turfa. Entretanto, se fixar árvores e outras plantas é uma importante função do solo, em uma instalação deste tipo, com materiais de muito baixa densidade não seria apropriado. Quando materiais de muito baixa densidade são utilizados, pode-se exigir um sistema de redes superficiais para evitar que o vento os sopre para fora do telhado.

Solos agrícolas – Embora o cultivo possa soltar temporariamente a superfície do solo, à longo prazo o cultivo intensivo aumenta a densidade do solo, pois esgota a matéria orgânica do solo e enfraquece a estrutura do solo (ver Seção 1.6). Os dados na Tabela 1.5 ilustram esta tendência. Estes dados são de estudos de longo prazo em diferentes locais, onde solos relativamente não perturbados foram comparados a áreas adjacentes que têm sido cultivadas por 12 a mais de 80 anos. Em todos os casos, o cultivo aumentou a densidade do solo na superfície. O efeito do cultivo pode ser minimizado pela adição de resíduos culturais ou adubos orgânicos em grandes quantidades e rotação de culturas cultivadas com realizando rotação com gramíneas.

TABELA 1.5 Densidade do Solo e Espaço Poroso de Solos Superficiais Cultivados e Não Cultivados

Com cultivo, a densidade do solo aumentou, e o espaço poroso diminuiu proporcionalmente, em todos os casos.

Solo	Textura	Anos Cultivado	Densidade do Solo, Mg.m ⁻³		Espaço Poroso, %	
			Solo Cultivado	Solo não Cultivado	Solo Cultivado	Solo não Cultivado
Chernossolo Argilúvico (Dakota do Sul)	Franco Siltoso	80+	1,30	1,10	50,9	58,5
Argissolo Vermelho (Maryland)	Franco Arenoso	50+	1,59	0,84	40,0	66,4
Argissolo Vermelho (Maryland)	Franco Siltoso	50+	1,18	0,78	55,5	68,8
Chernossolo Háptico (Turquia)	Franco Argiloso	12	1,34	1,25	49,6	52,7
Argissolo Vermelho (Zimbábue)	Argiloso	20-50	1,44	1,20	54,1	62,6
Argissolo Vermelho (Zimbábue)	Franco Arenoso	20-50	1,54	1,43	42,9	47,2

Dados para solos de Dakota do Sul de Eynard et al. (2004), para Turquia de Celik (2005), para Maryland de Lucas e Weil (não publicados) e para solos do Zimbábue de Weil (não publicados).

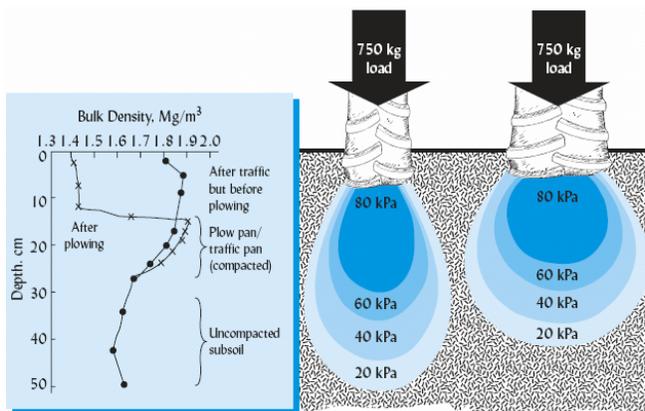


FIGURA 1.39 Os pneus de veículos compactam o solo a consideráveis profundidades. (Esquerda) Representando a densidade do solo associada com a compactação do tráfego em solo franco arenoso. Aração pode soltar temporariamente a superfície compactada do solo (camada arável), mas normalmente aumenta a compactação logo abaixo a camada arada. (Direita) Pneus de veículos (750 kg de carga por pneu) compactam o solo por cerca de 50 cm. Quanto mais estreito o pneu, mais ele afunda e aprofunda o seu efeito de compactação. O diagrama do pneu mostra a pressão de compactação em kPa. Para pneus projetados que reduzem a compactação, ver Tijink e van der Linden (2000). (Diagrama cortesia de R. Weil)

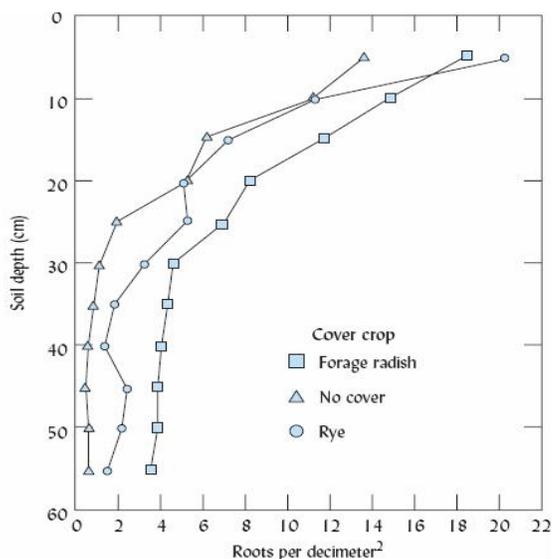
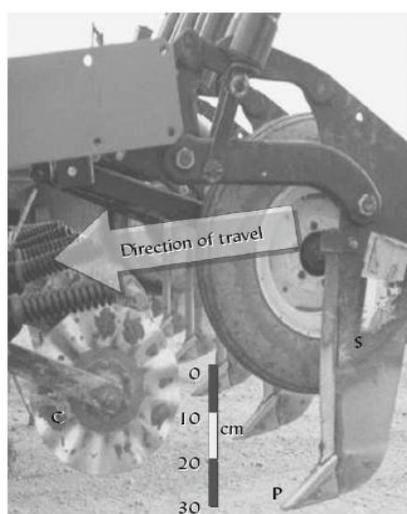


FIGURA 1.40 Duas abordagens para o alívio da compactação do subsolo. (Esquerda) Um pesado escarificador, também conhecido como um subsolador ou ripper. As hastas pesadas (S) são puxadas através do solo para a esquerda com o ponteira da haste (P), cerca de 40 cm de profundidade. Se o solo estiver relativamente seco, o subsolador fará com que a massa de solo compactado quebre, saindo uma rede de fissuras que aumentam o movimento de água, ar e raiz. No entanto, puxar um subsolador através de um solo argiloso seco é uma operação lenta, com intenso uso de energia, os benefícios geralmente duram apenas um ano ou dois, e a operação normalmente perturba a superfície do solo, deixando-a mais suscetível à erosão. Recentemente, pesquisadores em regiões úmidas investigaram uma abordagem alternativa que envolve o cultivo de plantas com raiz pivotante (como o nabo forrageiro apresentado), no outono e na primavera, quando o subsolo é relativamente úmido e facilmente penetrado pelas raízes. As raízes pivotantes então declinam, deixando canais semipermanentes em que as raízes da cultura subsequente podem crescer para passar através das regiões compactadas do subsolo, mesmo durante o verão quando o solo está relativamente seco e duro. (Direita) O milho plantado após o nabo forrageiro teve o dobro de raízes atingindo o subsolo (abaixo de 30 cm), como o milho plantado após as raízes fibrosas do centeio e quase 10 vezes mais do que o milho plantado em solo que não tinha cobertura vegetal durante o inverno. Amostras de solo com 7,5 cm de diâmetro (45 cm² de área) por 60 cm de altura que foram quebrados em intervalos de 5 cm, permitindo que as raízes vivas, que se destacam nos intervalos (ver o diagrama inserido), sejam contadas (Fotos cortesia de R. Weil. Dados de Chen e Weil, não publicado)

Na agricultura moderna, máquinas pesadas utilizadas para puxar implementos, aplicar corretivos, ou colher as culturas podem criar compactação do solo limitante à produtividade. Certos implementos de preparo, como arado de aiveca e a grade de discos, compactam o solo abaixo da sua profundidade de trabalho ao mesmo tempo em que levanta e solta o solo acima. O uso destes implementos ou o tráfego repetido sobre o campo por máquinas pesadas podem formar **pé de grade** ou **camadas compactadas**, regiões densas imediatamente abaixo da camada arada (Figura 1.39). Outros implementos de preparo, como o escarificador e a grade de arrasto, não pressionam o solo abaixo de sua área de trabalho e, por isso, são úteis para quebrar o pé de grade e revolver o solo com uma compactação mínima. O grande arado de tipo talhadeira, subsolador, (Figura 1.40) pode ser usado na **subsolagem** para quebrar densas camadas no subsolo, permitindo, deste modo, a penetração das raízes (Figura 1.41). Porém, em alguns solos, os efeitos da subsolagem são bem temporários. Qualquer cultivo tende a reduzir a resistência do solo, tornando-o menos resistente à

compactação posterior.

O tráfego é particularmente prejudicial em solos úmidos. Geralmente, com cargas mais pesadas e em solos mais úmidos, os efeitos da compactação são mais pronunciados e penetram mais profundamente no perfil do solo. Para prevenir a compactação, que pode resultar em reduções de produtividade e perda de rentabilidade, o número de operações de preparo e tráfego de equipamentos pesados sobre o campo deve ser minimizado e escalonado para evitar períodos em que o solo está úmido. Infelizmente, o tráfego em solos agrícolas úmidos é muitas vezes inevitável, em regiões de clima temperado úmido na primavera e outono.

Outra abordagem para minimizar a compactação é de cuidadosamente restringir todo o tráfego para corredores específicos, deixando o resto do campo (normalmente 90% ou mais da área) livre de compactação, evitando a compactação do restante da área (em até 90% ou mais). Estes sistemas de **tráfego controlado** são amplamente utilizados na Europa, principalmente em solos argilosos. Jardineiros podem praticar o controle de tráfego estabelecendo trilhas permanentes entre os canteiros. Os caminhos podem ser melhorados cobrindo com uma espessa cobertura morta, plantio de gramíneas de gramado, ou pavimentando com pedras planas.

Alguns gestores tentam reduzir a compactação usando uma estratégia oposta em que pneus largos especiais são equipados aos equipamentos pesados, de modo a distribuir o peso sobre uma maior superfície de solo, assim reduz a força aplicada por unidade de área (Figura 1.42a). Pneus largos fazem diminuir o efeito da compactação, mas também aumentam a percentagem da superfície do solo que é impactada. Em uma prática semelhante ao uso de pneus largos, jardineiros podem evitar a concentração do seu peso corporal em apenas poucos centímetros quadrados de suas pegadas por estar em cima de placas de madeira quando preparam os canteiros em solos relativamente úmidos (Figura 1.42b).

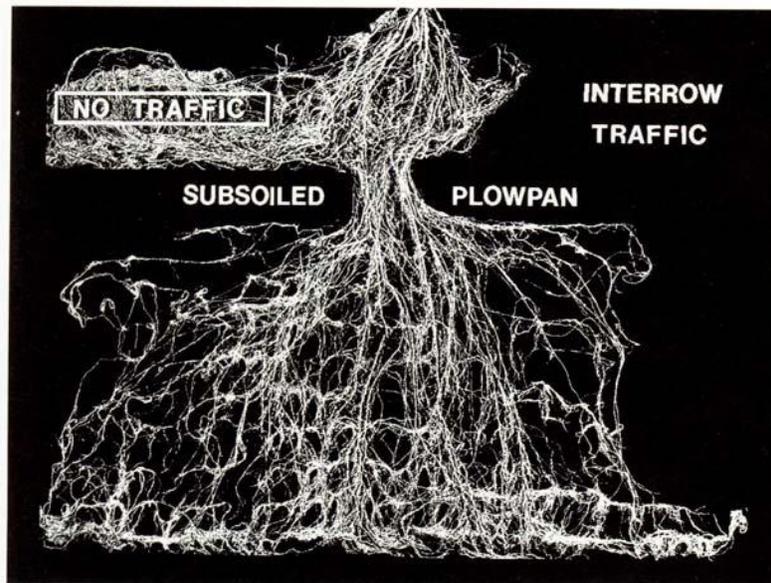


FIGURA 1.41 Distribuição radicular de uma planta de algodão. À direita, tráfego de trator e cultivo na entrelinha ocasionaram o aparecimento de uma camada compactada que restringiu o crescimento radicular. O melhor desenvolvimento de raízes se deu à esquerda, onde não havia ocorrido nenhum tráfego recente de máquinas agrícolas. As raízes são vistas penetrando o subsolo por meio de uma região de solo solto criada por uma subsolagem de um implemento subsolador. (Cortesia USDA, Laboratório Nacional de Máquinas de Cultivo).



FIGURA 1.42 Um método para reduzir a compactação do solo é distribuir o peso aplicado sobre uma maior área de superfície do solo. Os exemplos são o uso de máquinas pesadas com pneus extralargos para aplicação de corretivos no solo (*esquerda*) e permanecendo em pé sobre uma tábua de madeira enquanto prepara os canteiros do jardim no início da primavera (*direita*). (Fotos cortesia de R. Weil).

Influência da Densidade do Solo na Resistência à Penetração e Crescimento Radicular

Altas densidades podem ocorrer como uma característica natural do perfil do solo (por exemplo, um fragipã), ou podem ser uma indicação de compactação do solo induzida pela ação humana. Em qualquer caso, o crescimento radicular é inibido por solos excessivamente densos por uma série de razões, incluindo a resistência do solo à penetração, má aeração, movimento lento de água e nutrientes, e o acúmulo de gases tóxicos e exsudados radiculares.

As raízes penetram no solo empurrando-se através dos caminhos dos poros. Se um poro é muito pequeno para acomodar a coifa da raiz, a raiz deve empurrar as partículas de solo e aumenta o poro. Até certo ponto, a densidade por si só restringe o crescimento radicular, como as raízes encontram poucos e pequenos poros. Porém, a penetração radicular é também limitada pela *resistência do solo à penetração*, a propriedade do solo que faz com que ele resista à deformação. Uma maneira de quantificar a resistência do solo à penetração é medir a força necessária para penetrar uma haste com cone padronizado (um **penetrômetro**) no solo (ver também Seção 1.9). A compactação geralmente aumenta a densidade e a resistência do solo à penetração. Pelo menos dois fatores (relacionados à resistência do solo à penetração) devem ser considerados para determinar o efeito da densidade do solo sobre a capacidade das raízes em penetrar o solo.

Efeito do conteúdo de água no solo - O conteúdo de água no solo e a densidade do solo influenciam a *resistência do solo à penetração* (ver Seção 1.9 e Figura 1.43). A resistência do solo à penetração é aumentada quando o solo é compactado para uma maior densidade, e também quando um solo de textura mais fina seca e endurece. Por isso, o efeito da densidade do solo no crescimento radicular é mais pronunciado se esses solos estão secos, uma maior densidade do solo seja necessária para evitar a penetração de raízes quando os solos estão úmidos. Por exemplo, camada compactada tendo uma densidade do solo de $1,6 \text{ Mg.m}^{-3}$ pode impedir completamente a penetração das raízes quando o solo estiver bastante seco, contudo as raízes podem facilmente penetrar esta mesma camada quando estiver em uma condição úmida.

Efeito da textura do solo - Quanto mais argila presente no solo, menor o tamanho médio dos poros, e maior a resistência a penetração em uma dada densidade do solo. Portanto, se a densidade do solo é a mesma, as raízes penetram mais facilmente em um solo arenoso úmido do que em um solo argiloso úmido. O crescimento radicular em solos úmidos é geralmente limitado por densidades do solo variando de $1,45 \text{ Mg.m}^{-3}$ em solos argilosos a $1,85 \text{ Mg.m}^{-3}$ em areia franca (ver Figura 1.34). Vistos neste contexto, o crescimento de raízes foi provavelmente inibido pela densidade do solo, nos ensaios do trator florestal, nas linhas de tráfego em ambos os solos ilustrados na Tabela 1.4.

Efeito do uso e manejo do solo – Como seria de esperar, os solos são usados em linhas de culturas agrícolas, pastagens, campos naturais, silvicultura, ou tráfego fora da estrada, frequentemente marcada e, simultaneamente, afetam a densidade do solo e a resistência do solo à penetração de maneira que restringir ou aumentar o crescimento radicular e o movimento da água. Nem sempre é apreciado que o cultivo e tráfego possam compactar solos bem profundos no subsolo. Pode demorar muitos anos de gerenciamento de reparação para o subsolo para recuperar seu grau natural de porosidade e friabilidade. A Figura 1.44 ilustra esse caso.

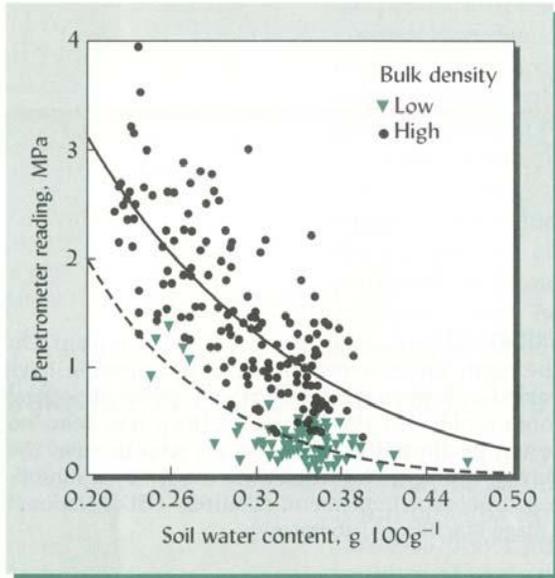


FIGURA 1.43 Ambos, conteúdo de água e densidade do solo afetam a resistência do solo como medido pela resistência do penetrômetro. Os dados são de um horizonte Bt de textura argilosa de um Argissolo Vermelho Distrófico da Virginia (Argissolos), que foi severamente compactado (densidade do solo 1,7 Mg.m⁻³) ou não (densidade do solo 1,3 Mg.m⁻³). Observe que a resistência do solo diminui com o aumento do conteúdo de água e é muito pouco considerada a densidade do solo quando o solo está aproximadamente saturado por água. [Gráfico baseado no estudo de Gilker et al. (2002)]

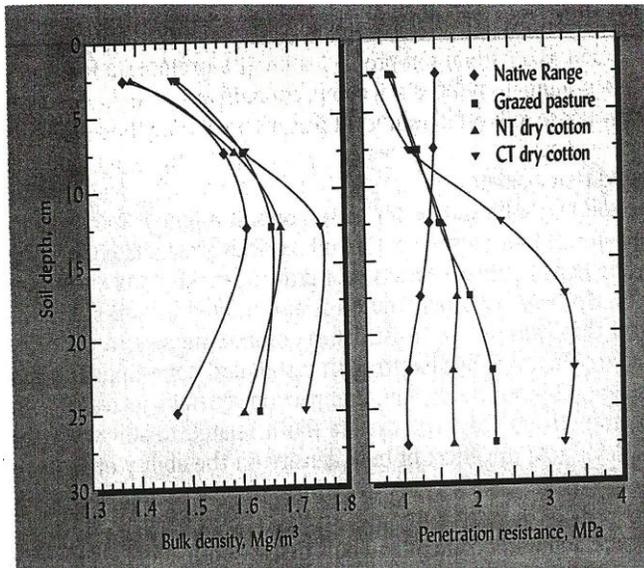


FIGURA 1.44 A densidade do solo e a resistência à penetração depois de cerca de 30 anos sem cultivo (NT) e cultivo convencional (CT) de algodão de sequeiro, ou 15 anos de pastagem em pastos comparada as pastagens nativas. O cultivo convencional do algodão resultou na maior densidade do solo e resistência à penetração, especialmente abaixo da profundidade arável (15 a 20 cm), sugerindo a formação de uma camada compactada nos solos com CT de algodão. Após 15 a 30 anos sem cultivo, os pastos e o sistema de algodão sem cultivo recuperaram parcialmente as propriedades físicas favoráveis das pastagens nativas. Os níveis de resistência a penetração para todos os sistemas foram bastante elevados (2 MPa pode restringir o crescimento radicular) porque o conteúdo de água destas regiões semiáridas estavam muito baixos no momento das medidas. No entanto, o conteúdo de água estava relativamente uniforme entre os sistemas, pelo menos nas camadas mais baixas onde ocorreram as maiores diferenças na resistência à penetração. Solo amarelo com textura areia franca fina (Aridic Paleustalfs) no Sul das Altas Planícies do Texas [Desenhado dos dados de Halfmann (2005)]

1.7 Espaço Poroso de Solos Minerais

Uma das principais razões para a medição da densidade do solo é que este valor pode ser utilizado para calcular o espaço poroso do solo. Para solos com a mesma densidade de partículas, quanto menor a densidade do solo, maior a percentagem de espaço poroso (**porosidade total**). O Quadro 1.6 mostra a dedução da fórmula que expressa tal relação.

Fatores que influenciam o Espaço Poroso Total

Para um solo “ideal” de textura média, bem granulado e superfície do solo em boas condições para o crescimento de plantas, aproximadamente 50 % do volume consistiria de espaço poroso, e este espaço poroso seria de

cerca de metade com ar e metade com água. Na realidade, a porosidade total varia muito entre solos pelas mesmas razões que a densidade do solo varia. Os valores variam de tão baixo quanto 25 % em subsolos compactados a mais de 60 % em solos superficiais bem agregados e com alto teor de matéria orgânica. Como é o caso da densidade do solo, o manejo do solo pode exercer uma influência decisiva no espaço poroso dos solos (ver Tabela 1.5). Dados de uma grande variedade de solos mostram que o cultivo tende a diminuir o espaço poroso do solo comparado à solos não cultivados. Esta redução é normalmente associada à diminuição do conteúdo de matéria orgânica do solo e, conseqüentemente, uma diminuição da agregação.

Tamanho dos poros

Valores de densidade do solo ajudam a determinar apenas a porosidade *total*. Entretanto, os poros no solo possuem ampla variedade de tamanhos e formas que amplamente determinar que papel os poros do solo podem desempenhar (ver Figura 1.45) Os poros podem ser agrupado pelo tamanho em: macroporos, mesoporos, microporos, e assim por diante (Tabela 1.6 ilustra um desses grupos). Simplificando nossa discussão neste momento referindo apenas a **macroporos** (maior que cerca de 0,08 mm) e **microporos** (menor que cerca de 0,08 mm).

Macroporos - Os macroporos caracteristicamente permitem rápida movimentação de ar e drenagem de água. Eles também são grandes o suficiente para acomodar as raízes das plantas e um ampla gama de pequenos organismos que habitam o solo (ver Capítulo 1). Diversos tipos de macroporos estão ilustrados na Figura 1.46.

Os macroporos podem ocorrer como espaços entre partículas individuais de areia em solos de textura grosseira. Deste modo, apesar dos solos arenosos possuírem relativamente baixa porosidade total, o movimento de ar e água através desse tipo de solo é surpreendentemente rápida pela predominância de macroporos.

Em solos bem estruturados, os macroporos são geralmente encontrados entre agregados. Estes **poros entre agregados** podem ocorrer como espaços entre os grânulos soltos ou como fissuras planas entre blocos apertados e agregados prismáticos (ver Lâmina 82, após página 656).

Macroporos criados por raízes, minhocas, e outros organismos constituem um tipo muito importante de poros chamados **bioporos**. Estes apresentam, normalmente, formato tubular e podem ser contínuos, atingindo um metro de comprimento ou mais (ver Lâmina 81). Em alguns solos argilosos, os bioporos são a forma predominante de macroporos, facilitando grandemente o desenvolvimento radicular das plantas (Tabela 1.7, Lâminas 81 e 83). Vegetações perenes, como árvores de florestas e certas culturas forrageiras, são particularmente eficientes na criação de canais que servem como condutos para raízes, após a morte e declínio das raízes que originalmente os criaram. Dois desses antigos canais radiculares, cada um com cerca de 8 mm de diâmetro, pode ser visto perfurando a argila por estrias laterais mostradas na Figura 3.23c.

Esta claro que, tanto a estrutura como a textura, influenciam as quantidades relativas de macroporos e microporos presentes no solo. A Figura 1.47 mostra que a diminuição do teor de matéria orgânica e aumento do conteúdo de argila que ocorre em profundidade em muitos perfis são associados ao aumento da quantidade de microporos em relação aos macroporos.

QUADRO 1.6 – CÁLCULO DA PERCENTAGEM DO ESPAÇO POROSO

A densidade do solo pode ser facilmente quantificada e a densidade de partículas, para a maioria dos solos com predominância de minerais silicatados, pode ser assumida como 2,65 Mg m⁻³. Medidas diretas do espaço poroso do solo requerem utilização de técnicas de alto custo e grande dispêndio de tempo. Deste modo, o espaço poroso do solo pode ser mais facilmente calculado conhecendo-se a densidade do solo e densidade de partículas.

A dedução da fórmula para o cálculo da percentagem do espaço poroso é apresentada a seguir:

$$\begin{array}{ll} D_s = \text{densidade do solo, Mg m}^{-3} & V_s = \text{volume de sólidos, m}^3 \\ D_p = \text{densidade de partículas, Mg m}^{-3} & V_p = \text{volume de poros, m}^3 \\ M_s = \text{massa do solo, Mg} & V_s + V_p = \text{volume total do solo, m}^3 \end{array}$$

Por definição:

$$\frac{M_s}{V_s} = D_p \quad \text{e} \quad \frac{M_s}{V_s + V_p} = D_s$$

Isolando Ms:

$$M_s = D_p \times V_s \quad \text{e} \quad M_s = D_s (V_s + V_p)$$

Portanto:

$$D_p \times V_s = D_s (V_s + V_p) \quad \text{e} \quad \frac{V_s}{V_s + V_p} = \frac{D_s}{D_p}$$

Como:

$$\frac{V_s}{V_s + V_p} \times 100 = \% \text{ de sólidos} \quad \text{então:} \quad \% \text{ de sólidos} = \frac{D_s}{D_p} \times 100$$

Como a % de poros + % de sólidos = 100 e a % de poros = 100 - % de sólidos. Então:

$$\text{Espaço poroso (\%)} = 100 - \left(\frac{D_s}{D_p} \times 100 \right)$$

Exemplo:

Considerando o solo argiloso cultivado, localizado no Canadá (Cambid) apresentado na Tabela 1.3. A densidade do solo foi determinada como sendo 1,28 Mg m⁻³. Como a densidade de partículas não é conhecida assumiu-se o valor aproximado para a maioria dos solos compostos por minerais silicatados (2,65 Mg m⁻³). Calculou-se a percentagem do espaço poroso utilizando a fórmula apresentada anteriormente:

$$\text{Espaço poroso (\%)} = 100 - \left(\frac{1,28}{2,65} \times 100 \right) = 100 - 48,3 = 51,7$$

Para certos tipos de solos, não é adequado assumir uma densidade de partículas de 2,65 Mg m⁻³. Um solo com alto teor de matéria orgânica pode apresentar uma densidade de partículas menor que 2,65 Mg m⁻³. Do mesmo modo, um solo rico em óxidos de Fe pode apresentar uma densidade de partículas maior do que 2,65 Mg m⁻³, devido ao fato destes minerais apresentarem altas densidades de partículas (3,5 Mg m⁻³). Como exemplo, consideremos o solo argiloso do Zimbábwe (Ustalfs) descrito na Tabela 1.3. Este solo possui textura argilosa, coloração avermelhada e alto teor de óxidos de ferro. A densidade de partículas foi determinada como sendo 3,21 Mg m⁻³ (não mostrado na Tabela 1.3). Utilizando este valor e a densidade do solo da Tabela 1.3, pode-se calcular o espaço poroso (%) da seguinte maneira:

$$\text{Espaço poroso (\%)} = 100 - \left(\frac{1,20}{3,21} \times 100 \right) = 100 - 37,4 = 62,6$$

A alta percentagem de espaço poroso apresentada é um indicativo que este solo não está compactado e possui estrutura granular típica dos solos sob vegetação natural.

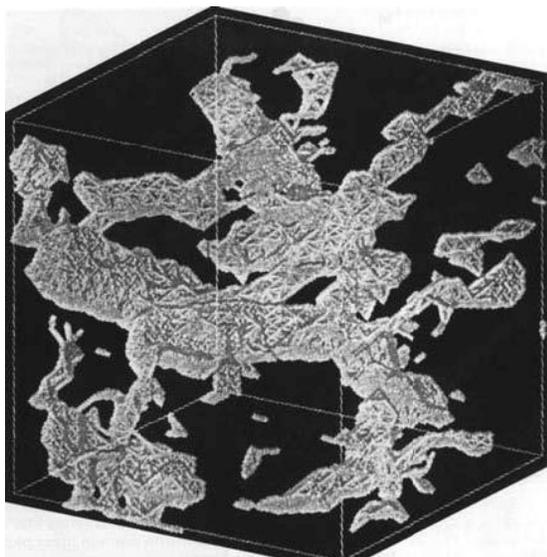


FIGURA 1.45 Representação tridimensional de uma rede de poros em um pequeno bloco de solo não deformado da França (borda de 2mm de comprimento). Os poros (cores claras) exibem grande variabilidade no tamanho e área seccional. Observe que os canais de poros são tortuosos e que nem todos estão conectados entre si, alguns sendo isolados daqueles canais que podem conduzir água ou ar para dentro ou fora do solo. Isto sugere que diminutos volumes de água e ar podem estar aprisionados em certos bolsões, assim impedindo seu rápido movimento ascendente ou descendente nos solos. (Imagem cortesia da Dra. Isabelle Cousin, INRA Unidade de Ciência do Solo-SESCPF Centro de Pesquisa de Orleans Domínio de Arquivamento, Ardon, França)

TABELA 1.6 Classificação dos Poros do Solo e Algumas Funções de cada Classe

Na realidade, os tamanhos de poros são contínuos e as ligações entre as classes mostradas abaixo são inexatas e, às vezes, arbitrárias. O termo microporo é normalmente utilizado para se referir a todos os poros menores que os macroporos.

<i>Classes simplificadas</i>	<i>Classes¹</i>	<i>Diâmetro efetivo, mm</i>	<i>Características e funções</i>
Macroporos	Macroporos	0,08 – +5	Geralmente encontrados entre unidades estruturais; drenagem da água gravitacional; difusão de gases; tamanho suficiente para acomodar raízes e habitat de certos animais do solo.
Microporos ↓	Mesoporos	0,03-0,08	Retenção de água; movimento de água por capilaridade; habitat de fungos e raízes mais finas.
	Microporos	0,005-0,03	Geralmente encontrados dentro das unidades estruturais; retenção de água disponível às plantas e habitat da maioria das bactérias.
	Ultramicroporos	0,0001-0,005	Presentes em solos argilosos; retenção de água não disponível às plantas; seu tamanho exclui a maioria dos microrganismos.
	Criptoporos	< 0,0001	Seu tamanho exclui todos os microrganismos e moléculas de maior tamanho.

¹ As classes e diâmetro de poros citados são da Sociedade Americana de Ciência do Solo (2001).

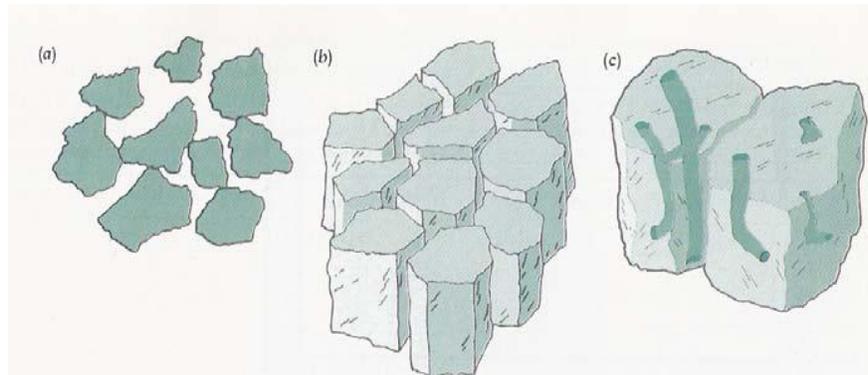


FIGURA 1.46 Diferentes tipos de poros do solo. (a) Muitos poros do solo ocorrem como *espaços do arranjo*, deixados entre as partículas primárias do solo. O tamanho e forma desses espaços é altamente dependente do tamanho e forma das partículas primárias de areia, silte e argila e de seu arranjo. (b) Em solos com agregados estruturais, os poros são encontrados entre os agregados formando *poros entre os agregados*. Estes poros podem ser planos, como fissuras entre unidades estruturais prismáticas, ou podem ser irregulares, como aqueles presentes entre agregados granulares. (c) *Bioporos* são formados por organismos como minhocas, insetos e raízes de plantas. A maioria deles são canais longos e ramificados, mas alguns são apenas cavidades arredondadas deixadas por ninhos de insetos e afins. (Diagrama cortesia de R. Weil)

TABELA 1.7 Distribuição de Diferentes Tamanhos de Raízes de Pinus na Matriz do Solo e em Canais de Raízes Antigas na Camada Superficial de um Argissolo (Carolina do Sul).

Os bioporos (canais radiculares) possuíam geralmente 1 a 5 cm de diâmetro e eram preenchidos com solo superficial solto e matéria orgânica em decomposição. Eles facilitaram a penetração radicular e possuíam melhor fertilidade e aeração do que a matriz do solo ao redor.

Tamanho das raízes, diâmetro	Número de raízes por m ² de solo		
	Matriz do solo	Bioporos	Aumento comparativo na densidade de raízes nos bioporos
Raízes finas <4 mm	211	3617	94
Médias 4-20 mm	20	361	95
Grandes >20 mm	3	155	98

Calculado de Parker e Van Lear (1996).

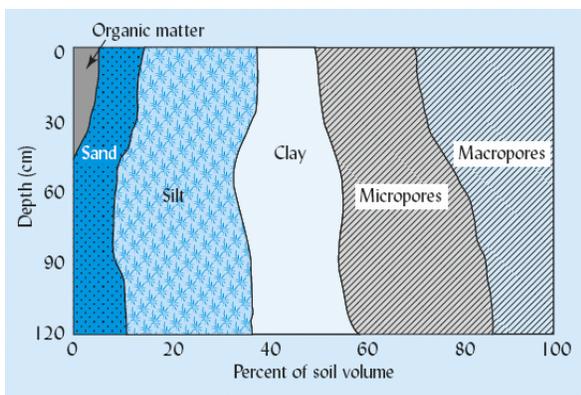


Figura 1.47 A distribuição volumétrica de matéria orgânica, silte, argila, macroporos e microporos em um solo representativo de textura média e com boa estrutura. Note que os macroporos são especialmente abundantes no horizonte superficial (30 cm superiores). (Diagrama cortesia de R. Weil)

Microporos - Ao contrário dos macroporos, os microporos geralmente são preenchidos com água, em condições de campo. Mesmo quando não são preenchidos por água, eles são muito pequenos para permitir grande movimento de ar. O movimento de água nos microporos é lento, e a maior parte da água retida nestes poros não está disponível para as plantas (ver Capítulo 5). Solos de textura fina, especialmente aqueles sem uma estrutura granular estável, podem ter predominância de microporos, permitindo assim um movimento relativamente lento de gases e água, apesar do grande volume relativo de espaço poroso. A aeração, principalmente no subsolo, pode ser inadequada para um bom desenvolvimento radicular e atividade microbiológica desejável. Enquanto os microporos de maior tamanho acomodam pelos radiculares e microrganismos, os de menor tamanho (também chamados de *ultramicroporos* e *criptoporos*) são tão pequenos que seus raios são medidos em nanômetros (10^{-9} metros), dando origem ao termo *nanoporos*. Tais poros são muito pequenos para permitir a entrada até das menores bactérias e de algumas enzimas, estimulantes de senescência, produzidas por estas. Entretanto, podem servir como abrigos para alguns compostos

orgânicos (tanto naturais como poluentes), protegendo-os da degradação por longos períodos, até séculos. (ver Figura 18.18)

Claramente, o tamanho, forma e interconexão dos poros do solo, em vez de seu volume total, são os fatores mais importantes na determinação da drenagem do solo, aeração, e outros processos do solo. A Figura 1.46 ilustra a variabilidade de tamanhos e formas dos poros do solo, que variam desde os microporos dentro dos agregados, onde o movimento de ar e água é restrito, até os macroporos maiores, nos quais o ar e a água se movimentam livremente.

TABELA 1.8 Efeito de 50 anos de Cultivo Contínuo sobre a Macroporosidade e Microporosidade de um Vertissolo de Textura Fina (Texas).

Comparado ao solo não perturbado, o solo cultivado apresentou menor macroporosidade e um aumento da microporosidade devida a destruição dos agregados, transformando os poros presentes entre as unidades estruturais em microporos. A perda de matéria orgânica do solo tornou os agregados mais suscetíveis aos danos pelo preparo do solo.

<i>Solo</i>	<i>Matéria Orgânica</i>	<i>Porosidade total</i>	<i>Macroporosidade</i>	<i>Microporosidade</i>	<i>Densidade do solo</i>
----- % -----					<i>Mg m⁻³</i>
<i>0-15 cm de profundidade</i>					
não perturbado	5,6	58,3	32,7	25,6	1,11
50 anos de cultivo	2,9	50,2	16	34,2	1,33
<i>15-30 cm de profundidade</i>					
não perturbado	4,2	56,1	27	29,1	1,16
50 anos de cultivo	2,8	50,7	14,7	36,0	1,31

Dados de Laws e Evans (1949).

Cultivo e Tamanho de Poros

Cultivo contínuo, principalmente em solos que originalmente apresentam altos teores de matéria orgânica, normalmente resulta em uma redução da macroporosidade (ver Tabela 1.8). Quando terras de pradarias nativas são aradas e plantadas com culturas em linha como milho ou soja, o conteúdo de matéria orgânica do solo e a espaço poroso total são reduzidos. Porém, mais relevante é o efeito do cultivo no tamanho dos poros do solo. Tal cultivo reduz drasticamente a quantidade de espaço de macroporos que é exigido para rapidez do movimento de ar.

Atualmente, práticas de manejo conservacionista que minimizam o cultivo e outras manipulações do solo, têm sido adotadas nos Estados Unidos (ver Seção 1.6 e 17.6). Devido ao acúmulo de matéria orgânica próximo à superfície do solo e o desenvolvimento de uma rede de macroporos com longa duração (especialmente bioporos), alguns sistemas conservacionistas aumentam a macroporosidade nas camadas superficiais. Estes benefícios são particularmente observados em solos com grande atividade de minhocas, que podem permanecer intactas na ausência do preparo. Infelizmente, tais melhorias na porosidade nem sempre são observadas em solos com pobre drenagem interna.

1.8 Propriedades do Solo Relevantes para Uso na Engenharia

As propriedades do solo são obviamente importantes na engenharia. Nas palavras de Richard Hand:

“Praticamente toda estrutura é suportada por solo ou rocha. Aquelas que não estão ou voam, flutuam ou caem sobre.”

Avaliação de Campo da Consistência do Solo

Consistência. A consistência do solo é um termo usado pelos cientistas de solo para descrever a facilidade com que um solo pode ser remodelado ou rompido. Como um torrão de solo é comprimido entre o dedão e o dedo indicador (ou esmagados sob os pés, se necessário), observações são feitas sobre a quantidade de força necessária para esmagar o torrão e sobre a forma em que o solo responde à força. O grau de cimentação do solo por materiais como sílica, calcita, ou ferro é também considerado na identificação da consistência do solo.

O teor de água tem grande influência em como um solo responde ao estresse; portanto, solos úmidos e secos são dados avaliações de consistência distintas (Tabela 1.9). Um solo argiloso seco que não pode ser esmagado entre o dedão e o dedo indicador, mas pode ser facilmente esmagado sob os pés pode ser designado como *muito duro*. O mesmo solo, quando úmido, iria exibir muito menos resistência à deformação, e seria chamado de *plástico*. Os graus de *viscosidade* e *plasticidade* (maleabilidade) do solo em uma condição úmida muitas vezes são incluídos na descrição

de consistência do solo (embora não seja mostrado na Tabela 1.9). Como descrito na Seção 1.6, um torrão úmido que é esmagado com apenas pequenas pressões é dito como friável. Solos friáveis são facilmente escavados ou cultivados.

TABELA 1.9 Alguns Testes de Campo Empregados para Descrever A Consistência dos Solos.

A consistência dos materiais coesivos esta intimamente relacionada à, mas não exatamente o mesmo que, sua consistência. Condições mínimas de coerência são representadas por condições de da parte superior de cada coluna, essas de maior coerência próxima a base.

<i>Consistência do Solo^a</i>				<i>Consistência do Solo^b</i>	
<i>Solo seco</i>	<i>Solo Úmido</i>	<i>Solo seco e então submerso em água</i>	<i>Teste de Rompimento (Esmagamento)</i>	<i>Solo na umidade de campo</i>	<i>Teste de penetração no campo</i>
Solto	Solto	Não aplicável	Amostra não obtida	Macio	Extremidade sem ponta do lápis penetra profundamente com facilidade
Macio	Muito Friável	Não cimentada	Desintegra sob força muito pequena entre o dedão e o dedo indicador	Firmeza média	Extremidade sem ponta do lápis penetra cerca de 1,25 cm com esforço moderado
Ligeiramente duro	Friável	Muito fracamente cimentada	Desintegra sob força pequena entre o dedão e o dedo indicador	Firme	Extremidade sem ponta do lápis penetra cerca de 0,5 cm
Duro	Sólido	Fracamente cimentada	Desintegra com dificuldade entre o dedão e o dedo indicador	Muito Firme	Extremidade sem ponta do lápis faz ligeira marca; a unha do dedão penetra facilmente
Muito Duro	Extremamente sólido	Moderadamente cimentada	Não pode ser desintegrado entre o dedão e o dedo indicador, mas pode ser desintegrado lentamente sob os pés	Duro	Extremidade sem ponta do lápis não faz marca; a unha do dedão mal penetra
Extremamente Duro	Ligeiramente rígido	Fortemente cimentada	Não pode ser desintegrado com todo o peso corporal na sola do pé		

^a Abstraído de USDA/NRCS (2005).

^b Modificado de McCarthy (1993).

Consistência. Os engenheiros utilizam esse termo **consistência** para descrever como um solo resiste a *penetração* por um objeto, enquanto os cientistas da consistência do solo descreve a resistência para sofrer *ruptura*. Em vez de esmagar um torrão de solo, o engenheiro se esforça para penetrá-lo com a extremidade sem ponta de um lápis (alguns usam seus polegares) ou a unha do polegar. Por exemplo, se a extremidade sem ponta de um lápis fizer apenas uma pequena reentrância, mas a unha do polegar penetrar facilmente, o solo é classificado como *muito firme* (Tabela 1.9). Consistência, então, é um tipo de estimativa de campo simples de resistência do solo ou resistência à penetração (ver Seção 1.7).

Observações de campo para consistência proporcionaram valiosas informações para orientar decisões sobre carregamento e manipulação dos solos. Para propósitos de construção, entretanto, medidas mais precisas são necessárias de uma série de propriedades relacionadas do solo que ajudam na predição de como um solo irá responder ao aplicar tensão.

Resistência e Insuficiência Repentina

Engenheiros definem a **capacidade de carga** do solo como a capacidade de uma massa de solo resistir aos esforços sem se romper ou tornar-se deformados. A insuficiência de um solo em suportar o esforço pode resultar em uma queda da construção se o seu peso superar a capacidade de carga do solo. Da mesma forma, uma barragem de terra ou diques podem ceder sob a pressão da água apreendida, ou pavimentos e estruturas podem deslizar em encostas instáveis (Figura 1.10).

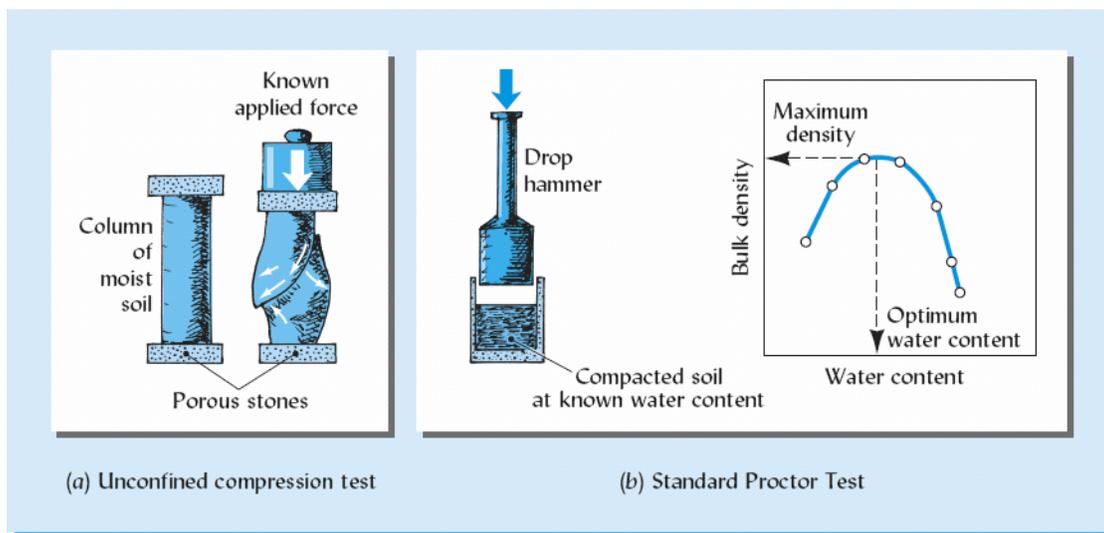


FIGURA 1.48 Dois importantes testes para determinar as propriedades de engenharia dos materiais do solo. (a) Um teste de compressão simples em amostras não confinadas para avaliar a resistência do solo. (b) O teste de Próctor para avaliar a densidade de solo máxima e conteúdo de água ótimo para controle da compactação.

Solos Coesivos. Dois componentes de resistência aplicada a **solos coesivos** (essencialmente solos com conteúdo de argila superiores a 15%): (1) as forças de atração eletrostática inerentes entre as partículas de argila e entre as superfícies de argila e a água nos poros bem finos (ver *floculação da argila* na Seção 1.5), e (2) a resistência ao atrito a movimentação entre as partículas do solo de todos os tamanhos. Enquanto muitos diferentes testes laboratoriais são utilizados para estimar a resistência do solo, talvez, o mais simples de entender é o **teste de compressão direto** em amostras **não confinadas** utilizando o aparelho ilustrado na Figura 1.48a. Uma amostra cilíndrica de solo coesivo é colocada verticalmente entre duas placas porosas de pedra (que permitem que a água escape dos poros do solo compactado) e um aumento lento da força descendente é aplicado. A coluna de solo irá, inicialmente, ser um pouco empurrada para fora e, então falhar - isto é de forma repentina e se colapsa - quando a força exceder a resistência do solo.

A resistência dos solos coesivos decresce radicalmente se o material está muito úmido e os poros estão preenchidos com água. Então as partículas são forçadas a se separar de modo que nem a coesão, nem a componente de atrito é tão forte, tornando o solo propenso a falhas, muitas vezes com resultados catastróficos (tais como deslizamentos, Figura 1.49, ou falhas de barragem, Quadro 1.7). Por outro lado, se os solos coesivos se tornarem mais compactados ou secos, sua resistência aumenta como as partículas são forçadas a ter um contato mais íntimo entre elas - um resultado que tem implicação para o crescimento das raízes de plantas como para engenharia (ver Seção 1.7).



FIGURA 1.49 Casas danificadas por um deslizamento de terra que ocorreu quando o solo de uma encosta íngreme no Oregon se tornou saturado com água após um período de chuvas pesadas. O peso do solo molhado excedeu sua resistência ao cisalhamento, causando o fracasso do declive. Escavações para estradas e casas próximas ao pé de uma encosta podem contribuir para a falta de estabilidade da encosta, assim como a remoção de raízes árvores em grande escala por corte raso na encosta. (Foto cortesia de John Griffith, Coos Bay, OR)

Solos Não Coesivos. A resistência de materiais de solo não coesivos e secos tais como a areia solta depende totalmente de forças de atrito, incluindo a interligação da superfície de partículas ásperas. Um reflexo de como o atrito

entre partículas está é o **ângulo de repouso**, o ângulo mais íngreme ao qual um material pode ser empilhado sem cair. Os grãos de areia arredondados e lisos não podem ser empilhados tão acentuadamente como as areias ásperas e interligadas. Se uma pequena quantidade de água ligar os espaços entre as partículas, a atração eletrostática das moléculas de água com a superfície dos minerais incrementará a resistência do solo (como ilustrado na Figura 1.50). A ligação entre as partículas de água explica o porque os carros podem ser dirigidos ao longo da beira da praia onde a areia está úmida, mas os pneus afundam e perdem tração em areia solta e seca ou em areia movediça saturada (ver Figura 5.27 para um exemplo deste último).

Solos Colapsáveis. Certos solos que exibem considerável resistência em baixos conteúdos de água *no campo* perdem sua resistência de forma repentina quando são umedecidos. Esses solos podem colapsar sem ser advertido embaixo de fundações de construções e estradas. Um caso especial de colapso do solo é a tixotropia, a liquefação repentina de uma massa úmida de solo quando sujeita a vibrações, tais como acompanhamento de terremotos e explosões.

A maioria dos **solos colapsáveis** são materiais não coesivos nos quais os grãos de areia em arranjos frouxos são cimentados nos seus pontos de contato por pequenas quantidades de gesso, argila, ou água sob tensão. Esses solos usualmente ocorrem em regiões áridas e semiáridas, onde tais agentes cimentantes são relativamente estáveis. Muitos solos colapsáveis tem derivado o seu arranjo aberto de partículas dos processos de sedimentações que ocorreram no passado ou de corpos de água atuais. Quando esses solos são umedecidos, o excesso de água pode dissolver os agentes cimentantes, tais como gesso ou argila dispersa que formam uniões entre partículas, causando a repentina perda da resistência. Em alguns casos, comportamento similar é exibido por Latossolos altamente intemperizados em regiões tropicais úmidas.

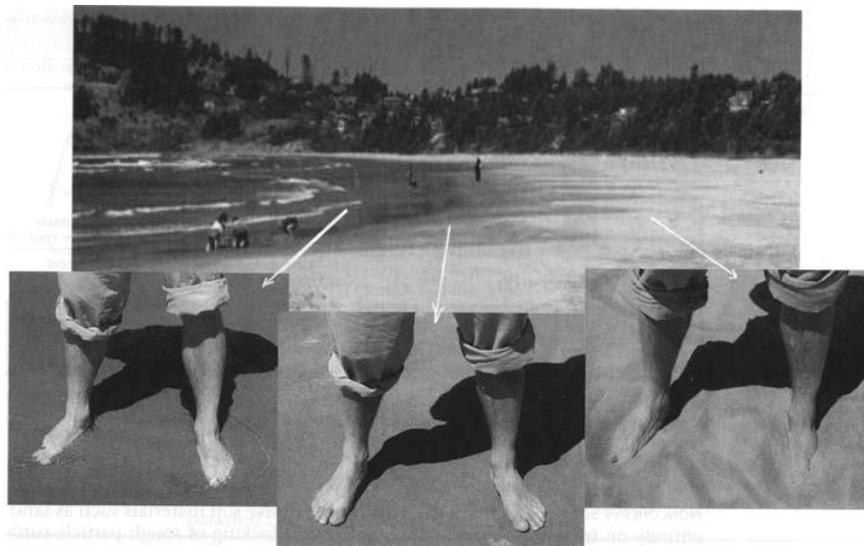


FIGURA 1.50 Uma caminhada ao longo de uma praia como esta em Oregon ilustra o conceito de resistência do solo para materiais arenosos. A areia seca (*inferior direita*) tem pouca resistência e seu pé afunda facilmente enquanto você anda. Não há nada que mantenha as partículas individuais de areia juntas para permitir que elas sirvam como uma base firme. A medida que se move em direção ao oceano, onde o solo tem sido completamente umedecido pelas ondas que chegam, mas onde não há água parada (*centro inferior*), você encontra uma base firme, indicando considerável aumento na resistência do solo. Finos filmes de água agem como pontes entre as partículas de areia, mantendo-as juntas e, portanto, resistindo à penetração dos pés. Se você permanecer em águas rasas ao longo da costa do oceano (*inferior esquerda*), mais uma vez seus pés penetram a superfície de areia, indicando que a resistência do solo foi reduzida. Cada partícula de areia é completamente rodeada por água, a qual atua mais como um lubrificante do que como uma força de ligação. Se você fosse dirigir um automóvel sobre as mesmas áreas, apenas a areia úmida mas não submersa providenciaria uma base firme. A resistência do solo é uma propriedade de grande interesse dos engenheiros, mas também deve ser calculado com as raízes das plantas a medida que elas tentam penetrar os solos com alta densidade do solo. (Foto cortesia de R. Weil)

Assentamento - Compressão Gradual

Enquanto aterros e encostas de montanhas normalmente se colapsam abruptamente devido a tensões que excedem a resistência do solo, a maioria dos problemas de fundações resulta de lento, muitas vezes desigual, afundamento vertical ou **assentamento** do solo.

Controle da Compactação. As pessoas que tentam produzir plantas deveriam, em geral, evitar qualquer prática que possa compactar o solo. Entretanto, solos a serem usados para fundações ou leitos de estrada são

compactados de propósito usando rolos pesados (Figura 1.51) ou vibradores. Compactação ocorrendo após a construção resultaria em assentamento desigual e racharia pavimentos e fundações.



FIGURA 1.51 A compactação de solos usados como fundações e estradas é realizada por pesados equipamentos como este rolo de pés de carneiro. As saliências (“pés de carneiro”) concentram a massa em pequenas áreas de contato, perfurando e amassando o solo solto e recém graduado para uma densidade ótima. (Foto cortesia de R. Weil)

Algumas partículas de solo como certas argilas silicatadas e micas podem ser comprimidas quando uma carga é aplicada acima delas. Quando aquela carga é removida, estas partículas tendem a recuperar sua forma original, com o efeito de reverter sua compressão. Como resultado, solos ricos com estas partículas não são facilmente compactados em bases estáveis para estradas e fundações.

O **teste de Proctor** é usado para orientar os esforços na compactação de materiais do solo antes da construção. Uma amostra de solo é misturada a um determinado conteúdo de água e colocada em um suporte, onde é compactada por quedas de um martelo. A densidade do solo (normalmente referido como a *densidade seca* por engenheiros) é então medida. O processo é repetido aumentando o conteúdo de água até uma *curva de Proctor* (Figura 1.48b) possa ser desenhada a partir dos dados. A curva indica a máxima densidade do solo alcançada e o conteúdo de água no solo que maximiza a compactabilidade. Em canteiros de obras, caminhões tanque podem pulverizar água para trazer o conteúdo de água no solo para o determinado nível ótimo antes que os equipamentos pesados (tais como os apresentados na Figura 1.51) compactem o solo para a densidade desejada.

Compressibilidade. O **teste de consolidação** pode ser conduzido em uma amostra de solo para determinar sua **compressibilidade** - quanto seu volume de solo será reduzido por aplicar uma determinada força. Devido à relativamente baixa porosidade e forma equidimensional dos grãos minerais individuais dos solos muito arenosos resistem a compressão uma vez que as partículas têm estabelecido em um arranjo compacto das partículas. Eles fazem excelentes solos para fundações. A alta porosidade dos flóculos de argilas e a forma de floco das partículas de argila dão aos solos argilosos uma compressibilidade muito maior. Solos consistindo principalmente de matéria orgânica (turfas) apresentam as maiores compressibilidades e geralmente são inadequadas para fundações.

No campo, a compressão de solos argilosos úmidos pode ocorrer muito lentamente após uma carga (por exemplo, uma construção) ser aplicada porque a compressão pode ocorrer somente tão rápido quanto a água pode escapar dos poros do solo - que para os poros finos em materiais argilosos não é muito rápido. Talvez, o exemplo mais famoso assentamento irregular devido a lenta compressão é a Inclinação da Torre de Pizza na Itália. Infelizmente, na maioria dos casos de assentamento irregular resulta em dores de cabeça, não em atrações turísticas.

Solos Expansivos

Os danos causados por solos expansivos nos Estados Unidos, raramente, fazem os programas de notícias noturnos, embora o custo total anual exceda aquele causado por tornados, inundações, e terremotos. As argilas expansivas ocorrem em cerca de 20% da área de terras dos Estados Unidos e causam mais de 6 bilhões de dólares em danos anualmente a pavimentos, fundações, e linhas de serviço público. Os danos podem ser severos em certos lugares em todas as partes do país, mas são mais extensas em regiões que tem longos períodos secos alternados com períodos de chuva (ver distribuição dos Vertissolos, páginas finais).

Algumas argilas, particularmente as esmectitas, se expandem quando úmidas e contraem quando secas (ver Seção 8.14). Os solos expansivos são ricos neste tipo de argila. As cargas eletrostáticas na superfície das argilas atraem moléculas de água de grandes poros para os microporos dentro dos domínios de argila. Igualmente, os cátions adsorvidos associados com as superfícies de argila tendem a se hidratar, adicionando mais água. A água impulsiona, distanciando as paredes de argila, fazendo com que a massa de solo aumente seu volume. O inverso deste processo acontece quando o solo seca e a água é retirada dos arranjos de agregados de argila, causando contração e rachaduras. Após um prolongado período de seca, solos ricos em esmectitas podem ser reconhecidos no campo pelo padrão de largura e profundidade das rachaduras que o atravessa (Figura 1.52). A expansão e contração causam movimento

suficiente do solo para rachar fundações de construções, ruptura de tubulações, e deformações no pavimento.



FIGURA 1.52 Alguns tipos de argilas, especialmente as esmectitas, sofrem mudanças significativas de volume em conjunto com mudanças no conteúdo de água. Aqui, um solo expansivo rico em argila, do tipo esmectita, se contraiu durante um período seco, causando uma rede de grandes fendas abertas na superfície do solo. (Cortesia do USDA Serviço de Conservação dos Recursos Naturais)

Limites de Atterberg

Quando seco, solos argilosos absorvem quantidades crescentes de água, ele sofre mudanças drásticas e distintas no seu comportamento e consistência. Um sólido duro e rígido no estado seco, torna-se um semissólido friável quando uma certa umidade é alcançada (denominado **limite de contração**). Caso contenha argila expansiva, o solo também começa a expandir em volume à medida que a umidade é excedida. Aumentando o teor de água acima do **limite de plasticidade**, o solo se transformará em uma massa maleável e plástica e causar expansão adicional. O solo permanecerá neste estado plástico até que seu **limite de liquidez** seja excedido, fazendo com que ele se transforme em um líquido viscoso que fluirá quando agitado. Estes conteúdos críticos de umidade (medidos em percentagem) são denominados **limites de Atterberg**.

Índice de plasticidade - O índice de plasticidade (IP) é a diferença entre o limite de plasticidade (LP) e o limite de liquidez (LL), e indica a faixa de conteúdo de água na qual o solo possui propriedades plásticas.

$$IP = LL - LP$$

Os solos com um índice de plasticidade maior que 25 são normalmente argilas expansivas que fazem leitos de estradas (Lâmina 43) e fundações fracas. A Figura 1.53 mostra a relação entre os limites de Atterberg e mudanças no volume do solo associadas ao aumento do conteúdo de água para um solo hipotético.

As argilas esmectíticas (ver Seção 8.3), geralmente possuem elevados limites de liquidez e de plasticidade, especialmente se saturadas com sódio. Caulinita e outras argilas não expansivas têm baixos valores de limite de liquidez. Os limites plásticos e líquidos de muitos solos, variando no conteúdo e tipo de argila, e três amostras de argila são mostradas na Tabela 8.10. A tendência dos solos argilosos expansivos, literalmente, descem encostas íngremes quando o limite de liquidez é excedido, produzindo perda de massa e deslizamentos de terra, é ilustrado na Lâmina 41 e 42, após página 112.

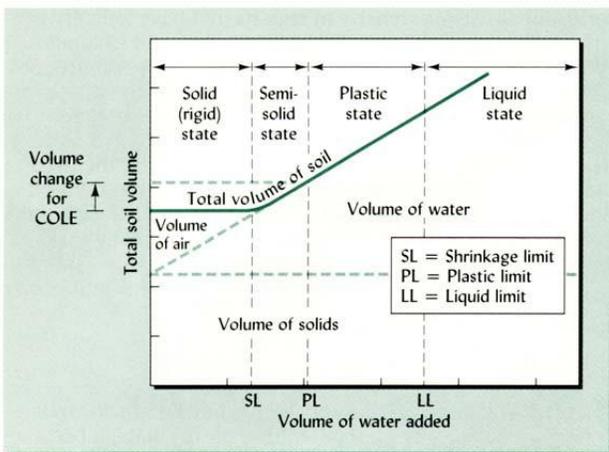


FIGURA 1.53 Uma descrição comum dos limites de Atterberg, que evidencia importantes mudanças no comportamento de solos coesivos com a variação do conteúdo de água (da esquerda para direita). À medida que água é adicionada a um certo volume de sólidos secos, primeiramente o ar será deslocado; então, quando mais água é adicionada, o volume total do solo aumentará (se o solo possuir propriedades expansivas). Quando o limite de contração (LC) é atingido, o solo rígido torna-se um semissólido friável. Com adição de mais água, o limite de plasticidade (LP) é alcançado, tornando o solo plástico e moldável. Ele permanece no estágio plástico sobre uma gama de conteúdos de água até que o limite de liquidez (LL) seja excedido, a partir do qual o solo se comportará como um líquido viscoso que irá fluir quando abalado. A mudança de volume para o cálculo do coeficiente de extensibilidade linear (COLE) é mostrada à esquerda.

Coefficiente de extensibilidade linear - A expansibilidade de um solo (e, portanto, o perigo de destruir fundações e pavimentos) podem ser quantificada como o *coeficiente de extensibilidade linear* (COLE). A Figura 1.53 indica como alterar o volume utilizado para calcular o COLE diz respeito aos limites de Atterberg. Supondo uma amostra de solo é umedecida para o limite plástico e moldado na forma de uma barra com comprimento L_m . Se a barra de solo é seca ao ar, ela se contrairá até a dimensão L_D . O COLE é a percentagem de redução de comprimento da barra de solo após a contração:

$$\text{COLE} = \frac{L_m - L_D}{L_m} \times 100$$

Sistema Unificado de Classificação Para Materiais de Solo

O Corpo de Engenheiros do Exército dos Estados Unidos e o Departamento de Recuperação dos Estados Unidos estabeleceram um sistema de classificação de materiais de solo amplamente usado a fim de auxiliar na predição do comportamento de diferentes solos na Engenharia (Tabela 1.10). O sistema primeiro agrupa os solos em solos de granulometria grossa ou fina. Os materiais grosseiros são ainda mais divididos com base no tamanho de grãos (cascalho e areia), quantidade de finos presente, e uniformidade de tamanho de grãos (bem ou mal graduados). O solo de grãos finos são divididos em silte, argila, e materiais orgânicos. Estas classes são ainda subdivididas com base em seus limites líquidos (acima ou abaixo de 50) e seu índice plástico. Para cada tipo de solo é então fornecida uma designação de duas letras baseadas primeiramente na sua distribuição de tamanho de partículas (textura), limites de Atterberg, e conteúdo de matéria orgânica (por exemplo, GW para cascalho bem graduado, SP para areias pobremente graduadas, CL para argila de baixa plasticidade, e OH para argilas ricas em material orgânico e alta plasticidade). Esta classificação de materiais do solo auxiliam engenheiros na predição da resistência do solo, expansividade, compressibilidade, e outras propriedades que os projetos de engenharia apropriados podem ser feitos com o solo em mãos (Quadro 1.7).

QUADRO 1.7 TRAGÉDIA NO BIG EASY - UMA BARRAGEM FADADA AO FRACASSO^a

Após o furacão Katrina atingir Nova Orleans em 2005, uma onda com 4 metros de altura violou a barragem da cidade em diversos pedaços, causando um dos piores desastres naturais na história Americana com cerca de 100.000 casas inundadas e mais de 1.000 pessoas mortas. Uma das piores inundações ocorreu quando a barragem da 17ª Rua fracassou (Figura 4.54). Investigações posteriores mostraram que a barragem da 17ª Rua estava fadada ao fracasso por um projeto de barragens com defeito que não tratou corretamente as camadas subjacentes de solos orgânicos e areias. Projeto ruim, combinado com uma má manutenção das barragens, permitiu que a água escoasse sob ela e enfraquecesse o solo na base.



FIGURA 1.54 Um grande helicóptero tenta fazer reparos de emergência na barragem violada da 17ª Rua vários dias depois que o furacão Katrina atingiu Nova Orleans e derrubou esta seção da barragem e do dique. Grandes pedaços da barragem podem ser vistos por cerca de 14 metros para interior. (Foto cortesia do Corpo de Engenheiros do Exército dos Estados Unidos)

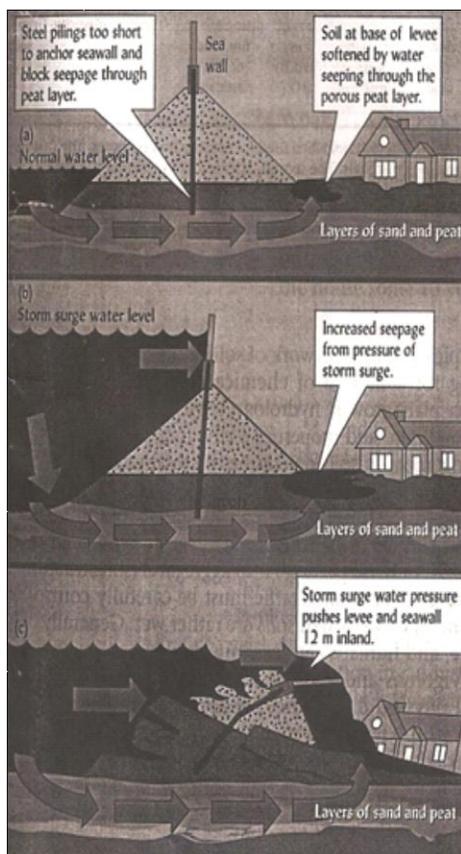


FIGURA 1.55 Ilustração (sem escala) de como as camadas enterradas de solo orgânico de baixa resistência (a) permitiu o escoamento da água da onda da tempestade (b) condenando a barragem e seu dique ao fracasso (c). (Diagrama cortesia de R. Weil)

camada de turfa em um pouco mais que "sopa", a onda da tempestade do Katrina "agarrou a corrente" no elo mais fraco, provocando deslizamentos em uma distância de 140 m do dique, empurrando ele e a barragem por cerca de 14 para o interior. A água agitada pela tempestade verteu através da ruptura, inundando a cidade de Nova Orleans.

^a Com base em informações da investigação de engenharia forense em Seed et AL. (2005) e relatórios de Marshall (2005) e Vartabedian e Braun (2006).

TABELA 1.10 O Sistema Unificado de Classificação para Classificar os Materiais do Solo (Corpos de Solo Não Naturais) para Uso na Engenharia.

Solos de granulção grosseira 50% ou mais retido na peneira n° 200 (0,075 mm)								Solos de granulção fina 50% ou mais passa na peneira n° 200 (0,075 mm)						
Cascalhos				Areias				Siltos e argilas			Siltos e argilas			Solos altamente orgânicos
Mais que 50% da fração grosseira retida na peneira n° 4 (2 mm)								50% ou menos do Limite de Liquidez						
Somente Cascalho		Cascalho com Finos		Somente Areia		Areia com Finos								
GW	GP	GM	GC	SW	SP	SM	SC	ML	CL	OL	MH	CH	OH	Pt
Cascalho bem graduado e mistura cascalho-areia, pouco a nenhum fino	Cascalho mal graduado e mistura cascalho-areia, pouco a nenhum fino	Cascalho silto e mistura cascalho-areia	Cascalho argiloso e mistura cascalho-areia	Areias bem graduadas e areia cascalhenta, pouco a nenhum fino	Areias mal graduadas e areia cascalhenta, pouco a nenhum fino	Areia siltosa, mistura areia-silte	Areia argilosa, mistura areia-argila	Siltos inorgânicos, areias muito finas, farelo de rocha, finas areias siltosas ou argilosas	Argilas inorgânicas de baixa a média plasticidade, cascalhenta, arenosa ou argila siltosa, argila enxuta	Siltos orgânicos e argilas siltosas orgânicas de baixa plasticidade	Siltos inorgânicos, areias finas ou siltos micáceas ou diatomáceas, siltos elásticos	Argilas inorgânicas de alta plasticidade, argilas rápidas	Argilas orgânicas de média a alta plasticidade	Turfa, esterco, outro solo altamente orgânico

^a As duas letras da designação (SW, MH, etc.) auxiliam engenheiros na predição do comportamento dos materiais do solo quando utilizados com propósitos de construção. A primeira letra é uma das seguintes: G = cascalho, S = areia, M = silte, C = argila, e O = material rico em compostos orgânicos. A segunda letra indica se a areia ou o cascalho são bem graduados (W) ou fracamente graduados (P), e se o silte, argila e o material orgânico possuem alto (H) ou baixo índice de plasticidade (L). Entre os materiais mais finos, os que se localizam mais ao topo da tabela são mais recomendados para fundações e base para estradas.

1.9 CONCLUSÃO

Os solos apresentam uma incrível rede de complexos físicos de superfícies sólidas, poros, e interfaces que fornecem o ambiente para inúmeros processos químicos, biológicos e físicos. Estes, por sua vez influenciam no crescimento das plantas, hidrologia, manejo do ambiente, e usos do solo pela engenharia. A natureza e propriedades das partículas individuais, sua distribuição de tamanhos, e seu arranjo nos solos determinam o volume total do espaço poroso, bem como o tamanho de poros, impactando desse modo nas relações de água e ar.

As propriedades individuais das partículas e sua distribuição proporcional (textura do solo) estão sujeitas a pouco controle por parte do homem no campo. Porém, é possível exercer algum controle sobre o arranjo destas partículas em agregados (estrutura do solo) e na estabilidade destes agregados. O cultivo e o tráfego devem ser cuidadosamente controlados para evitar danos indevidos ao manejo do solo, especialmente quando o solo está muito úmido. Geralmente, a natureza toma cuidado da estrutura do solo, e o homem pode aprender muito sobre o manejo do solo estudando sistemas naturais. O crescimento vigoroso e diversificado das plantas gera um retorno generoso de resíduos orgânicos, e as perturbações físicas mínimas são atributos do sistema natural dignos de ser imitado. A apropriada seleção de espécies vegetais; rotação de culturas; e manejo de fatores físicos, químicos, e biológicos podem ajudar a garantir a manutenção da qualidade física do solo. Nos últimos anos, esses objetivos de manejo têm sido aplicados de modo mais concreto pelo advento do sistema de cultivo conservacionista que minimizam a manipulação do solo enquanto decresce a erosão do solo e o escorrimento superficial.

O tamanho das partículas, o conteúdo de água, e a plasticidade da fração coloidal ajudam a determinar a estabilidade do solo em resposta a forças de carga do tráfego, do cultivo, ou das fundações de construções. As propriedades físicas apresentadas neste capítulo influenciam grandemente quase todas as outras propriedades do solo e usos, como discutido ao longo deste livro.