

A abordagem profissional e racional a respeito dos riscos que as obras civis e as atividades humanas podem causar ao meio ambiente é cada vez mais importante e valorizada nas sociedades modernas. Nesse contexto, é com grata satisfação que a comunidade geotécnica e geoambiental brasileira há de receber este livro, de autoria da Profa. Maria Eugenia Boscov. Felicíssima a iniciativa de produzir uma publicação sobre área tão atual e relevante como a Geotecnia Ambiental. Soma-se a isso o fato de ser a primeira obra do gênero no País. No livro, a autora apresenta, de forma clara, didática e ricamente ilustrada, diversos tópicos relacionados à Geotecnia Ambiental.

Além de colocar sua grande experiência como pesquisadora e profissional a serviço da comunidade técnica, a autora abrilhanta o livro com resultados e experiências de diversas partes do mundo. Também é gratificante ver sua preocupação em valorizar e apresentar vários profissionais e pesquisadores brasileiros. A compilação e a apresentação detalhada dessas experiências são extremamente úteis, por envolverem práticas em solos e condições brasileiras. Entretanto, a repercussão desta obra certamente não fica restrita às fronteiras nacionais, o que pode ser verificado pelo breve resumo do conteúdo do livro a seguir.

No capítulo 1, a autora apresenta e descreve os diferentes tipos de resíduos sólidos (mineração, indústria da construção etc.) e suas propriedades gerais. Trata-se de uma introdução didática para os capítulos que seguem.

O capítulo 2 aborda a geomecânica dos resíduos sólidos urbanos. São apresentados a classificação e os índices físicos desses resíduos, bem como os mecanismos de geração de chorume e gases. Propriedades geotécnicas, como permeabilidade, compressibilidade e resistência ao cisalhamento, são discutidas à luz de um grande número de resultados de pesquisas de laboratório e campo e de observações de obras instrumentadas.

O complexo tema de transporte de poluentes em solos é descrito de forma objetiva no capítulo 3. São apresentadas as definições mais relevantes, os diferentes mecanismos de propagação de contaminantes e também as formulações teóricas e as modelagens matemáticas para o problema.

O capítulo 4 expõe temas de elevada importância prática para aterros de resíduos sólidos: critérios de projeto, seleção de locais de disposição, normalização e legislação. São discutidos conceitos de projeto, dados necessários, segurança e emprego de métodos racionais para a seleção de locais de disposição de resíduos sólidos urbanos. A construção e a operação de aterros sanitários são apresentadas, bem como as legislações e normalizações existentes. Como nos capítulos anteriores, este também é exemplificado com resultados de pesquisas realizadas em diferentes partes do mundo.

Componentes fundamentais em projetos de aterros de resíduos – os materiais e as técnicas construtivas aplicados a revestimento de fundo, cobertura e sistemas de drenagem de aterros de resíduos – são objeto do capítulo 5. Materiais naturais e geossintéticos são comparados com importantes informações sobre sua utilização. Os condicionantes geoambientais e suas implicações no projeto de sistemas de impermeabilização e de drenagem de percolados são criteriosamente analisados. De particular relevância é a discussão sobre os requisitos para utilização de solos tropicais como barreiras de fluxo em aterros de resíduos. Tal assunto é especialmente interessante para os profissionais geotécnicos e geoambientais brasileiros.

A remediação de locais contaminados é tratada no capítulo 6, no qual são apresentados técnicas de gerenciamento de áreas contaminadas e métodos para controle dos poluentes do terreno. Diversas soluções mitigadoras são descritas, e suas aplicabilidades, discutidas. Entre tais técnicas, encontram-se a remoção e o tratamento do solo, a utilização de barreiras verticais, os sistemas de cobertura, as barreiras reativas, a biorremediação, a utilização de zonas alagadiças, entre outras.

O capítulo seguinte é dedicado a barragens de rejeitos. Os tipos de barragens, materiais de construção e métodos construtivos são complementados com importantes discussões e considerações sobre sua estabilidade – uma questão sensível. Os impactos ambientais provocados por barragens de rejeito são também analisados, com ênfase à importância do planejamento e do projeto geotécnico nesse tipo de obra – essa importância é destacada pela apresentação de casos relevantes da literatura de rupturas de barragens de rejeitos.

A investigação e o monitoramento ambiental são de fundamental relevância para evitar ou diminuir os riscos de contaminação do terreno. Tais temas são apresentados no capítulo 8, o último do livro. Nele, os diversos métodos de investigação de campo para o monitoramento de aterros de resíduos são descritos, bem como os instrumentos de auscultação e exemplos de aplicações em obras.

Creio que esta breve apresentação mostra a importância desta obra. Não tenho dúvidas sobre sua utilidade para alunos de graduação, pós-graduação e profissionais geotécnicos e geoambientais. Trata-se de uma valiosíssima contribuição da Profa. Boscov e da editora Oficina de Textos para a Geotecnia e para a proteção do meio ambiente.

Ennio Marques Palmeira
Universidade de Brasília

K_d varia normalmente de valores próximos a zero até 100 ml/g ou maiores; se for nulo, a zona ocupada por contaminante não é afetada por reações químicas; para K_d igual a 1 ml/g, o ponto de concentração média estará retardado por um fator entre 5 e 11 em relação ao movimento da água; para valores de K_d muito elevados, o soluto é essencialmente imóvel.

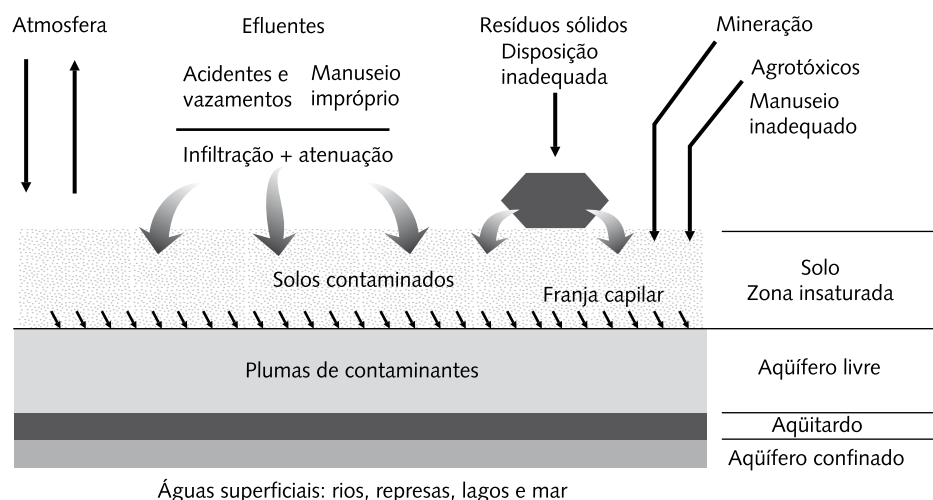
Quando uma pluma de contaminantes avança ao longo das linhas de fluxo do aquífero, a frente é retardada como resultado da transferência de parte da massa de soluto para a fase sólida. Se a alimentação for descontinuada, os poluentes serão transferidos de volta à fase líquida à medida que água com concentrações mais baixas flui através da área previamente contaminada. Se as reações forem totalmente reversíveis, toda a evidência de contaminação será eventualmente removida do sistema quando ocorrer a completa desadsorção. Os contaminantes não podem ser permanentemente isolados na zona subsuperficial, por mais que o retardamento seja forte; em algumas situações, no entanto, quando transferidos para a fase sólida do material poroso por adsorção ou precipitação, podem ser considerados fixos para a escala de tempo de interesse.

3.6 FORMAÇÃO DE PLUMAS E MODELAGEM MATEMÁTICA

O subsolo e as águas subterrâneas podem ser poluídos diretamente pelo manuseio inadequado de fertilizantes e pesticidas, pela deposição sobre a superfície do terreno de aerossóis de automóveis e indústrias, pela dissolução de gases na água da chuva, por vazamentos de substâncias tóxicas armazenadas em tanques ou sendo transportadas, como combustíveis derivados de petróleo e matérias-primas de processos industriais, pela disposição inadequada de efluentes e resíduos sólidos, entre outros, conforme ilustrado na Fig. 3.17.

Os poluentes podem atravessar as camadas superficiais não saturadas do subsolo e atingir as águas subterrâneas. Uma vez em contato com o fluxo

Fig. 3.17
Processos de contaminação do subsolo e água subterrânea



subterrâneo, podem se dissolver na água e serem por ela carregados ou fluírem como uma fase líquida não miscível adicional. Por causa do efeito da dispersão hidrodinâmica, os poluentes vão se espalhando à medida que se movem pelo subsolo, e volumes maiores vão sendo atingidos pelos poluentes a jusante da fonte. Forma-se assim a pluma de contaminação, que é a região contaminada por um ou mais poluentes a partir da fonte. O conceito de pluma de contaminação é utilizado também em relação ao ar e a águas superficiais. A Fig. 3.18 ilustra a formação de uma pluma de contaminação.

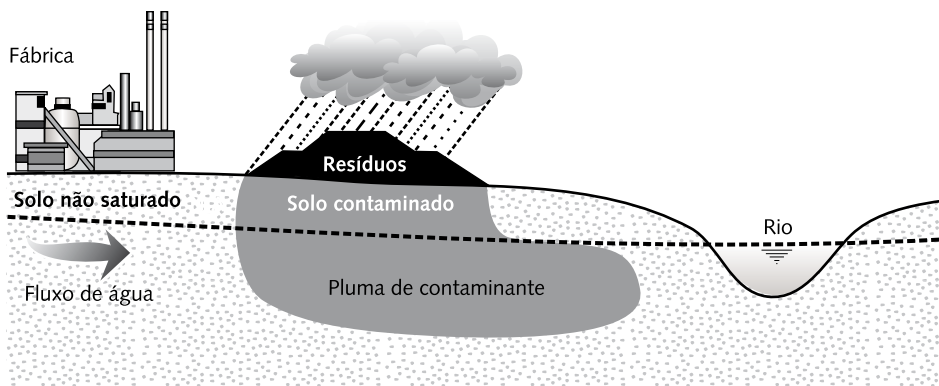


Fig. 3.18 Formação de uma pluma de contaminação

A definição da pluma, ou seja, da extensão da contaminação, é o primeiro passo nos processos de remediação de áreas contaminadas. A previsão da pluma que eventualmente se formará em caso de acidentes é também fundamental para avaliação do risco de implantação de empreendimentos que utilizem ou produzam poluentes.

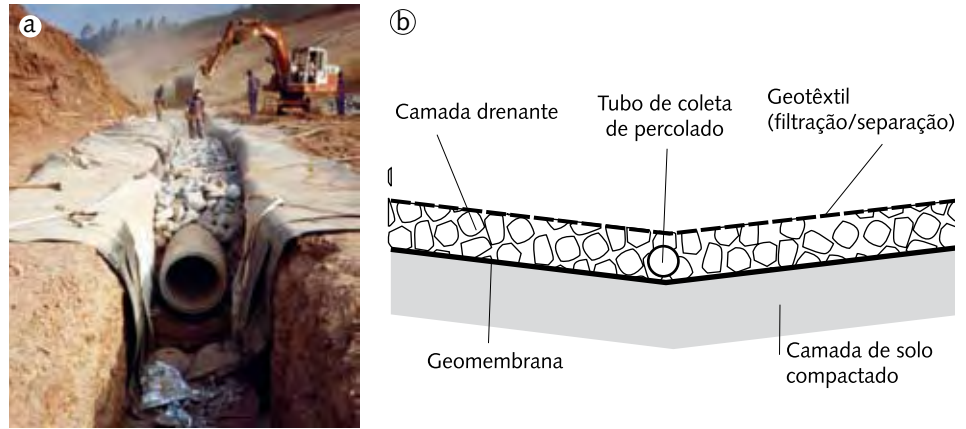
Uma ferramenta de grande importância nesses estudos é a modelagem matemática. A modelagem de um aquífero é a simplificação de uma situação real que se conhece apenas pontualmente por meio de um número limitado de dados.

Para se definir o movimento da água em um aquífero é necessário conhecer a sua geometria, as propriedades físicas do meio em cada ponto do domínio (permeabilidade, transmissividade, coeficiente de armazenamento etc.), as leis que regem o movimento da água, as condições de contorno do sistema e as ações exteriores a que o sistema pode estar sujeito. Com todas essas informações, obtém-se uma equação diferencial que descreve o movimento da água no aquífero. Com base nessa representação matemática do aquífero, pode-se simular o comportamento deste sob diferentes condições, por exemplo, após a realização de obras que modifiquem o regime de fluxo.

Além da modelagem do fluxo de água do aquífero, existem modelos desenvolvidos para a previsão do transporte de poluentes. A equação de transporte de poluentes em solos deduzida na formulação teórica, apesar

de drenagem superior, pois espera-se que o vazamento pelo sistema de impermeabilização superior seja pequeno ou nulo.

Fig. 5.13 Sistema de drenagem de percolado: (a) em construção (Kaimoto et al., 2006); (b) esquema ilustrativo
Fonte: Ferrari, 2005.



O sistema de drenagem de percolado deve cobrir o fundo e as encostas laterais de apoio do aterro. Nas encostas, por causa da dificuldade em construir o dreno com areias e pedregulhos, podem-se utilizar geomembranas texturizadas para aumentar o ângulo de atrito da interface da geomembrana com o dreno; reforçar o sistema com geogrelha ou geotêxtil; substituir o material por geocomposto drenante; ou limitar a declividade dos taludes para garantir a estabilidade contra escorregamentos.

A ABNT (1997) especifica que o sistema de drenagem de percolado seja dimensionado de maneira a evitar a formação de uma lâmina de percolado de espessura superior a 0,3 m sobre a impermeabilização de base, para limitar o gradiente hidráulico e, conseqüentemente, a velocidade de percolação pela base.

A experiência mostra que camadas de drenagem de percolado sofrem intensa colmatção, como é denominado o entupimento dos poros com conseqüente diminuição de permeabilidade, de origem física (acúmulo de finos ou de material particulado suspenso no percolado), química (precipitação de compostos neoformados) ou biológica (crescimento de bactérias ou biofilme). Para reduzir a colmatção na camada drenante pode-se utilizar uma declividade mais acentuada na base do aterro,

Fig. 5.14
Configuração da camada drenante (brita) no fundo da célula: (a) tapete; (b) espinha de peixe
Fonte: Ferrari, 2005.



aumentar o volume de vazios utilizando material bem poroso e utilizar material inerte que evite o crescimento de bactérias. A colmatção também pode ocorrer na camada de filtração sobre a camada drenante e nos tubos de coleta de percolado, como mostra a Fig. 5.16. Os filtros são utilizados nas obras geotécnicas onde há percolação para garantir a drenagem e evitar a ocorrência de *piping*, carreamento de partículas de solo que pode criar cavidades e levar a obra à ruína.

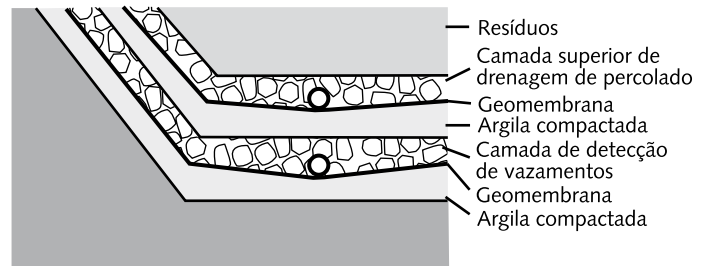


Fig. 5.15 Impermeabilização dupla com dreno-testemunho

Filtros granulares são geralmente dimensionados segundo os critérios de Terzaghi, quais sejam, os critérios de drenagem ($D_{15(\text{filtro})} \leq 4 \text{ a } 5 D_{15(\text{solo})}$) e de retenção ($D_{15(\text{filtro})} \leq 4 \text{ a } 5 D_{85(\text{solo})}$), sendo D_n o valor de diâmetro ao qual corresponde uma porcentagem igual a n de partículas de igual ou menor diâmetro. Há outros critérios de filtro para solos granulares semelhantes aos de Terzaghi, baseando-se sempre na comparação de diâmetros característicos de partículas do filtro e do solo a ser retido.



Fig. 5.16 Colmatção de tubo de percolado
Fonte: Ferrari, 2005.

De forma análoga, os critérios de retenção para geotêxteis geralmente relacionam diâmetros característicos de poros do geotêxtil e de partículas de solo. A maioria dos critérios de retenção disponíveis utiliza a “abertura de filtração”, isto é, a abertura equivalente ao diâmetro da maior partícula de solo capaz de atravessar o geotêxtil, para avaliar se este funcionará bem como filtro do solo em contato. A abertura de filtração de um geotêxtil pode ser obtida por diversos métodos experimentais, semi-empíricos e teóricos, sendo o mais freqüente o peneiramento, do qual se obtém o valor de O_n (valor de diâmetro de poro ao qual corresponde uma porcentagem igual a n de poros de igual ou menor diâmetro), geralmente O_{90} ou O_{95} (Vidal, 1998; Palmeira, 2003).

Geotêxteis utilizados como filtro da camada drenante podem sofrer três tipos de colmatção (Palmeira e Gardoni, 2000), apresentados esquematicamente na Fig. 5.17: colmatção física, ou seja, preenchimento por partículas de solo dos poros do geotêxtil; bloqueio, isto é, obstrução das aberturas de geotêxteis tecidos por partículas de solo; e a formação de uma película de baixa permeabilidade sobre a superfície do geotêxtil.

O problema de colmatção pode ser resolvido projetando-se acesso à tubulação de coleta para limpeza, como mostrado na Fig. 5.18. A limpeza pode ser por retrolavagem com água, gás nitrogênio ou por extração a vácuo. Outra opção, se permitida pelo órgão ambiental, é não utilizar filtro. Há também a alternativa de deixar o filtro colmatar; se o material sob o filtro não estiver saturado, a carga hidráulica sobre a geomembrana pode ficar restrita a 0,3 m, mesmo que a altura de percolado sobre o filtro

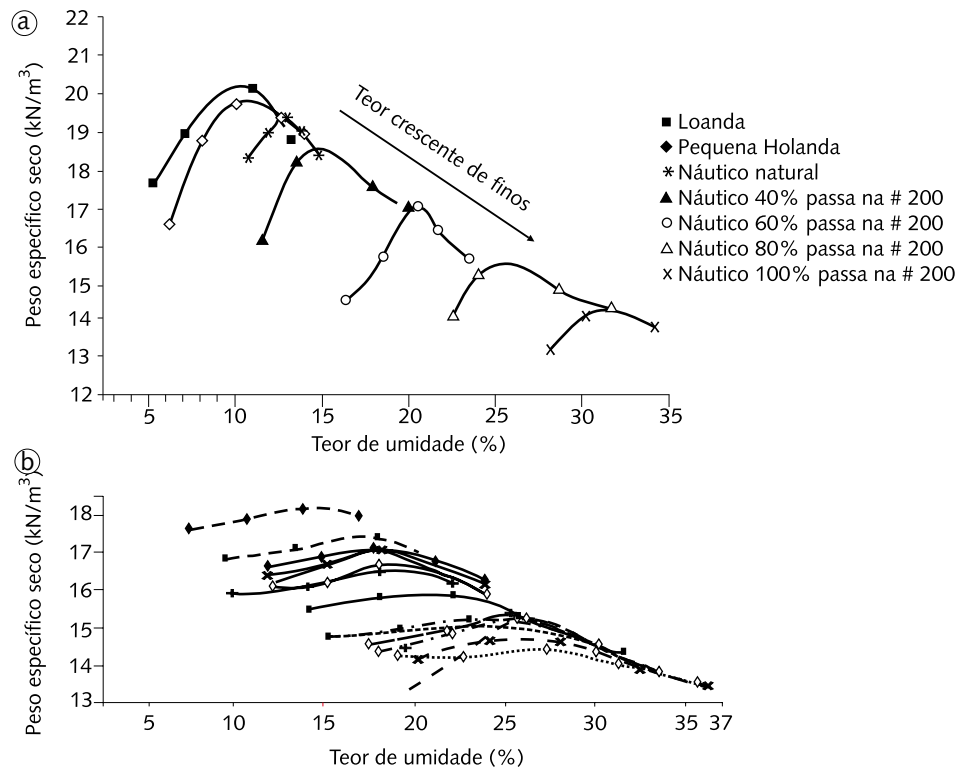


Fig. 5.31 Curvas de compactação de dois solos tropicais para diferentes energias de compactação: (a) solo lateríticos (Bernucci, 1995); (b) solos saprolíticos (Godoy, 1992).

Os problemas relativos à previsão de permeabilidade de campo por ensaios de laboratório já foram extensivamente discutidos. Daniel (1984) obteve valores de permeabilidade de campo superiores entre uma e três ordens de magnitude aos determinados em laboratório, mesmo em amostras indeformadas retiradas da camada compactada.

As principais causas das diferenças entre permeabilidade de laboratório e de campo são:

- ★ Obtenção de amostra representativa: o volume de solo ensaiado em laboratório geralmente não é grande o suficiente para conter uma distribuição estatisticamente significativa de feições, tais como estratificação, fissuras e juntas; há também uma tendência de selecionar amostras mais uniformes para os ensaios de laboratório, além de se retirar pedregulhos, raízes, conchas etc., que podem condicionar o fluxo no campo.
- ★ Heterogeneidade vertical e espacial no campo em razão de lentes de areia mais permeáveis que facilitam a drenagem mais rápida, elevando a permeabilidade média.
- ★ Método de compactação: estrutura do solo compactado no laboratório pode não reproduzir adequadamente a gerada no campo.
- ★ Direção do fluxo: geralmente, determina-se o coeficiente de permeabilidade vertical no laboratório, enquanto os ensaios de campo medem principalmente o coeficiente de permeabilidade horizontal, que é maior.

- * Crescimento de microorganismos: colmatção dos poros por crescimento de matéria orgânica no solo durante o ensaio.
- * Grau de saturação da amostra: a permeabilidade aumenta com o grau de saturação e é máxima para o solo saturado.
- * Formação de trincas de secagem: o corpo-de-prova no laboratório geralmente é acondicionado de forma a manter o teor de umidade de moldagem, enquanto no campo as trincas que se formam por secagem podem aumentar significativamente a permeabilidade da camada de solo compactado.

A questão da amostra representativa é fundamental para os solos saprolíticos, que são caracterizados por um perfil de intemperização decrescente com a profundidade e muito heterogêneo em relação à mineralogia e a características e propriedades geotécnicas. A presença de fragmentos de rocha alterada no solo também dificulta a representatividade dos ensaios de laboratório.

A Fig. 5.32 mostra a diferença de porcentagem e tamanho de fragmentos de rocha alterada de duas amostras de um solo saprolítico de filito compactadas no mesmo teor de umidade e energia, uma no laboratório e outra no campo. Os fragmentos de rocha alterada eram muito duros e difíceis de quebrar no campo, mesmo sob a energia modificada, provavelmente em razão de uma elevada sucção. No laboratório, durante o processo de secagem prévia da amostra ao ar, os fragmentos se pulverizaram. O solo depois da compactação de laboratório resultou em um material mais fino e menos permeável do que após a compactação de campo.

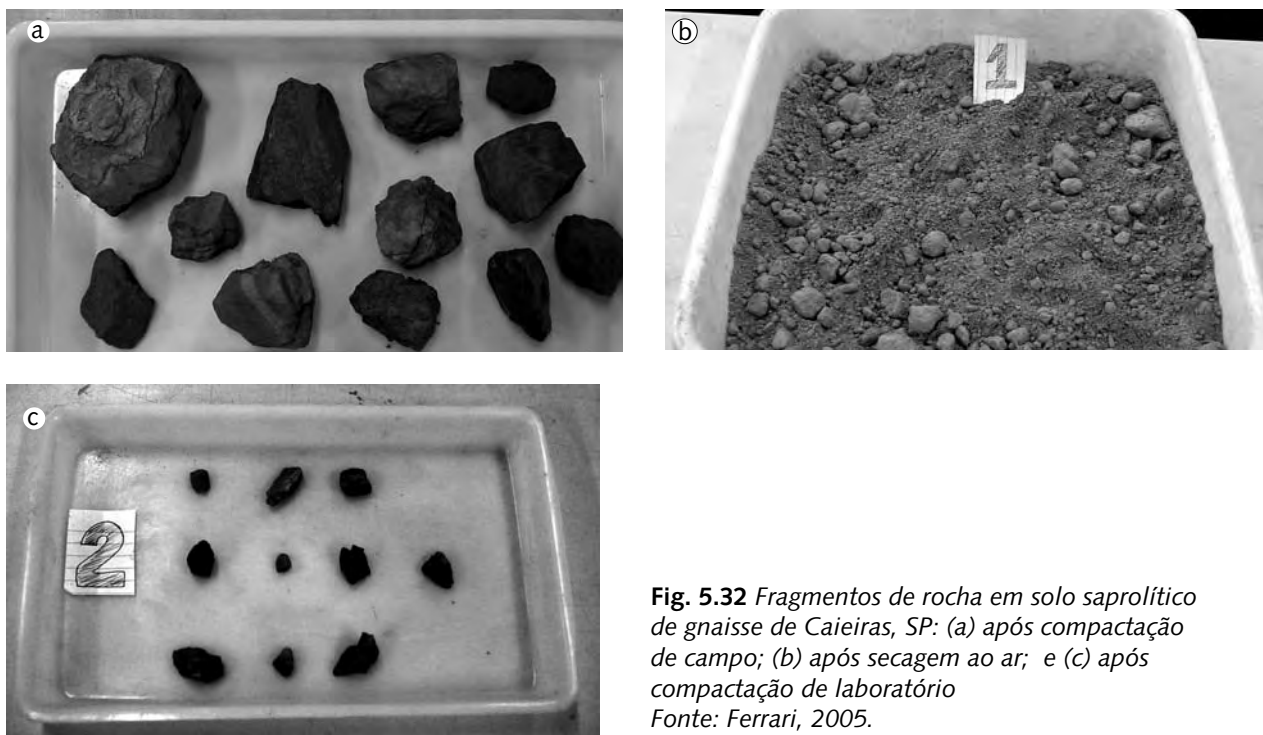


Fig. 5.32 Fragmentos de rocha em solo saprolítico de gnaiss de Caieiras, SP: (a) após compactação de campo; (b) após secagem ao ar; e (c) após compactação de laboratório
Fonte: Ferrari, 2005.