

Comportamento Mecânico do Solo em Operações Agrícolas

Walter Francisco Molina Jr



*Comportamento Mecânico do
Solo em Operações Agrícolas*

Walter F. Molina Jr



Walter Francisco Molina Jr

***Comportamento Mecânico do
Solo em Operações Agrícolas***

DOI: 10.11606/9788592238407

*Piracicaba
Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”
ESALQ / USP
Edição do Autor
2017*

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
DIVISÃO DE BIBLIOTECA – DIBD/ESALQ/USP

Molina Junior, Walter Francisco

Comportamento mecânico do solo em operações agrícolas [recurso eletrônico] / Walter Francisco Molina Junior. - - Piracicaba : ESALQ/USP, 2017.
223 p. : il.

ISBN: 978-85-922384-0-7

DOI: 10.11606/9788592238407

1. Física do solo 2. Mecânica do solo 3. Mecanização agrícola I. Título

CDD 631.43
M722c

É permitida a reprodução parcial ou total desta obra, desde que citada a fonte e autoria, proibindo qualquer uso para fins comerciais

Nenhuma referência, citação, comentário explícito ou não, contido nesta obra, como marcas e modelos de fabricantes de equipamentos, métodos e técnicas, instituições de caráter público ou privado indicam preferência, endosso ou recomendação do autor.

Endereço para contato:

wfmolina@usp.br

Durante toda nossa existência muitas pessoas, do nosso relacionamento íntimo ou não, tentam nos ajudar.

Elas, invariavelmente, nos dizem como devemos ou não devemos agir, o que fazer ou o que não fazer.

Para tanto, algumas destas pessoas usam palavras na tentativa de explicar ações e métodos para atingir tais objetivos. Outras, mais evoluídas, são exemplos, mediante seus atos.

Os verdadeiros Mestres, no entanto, vão além e nos ensinam como distinguir os que falam daqueles que agem e, assim, aproveitar as lições contidas em ambos os casos.

Os Doutores, porém, nos colocam a caminho...

SUMÁRIO

APRESENTAÇÃO	11
CAPÍTULO 1	15
BREVE HISTÓRIA DA AGRICULTURA E A SITUAÇÃO DA AGROPECUÁRIA NO BRASIL.....	15
1.1 A Contribuição das atividades agrícola e pecuária para a evolução social e econômica da humanidade	19
1.2 A Situação da agropecuária brasileira	25
CAPÍTULO 2	35
O SOLO: MEIO DE PRODUÇÃO AGRÍCOLA, PECUÁRIA E FLORESTAL	35
2.1 O solo agrícola.....	36
2.2 O que é o solo e de onde surgiu?	37
2.2.1 Material de origem.....	39
2.2.2 Ações climáticas na formação dos solos	41
2.2.3 Interferência do relevo ou topografia	41
2.2.4 O efeito do tempo	42
2.2.5 Organismos agindo no meio mineral.....	42
2.3 Fertilidade do solo e desenvolvimento vegetal.....	45
2.3.1 Algumas características dos espaços vazios ou porosidade do solo	45
2.3.2 Algumas características físicas dos componentes sólidos do solo.....	48
2.3.2.1 Composição orgânica	49
2.3.2.2 Composição mineral	49
2.3.3 A umidade do solo e a sua fase líquida.....	54
2.4 Conclusão	56
CAPÍTULO 3	61
CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DO SOLO	61
3.1 Índices físicos do solo	64
3.2 Estados de consistência do solo.....	66
3.2.1 Limite de liquidez	68
3.2.2 Limite de plasticidade.....	69
3.2.3 Limite de contração.....	71
3.2.4 Índices de consistência	72
3.3 Forças que atuam no solo	73
3.3.1 Cargas normais em partículas de solo	74
3.3.2 Atrito	75
3.3.3 Coesão.....	77
3.4 Comportamento mecânico do solo: tensão e deformação.....	81
3.4.1 Conceito de tensão efetiva e pressão neutra.....	84
3.4.2 Resistência ao cisalhamento	85
3.4.3 Tensões principais e o círculo de Mohr	88
3.4.4 Ensaio para determinação de c e ϕ	89
CAPÍTULO 4	97
COMPACTAÇÃO DO SOLO E SUAS CAUSAS	97
4.1 Compactação natural.....	98
4.2 Compactação mecânica	99
4.3 Propagação de tensões no solo e o fenômeno de compactação	101
4.4 Ensaio e determinação da compactação	107
4.4.1 Ensaio de compactação	111
4.4.2 Pré-adensamento ou consolidação	112
4.6 Consequências ambientais e econômicas da compactação na atividade agropecuária	116

CAPÍTULO 5	123
RESISTÊNCIA DO SOLO À PENETRAÇÃO DO CONE	123
5.1 <i>Aplicações geotécnicas dos penetrômetros de cone</i>	124
5.2 <i>Aplicação agrícola do parâmetro resistência à penetração de cone no solo</i>	129
5.2.1 Penetrômetro de impacto	130
5.2.2 Penetrômetro manual	136
5.2.3 Penetrógrafos	137
5.3 <i>Resultados e consequências das medidas de índice de cone</i>	140
CAPÍTULO 6	151
O CULTIVO DO SOLO E SEUS OBJETIVOS	151
6.1 <i>Objetivos do Preparo Periódico do Solo</i>	154
6.2 <i>Preparo Vertical do Solo</i>	156
6.3 <i>Conclusão</i>	157
CAPÍTULO 7	159
INTERAÇÃO SOLO-FERRAMENTA	159
7.1 <i>O Solo como um Corpo Rígido</i>	160
7.1.1 Adesão	162
7.1.2 Atrito	171
7.1.3 Abrasão	173
7.1.4 Momento Linear ou Quantidade de Movimento	175
7.2 <i>Mecânica das ferramentas agrícolas utilizadas na mobilização de solo</i>	176
7.2.1 Ferramentas Largas	178
7.2.2 Ferramentas estreitas	182
CAPÍTULO 8	189
ALTERAÇÕES DIMENSIONAIS E DINÂMICAS NAS FERRAMENTAS E RESPECTIVOS EFEITOS NA MOBILIZAÇÃO DO SOLO	189
8.1 <i>Ocorrência de falhas na mobilização do solo por ferramentas agrícolas</i>	190
8.2 <i>Relação de forças que atuam nas ferramentas</i>	191
8.3 <i>Padrões de perturbação impostos ao solo por ferramentas agrícolas</i>	194
8.3.1 Ferramentas estreitas	194
8.3.2 Associação de ferramentas estreitas	198
8.3.3 Ferramentas curvas	203
APÊNDICE 1 - FIGURAS	209
APÊNDICE 2 – METODOLOGIAS, TÉCNICAS E TEORIAS	211
MÉTODO DE OBTENÇÃO DO MÓDULO DE POISON	211
MÉTODO DE DETERMINAÇÃO DA MASSA ESPECÍFICA DO SOLO	212
ALGUMAS CONSIDERAÇÕES SOBRE TENSÃO SUPERFICIAL, CAPILARIDADE E ADESÃO	214
MÉTODO DE DETERMINAÇÃO DA ACELERAÇÃO GRAVITACIONAL RELATIVO À LATITUDE E ALTITUDE	221
MÉTODO TEÓRICO DE DETERMINAÇÃO DA CAPACIDADE DE CARGA SUPOSTADA POR UM SOLO –	
FÓRMULA GERAL DE TERZAGHI	223

APRESENTAÇÃO

*Eu sou a grande Mãe Universal...
A ti, ó lavrador, tudo quanto é meu.
Teu arado, tua foice, teu machado.
O berço pequenino de teu filho.
O algodão de tua veste
e o pão de tua casa.*

Cora Coralina

Conhecer os segredos da agricultura através da domesticação de plantas e animais foi, talvez, a mais importante das conquistas, dentre tantas outras alcançadas pelo ser humano ao longo de sua existência. Observou-se, a partir de então, um contínuo e rápido crescimento sociocultural e econômico, se comparado com todo o tempo anterior em que a espécie esteve presente na face da Terra. A relativa certeza de que teria alimento suficiente para suprir as necessidades de sua família, tribo ou aldeia proporcionou a segurança e o tempo necessários para os ancestrais do homem moderno dedicarem-se a outros afazeres que não a busca por alimento. A partir de então, novas tecnologias prosperaram: artes, engenharia, medicina e comércio, dentre outras áreas do conhecimento.

No início do século XX, a mecanização da agricultura com a introdução dos tratores revolucionou a agropecuária e conduziu a atividade a uma armadilha sem precedentes na história.

Foi possível o uso intensivo do solo, com a ocupação de novas áreas em função da facilidade da retirada da vegetação nativa. O custo de produção e o preço dos alimentos diminuiu como consequência do aumento de produção e eficiência do trabalho motomecanizado.

Tal alteração das relações do trabalho humano na atividade rural gerou na população a sensação de progresso. O solo agrícola passou a ser considerado somente um fator de produção, ao lado do trabalho e do capital. Infelizmente, tal filosofia desvincula totalmente o solo do ambiente, tratando-o como um bem renovável ou de oferta infinita, integrando-o fortemente à questão agrária, em detrimento da questão agropecuária. O preço destas modificações foi pago com a degradação ambiental, pois a ignorância sobre a aplicação da nova tecnologia motomecanizada resultou na utilização inadequada das novas máquinas que revolvem o solo e transitam sobre ele. Seus efeitos podem ser notados atualmente nos campos e pradarias do planeta, assim como

nos cursos d'água. As alterações das condições físicas do solo foram, a partir de então, rápida e inconsequentes na busca por alimento e poder.

Infelizmente, no início do século XXI, esta filosofia ainda comanda o comportamento de parte daqueles que usam a terra como meio de produção. Mesmo com o progresso do conhecimento e dos avanços da ciência ambiental, máquinas e implementos continuam desmatando vorazmente, revolvendo o solo e transitando sobre ele de forma indiscriminada e sem o menor controle, provocando toda ordem de degradação física por ação mecânica.

O comportamento físico do solo resulta da combinação de uma série de efeitos associados a fatores que podem ser divididos em duas grandes categorias: as de origem *ambiental* e as de *formação* ou *composição*. Os fatores ambientais estão sob constante alteração, quer seja por ação do clima, dos seres vivos que habitam a região ou deliberadamente por ação humana, através de uso agrícola ou modificação para outros fins, relacionados com obras civis e mineração, por exemplo. Os fatores de formação, referentes à composição mineralógica do solo estão intimamente relacionados com os fenômenos que a ele deram origem e representam características que são praticamente fixas e de difícil modificação.

Na exploração agropecuária, em decorrência da aplicação de tecnologias mecanizadas, as necessidades operacionais dos equipamentos utilizados nas atividades de cultivo e tração, muitas vezes, exigem condições de solo antagônicas àquelas desejáveis para o bom desenvolvimento e frutificação das plantas. O conhecimento das propriedades físicas dos solos cultivados, portanto, pode colaborar na manutenção de sua fertilidade e integridade estrutural, retardar ou atenuar os

efeitos degradativos da atividade humana na produção, possibilitando desenvolvimento de técnicas cada vez mais adequadas de uso, ao longo do tempo. Além disso, tal conhecimento maximiza a eficiência da aplicação e utilização dos equipamentos necessários à produção e minimiza os efeitos indesejáveis resultantes de operações agrícolas, assim como reduzem a exigência de energia para tração e movimentação sobre a superfície.

Os fatores ambientais que possuem maior potencial de interferência nas propriedades físicas do solo são:

- Conteúdo de água;
- Tipo e intensidade de exploração;
- Sistema de manejo;
- Tipo e quantidade de sais existentes;
- Grau de compactação;
- Cobertura vegetal e quantidade de material orgânico;
- Temperatura (ambiente e insolação).

Os fatores de formação ou de composição que determinam as propriedades físicas do solo são:

- Tipo e proporção de minerais;
- Origem e estrutura;
- Forma e tamanho de partículas;
- Tipo e quantidade de cátions presentes na solução do solo;
- Proporção de material orgânico.

Na produção agrícola, pecuária e florestal, o que se considera *solo* é composto pela camada superficial da crosta terrestre que, via de regra, é rejeitada por outras atividades humanas como

a engenharia civil e a mineração, uma vez que se trata de material instável. No entanto, estes dois setores do conhecimento são os que executam a maior parte dos estudos sobre as propriedades mecânicas dos solos. Tais estudos, em grande parte das vezes, não se ocupam da camada superficial. A expressão “melhoramento de solo” é um termo comum na construção civil e refere-se a ações que visam compactar o solo (o qual em muitos casos tem que ser substituído por materiais mais homogêneos provenientes de uma região geralmente mais profunda, aquilo que os agricultores classificam como *subsolo*, de forma que ele suporte, por exemplo, o leito de uma rodovia. Melhorar o solo quando o objetivo é produzir *commodities* agrícolas tem outro significado e está relacionado com ações, em grande parte, opostas àquelas realizadas pela engenharia civil, procurando evitar a compactação e remediá-la quando já instalada, dentre outras de caráter químico relacionado com nutrição de plantas.

Então, o que se considera solo agrícola poderia ser a parcela da crosta terrestre chamada *camada de aradura* (ou arável) representada pelos primeiros 30 a 40 centímetros de profundidade, que é a região onde se observa a maior exploração pelas raízes das plantas. Além desta profundidade pode-se considerar mais algum material (quando presente), pertencente aos horizontes mais profundos, cujo interesse principal seria o de oferecer seus espaços vazios (poros) como reservatório de água.

Como resultado da ação das ferramentas usadas em operações agrícolas, a região superficial onde ocorrem os fenômenos relacionados à tração e ao cultivo já não possui sua estrutura original, uma vez que foi revolvida, em alguns casos, através de milênios. Assim, os profissionais que se ocupam em estudar o comportamento

mecânico deste material devem estar preparados para trabalhar com material amolgado e que possui elevada parcela de matéria orgânica, composição química totalmente alterada pela adição de fertilizantes, além de saber que na natureza está sujeito a todos os tipos de ações macro e microbiológicas.

Portanto, estudar o comportamento mecânico do solo agrícola torna-se uma tarefa extremamente complicada. Sua própria composição, em condições naturais e não perturbadas é complexa. As inter-relações eletroquímicas das partículas com a água e os eletrólitos, a determinação dos efeitos de manejos passados assim como dos atuais e a inadequada aplicação de aproximações de teorias físico-químicas e mecânicas dificultam o trabalho de reproduzir em laboratório as condições de campo.

A despeito das dificuldades em quantificar os fatores que interferem no comportamento mecânico dos solos, muitos progressos têm sido alcançados e os conhecimentos adquiridos neste processo permitem afirmar que é possível melhorar o desempenho dos equipamentos de cultivo e tração através deles.

Da mesma forma, conhecer o solo e seu comportamento mecânico torna-se fundamental para que o profissional das ciências agrárias possa tomar decisões no sentido de preservá-lo. Com isso poderá implementar ações que auxiliem na manutenção da fertilidade, conservação da sua estrutura, minimizar os processos de compactação e erosão o que, por consequência, resultará em enormes benefícios para a manutenção da integridade da água de superfície e de subsolo. Ao mesmo tempo pode trabalhar no sentido de diminuir a demanda de energia nas operações motomecanizadas como também minimizar o desgaste dos equipamentos. Quando necessário provocar o

revolvimento ou qualquer outra forma de mobilização, este conhecimento ajudará a obter resultados mais significativos para a necessidade das plantas, concorrendo para a eficiência da utilização dos insumos.

Associados a outros avanços das ciências agrárias, tais conhecimentos levarão a atividade de produção no campo a uma viagem segura ao verdadeiro campo do agronegócio, deixando de vez a era da exploração ambiental, pura e simples.

Este texto tem como finalidade discutir o comportamento mecânico do solo agrícola, mediante compilação de conhecimentos obtidos de publicações especializadas das engenharias civil, de solos, agrícola e agrônômica. Seu objetivo é fornecer subsídios a estudantes e profissionais do setor de ciências agrárias para auxílio na solução de problemas básicos relacionados ao cultivo e à tração, nas atividades produtivas.

Para tanto ele foi dividido em duas partes. A primeira procura, brevemente, relativizar no tempo a atividade agropecuária, o período de existência do homem moderno e sua consequência na história do planeta, recorda os principais fatores que influenciam a fertilidade dos solos agrícolas e busca definir, de acordo com os conhecimentos de engenharia de solos, as bases gerais do seu comportamento mecânico com maiores interesses para a agricultura. A segunda parte estuda o comportamento do solo como um corpo rígido e sua resposta à mobilização pelas ferramentas, assim como sua capacidade de suporte quando submetido a tensões pelos dispositivos de rodados das máquinas que transitam e desenvolvem tração na sua superfície.

BREVE HISTÓRIA DA AGRICULTURA E A SITUAÇÃO DA AGROPECUÁRIA NO BRASIL

Do solo fez o Senhor Deus brotar toda sorte de árvores agradáveis à vista e boas para alimento... Tomou, pois, o Senhor Deus ao homem, e o colocou no jardim do Éden para o cultivar e o guardar.

Gênesis, 2:9-15

Ao descrever o início do universo, a Bíblia¹ afirma que as plantas ainda não brotavam sobre a terra, pois não havia chovido e não havia quem a lavrasse. Então, foi criado o homem, a quem foi dada a missão de cuidar do cultivo do solo e da preservação ambiental. Independente de conotações religiosas, esta passagem, num dos livros mais antigos da humanidade, reflete a importância das atividades relacionadas à produção de alimentos.

Desde o domínio da agricultura, na pré-história e seu contínuo desenvolvimento até o presente a humanidade desenvolveu comportamentos socioeconômicos dos quais derivaram

interferências ambientais importantes. Para compreendê-las seria desejável contextualizar os acontecimentos históricos, tanto geológicos como arqueológicos e localizá-los dentro de um tempo que permita ao ser humano a experiência de viver toda a história do planeta Terra, dentro da escala de uma vida.

A ciência trata a formação do universo, a origem da vida, assim como da evolução das espécies, de forma diferente daquela descrita pela Bíblia. Há 4,56 bilhões de anos uma imensa massa de gases teria surgido próxima a uma estrela e ao longo do tempo foi se resfriando e adensando. No decorrer dos acontecimentos teriam ocorrido trans-

¹ BIBLIA DE ESTUDO DE GENEVRA. Cultura Cristã e Sociedade Bíblica do Brasil. São Paulo, Cultura Cristã, 1999, 1728p.

formações que deram origem às fases sólida, líquida e gasosa do que conhecemos hoje como Terra. Especula-se que, num determinado momento da evolução do planeta, a atmosfera seria composta de moléculas de hidrogênio, metano, amônia e vapor d'água que, na presença de raios ultravioleta e descargas elétricas haveriam de se combinar em compostos orgânicos simples, que posteriormente originariam os aminoácidos². Mesmo que, com possibilidades infinitamente pequenas, considera-se que tais compostos tenham sofrido polimerização, originando moléculas mais complexas, comparáveis àquilo que se conhece atualmente como proteína. As teorias mais modernas preconizam que tais reações tenham acontecido dentro de poças de água aquecidas ao redor dos grandes e antigos vulcões e dali arrastadas pelas chuvas para dentro dos oceanos primitivos.

Ao longo de milhões de anos poderiam estas proteínas, juntamente com outros materiais, casualmente ter formado estruturas ainda mais complexas. Segundo a teoria aceita no atual momento do conhecimento humano, num determinado momento, teriam tais estruturas, desenvolvido uma série de reações químicas em cadeia que possibilitaram o aparecimento de um organismo com características cujo comportamento chama-se de "vida". Seriam capazes de conseguir energia (possivelmente química) para continuar o processo de reações em cadeia, aumentar seu volume e se reproduzir em outros indivíduos iguais a si próprios. Seriam, portanto, as primeiras células vivas.

Evidentemente, determinar precisamente há quanto tempo ocorreram tais fatos é de extrema dificuldade, mas acredita-se que teriam acontecido por volta de três bilhões e meio de anos atrás. Cerca de um bilhão de anos depois destes aconte-

cimentos surgiriam os primeiros organismos capazes de realizar fotossíntese oxigênica. Então, nos dois bilhões de anos seguintes o planeta seria dominado por tapetes de algas que cobririam a superfície dos oceanos. Somente nos últimos 650 milhões de anos surgiriam os animais.

É nesta escala inimaginável de tempo, que o homem estuda a sua evolução. Com isso, acredita-se que os ancestrais humanos mais antigos (os primeiros primatas), surgiram na escala evolutiva há 65 milhões de anos. O homem moderno apareceu somente entre 400 mil e 150 mil anos atrás de nosso tempo. Análises do DNA da espécie *Homo sapiens* (cujo aparecimento no planeta data de um período entre 70 mil e 200 mil anos, segundo autores especializados) sugere que houve, a partir desta época, no sudoeste da África, uma segregação em pelo menos 40 linhagens que, entre 70 e 60 mil anos atrás, se dispersaram por todo o continente. Pesquisas recentes indicam que por volta de quarenta mil anos antes de nossa época tenha ocorrido uma grande seca naquela região do planeta, o que quase dizimou a espécie, não fosse sua qualidade maior, que é a inteligência e decorrente capacidade de adaptação. Tais acontecimentos teriam forçado nossos ancestrais a dividirem-se em pequenos grupos que buscaram novos locais para viver.

Estes seres viveriam em grupos, de forma nômade, de modo que seu estilo de vida seria o de caçadores-coletores, comportamento que faria com que a maior parte do tempo fosse gasto com a busca de alimentos e de qualquer lugar que oferecesse proteção contra os grandes predadores. No restante, o comportamento seria próximo ao de um animal que come quando encontra alimento e depois descansa.

² Fato demonstrado no conhecido experimento dos cientistas Stanley Miller e Harold Urey, em 1953, na Universidade de Chicago.

Mas, segundo achados arqueológicos, num tempo próximo de dez a doze mil anos antes de nosso tempo, algo muito importante aconteceu.

Imagina-se que, em algum momento, alguém percebeu que dos restos de uma refeição (uma fruta, por exemplo), deixados no chão ou de alguns grãos abandonados num canto qualquer, *inesperadamente*, brotou uma planta cujas características eram as mesmas daquele arbusto do qual ela havia sido extraída. Com sua capacidade de raciocínio para relacionar os fatos, as causas e os efeitos dos eventos, este ancestral primitivo do homem atual imaginou que aquela planta poderia crescer e se desenvolver, para num futuro muito próximo produzir as mesmas frutas ou grãos que, até então somente seriam encontrados na savana. Este ser teria cuidado da planta e com isso obteve o resultado esperado.

Provavelmente, este *alguém* foi uma mulher, pois acredita-se que neste momento da história (pré-história), sendo os humanos uma espécie nômade, caberia aos homens as atividades de caça, pesca e até a pilhagem de outros grupos, enquanto que às mulheres seria confiado o cuidado com as crias e a coleta de frutos, grãos e raízes possibilitando, portanto, a elas maior tempo para observação dos fatos.

Outras teorias especulam sobre novos caminhos para o domínio da agricultura. Uma delas é a de que nossos ancestrais retiravam plantas indesejáveis (daninhas) das imediações das plantas que produziam os grãos dos quais se alimentavam e, com o passar do tempo, observaram que as sementes delas caídas germinavam, dando origem a outras plantas. Ainda é possível que tenham observado que novas plantas poderiam surgir através da germinação de sementes armazenadas.

De qualquer forma, não tardou para que, com base nestas observações, os humanos primitivos tentassem, com sucesso, repetir tais eventos, criando assim suas sementeiras. Estava, pois, *dominada* a agricultura. Pode-se dizer que esta foi a forma pela qual o ser humano serviu-se dos frutos da árvore do conhecimento, pois tal fato acelerou o processo de desenvolvimento tecnológico.

A partir de então, com a prática da agricultura, iniciou-se a transformação da ecossfera e práticas de experimentação baseadas em observação, tentativa e erro, possibilitaram o aumento de produtividade que, por sua vez, tornou o ser humano independente do meio para conseguir alimentos, na medida em que poderia produzi-los.

Esta escala de tempo, desde o surgimento do planeta até o presente (da ordem de milhares de milhões de anos), dificulta a consciência temporal dos fatos, uma vez que a vida média do ser humano é, na atualidade, de pouco mais de 70 anos. Então, para que se possa sentir a emoção das fases da evolução brevemente descritas até aqui, sugere-se um exercício de imaginação sobre a vida de um (ou uma) jovem que completa vinte e cinco anos de idade na data de hoje.

Imagine, pois, que tal jovem terminou seu curso de ciências agrárias dois anos atrás e como foi um aluno muito aplicado nos estudos, conseguiu uma bolsa para cursar mestrado logo em seguida. Na manhã do dia de hoje foi apresentada sua dissertação, que teve aprovação com louvor.

No presente instante seria um final de tarde e, em casa, num momento de reflexão sobre sua sorte e o restante de sua vida, ele (ou ela) pensa sobre seu emprego, já garantido, numa grande empresa rural como gerente de mecanização

agrícola onde iniciará as atividades profissionais amanhã pela manhã. Seu primeiro trabalho: *começar o preparo de solo para implantação de uma cultura de soja.*

Continuando com o exercício, a idade do planeta Terra será transformada na idade do (da) jovem. As datas de nascimento (do jovem e da Terra) serão, para ambos o ano *zero*. O início do trabalho, amanhã de manhã, coincidirá com o momento em que aquela mulher, ancestral primitiva do Homem moderno, descobriu o segredo contido nas sementes e passou a reproduzir plantas novas a partir delas. Este ponto da história seria o início da revolução agrícola do Neolítico Superior, representado na figura 1.1. Desta forma os fatos relatados até aqui se dispõem na sequência mostrada na tabela 1.1.

Após o desenvolvimento do conhecimento que permitiu o domínio da agricultura, alguns comportamentos importantes do homem primitivo

começaram a ser modificados. Os grupos nômades puderam estabelecer um local para viver, pois seria possível extrair o alimento necessário de um campo de cultivo. Isso representou para o ser humano um avanço em segurança, pois não havia mais necessidade da exposição ao ataque dos inimigos naturais nas savanas, quando da busca por alimentos. Assim, surgiram as primeiras aldeias. Além disso, haveria mais segurança também com relação à obtenção de comida. O tempo economizado na diminuição das expedições para encontrar comida seria utilizado em tarefas mais nobres: melhorar a eficiência do trabalho e das condições de vida, acumular conhecimento tecnológico, artístico, de comunicação e transmissão de ideias. Além de significar aumento na idade média da população, tais fatos resultaram num conjunto de ações que podem ser entendidos como o conceito de progresso.

Tabela 1.1 Sequência de tempo correspondente a vinte e cinco anos de idade de uma pessoa, em relação à idade do planeta Terra.

Fato	Tempo Real (1.000 anos)	Época de Vida da Pessoa (com 25 anos na atualidade)	Idade Aproximada
Surge o Planeta	4.560.000	Nascimento	-x-
Surge a primeira célula	3.500.000	Início do 1º Grau Escolar	7 anos
Surgem os animais	650.000	Início do 8º Semestre da Faculdade	21 anos e meio
Surgem os Primatas	65.000	Início do último Semestre do Curso de Mestrado	24 anos e meio
Surge o Homem Moderno	150	Almoço de Hoje	Hoje*
Domínio da Agricultura	10	Há ½ hora	Agora

* Deve-se considerar que este exato instante é um final de tarde.

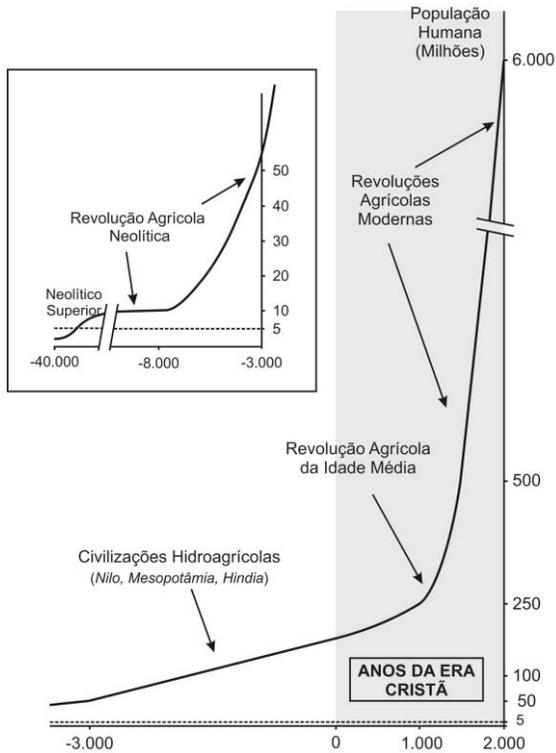


Figura 1.1. O desenvolvimento da população humana e as revoluções tecnológicas na história da agricultura. Adaptado de Mazoyer & Roudart (2010).

Todos estes fatos e condições relativos ao tempo decorrido e o que estará por vir levam a mais reflexões sobre as ações do jovem personagem do exercício de imaginação proposto:

Tudo aquilo que o jovem imaginário realizar nos próximos minutos de seu trabalho, que se inicia amanhã pela manhã, poderá devastar grande parte do planeta.

Não entendeu? Pois bem, no exercício de imaginar um jovem recém-diplomado em seu curso de mestrado, anteriormente proposto, o domínio da agricultura só ocorreu há vinte e nove

minutos na escala de tempo proporcional à sua idade hipotética. O conhecimento adquirido pelo ser humano sobre como produzir alimento, possibilitou o crescimento da população e o desenvolvimento da espécie até os padrões sociais atuais. Portanto, a imensa maioria da degradação ambiental observada atualmente ocorreu depois que o ser humano dominou as técnicas agrícolas e pecuárias e devido às importantes mudanças comportamentais decorrentes de tal conhecimento.

1.1 A Contribuição das atividades agrícola e pecuária para a evolução social e econômica da humanidade

Na escala de tempo da criação do planeta Terra praticamente todo o processo de degradação do ambiente ocorreu num tempo desprezível em relação à sua totalidade.

Deve-se lembrar ainda que, segundo os antropólogos, a idade média do homem primitivo seria em torno de vinte e cinco a trinta anos e no atual estágio de desenvolvimento tecnológico, esta média facilmente ultrapassará os oitenta anos, para a média da população total, num futuro bem próximo. Além disso, estes estudiosos afirmam que naquela época, o planeta poderia suprir as necessidades de aproximadamente seis milhões de humanos, vivendo um estilo de vida caçador-coletor.

O desenvolvimento de tal conhecimento tecnológico permitiu que o homem produzisse mais alimentos. Com isso foi possível que, sob a proteção das aldeias, houvesse aumento da população, o que se incrementou rapidamente. Além disso, melhores condições de vida também possibilitaram que se vivesse por mais tempo.

Em decorrência de tais condições surgiram novas necessidades sociais, dando origem à organização em função das tarefas exigidas pelos novos problemas a serem solucionados. Daí, com mais pessoas para alimentar, os líderes se empenharam em desenvolvimento de técnicas para potencializar a produção e produtividade agrícola.

Não é difícil de imaginar que se tenha aprendido, em relativamente pequeno período de tempo, que sementes enterradas germinavam melhor que aquelas que eram simplesmente deixadas sobre o solo. No entanto o físico do ser humano (equipado de mãos hábeis, porém frágeis para trabalhos vigorosos) não é adequado para produzir covas com a finalidade de enterrar sementes.

O próximo passo, portanto, seria desenvolver ferramentas que ajudassem na abertura das tais covas³. Um pedaço de galho reto deu lugar a utensílios mais elaborados, feitos de madeira entalhada e recurvada. Mais evoluídos, ferramentas de materiais mais resistentes como ossos, conchas e pedras podem ter sido utilizados para revestir a madeira. Não demoraria para que tais ferramentas evoluíssem para instrumentos capazes de abrir sulcos rasos, no lugar de covas.

A seguir, surgiram estruturas mais elaboradas que eram usadas por, talvez, dois homens. Enquanto um puxava o outro forçava e conduzia a ferramenta pelo solo. Mais recentemente foram adaptadas para serem atreladas a animais, cuja domesticação deve ter ocorrido concomitante ao domínio da agricultura. É interessante que se observe que os progressos feitos pelos seres humanos mais primitivos (durante milhões

de anos desde o *Homo habilis*) parecem insignificantes quando comparados aos extraordinários progressos tecnológicos obtidos nos últimos quarenta ou cinquenta mil anos. Este desenvolvimento possibilitou que se desenvolvesse a extração de recursos ambientais em quantidade além de sua capacidade de recuperação natural⁴, necessidade provocada pelo crescimento populacional. Esta situação aproximou a espécie de uma situação de capacidade limite de tolerância ambiental.

Então, pode-se imaginar que a habilidade de cultivar a terra não tenha sido uma descoberta, mas sim, resultado de uma necessidade. No entanto, esta atividade como forma de produção de alimentos que seria o sustento das primeiras aglomerações de seres humanos, certamente, demandava enorme quantidade de trabalho e energia para os padrões da época e, assim, somente seria executada quando fosse absolutamente indispensável. A melhor das técnicas conhecidas até então restringia-se unicamente à abertura de sulcos para deposição das sementes ficando, portanto, longe do que denominamos hoje de *preparo de solo*.

Com o aumento da necessidade de alimentos devido ao inevitável crescimento da população e considerando a evolução observada nas ferramentas utilizadas na agricultura primitiva, é possível inferir que as áreas naturais para semeadura e condução das “roças” já não eram mais suficientes. Começou-se, então, a derrubada do mato para aumentar a área de produção, intensificando o fenômeno de degradação ambiental.

³ Informações arqueológicas dão conta de que ferramentas mais elaboradas começam a surgir com o *Homo sapiens*. Até então, num mundo dominado pelo Homem de Neandertal, a confecção de ferramentas pouco havia evoluído em relação àquelas elaboradas por espécies ancestrais do ser humano, o *Homo habilis* e o *Homo erectus*.

⁴ A caça desenfreada e predatória, por exemplo. Há razões para crer que grupos de pessoas conduziam manadas inteiras para precipícios, causando a morte de centenas ou até milhares de animais de uma única vez.

Por tratar-se de uma atividade anterior à escrita, o registro da evolução da agricultura ainda é obscuro. Há quem defenda que a atividade surgiu concomitantemente em várias regiões do planeta, nos vales e nas várzeas. As principais regiões agrícolas da antiguidade estariam localizadas nos vales dos rios Tigre e Eufrates na Mesopotâmia (atual Iraque), Amarelo e Azul, na China e Nilo, no Egito. Há notícias de intensas atividades agrícolas no norte do Peru, na América do Sul, nesta mesma época. No chamado *crescente fértil do Oriente Médio* e na África teriam sido cultivados, inicialmente, centeio e grão de bico. Posteriormente “einkorn” e “emmer”, dois ancestrais selvagens do trigo moderno. Nas Américas encontrou-se amendoim, algodão e legumes.

É importante notar que o ato de selecionar, cultivar e criar outras espécies, modificar o ambiente e construir abrigos e sociedades “urbanas”, em benefício próprio não são exclusividades da espécie humana. Castores e abelhas constroem suas moradias. Os primeiros modificam profundamente o ambiente com suas represas e os insetos se reúnem em sociedades complexas. Formigas e térmitas cultivam fungos como fonte de alimento. Algumas espécies de formigas “cuidam” de pulgões como animais confinados, aproveitando-se da seiva das plantas, por eles extraídas, como seu alimento.

O ser humano não nasceu construtor muito menos agricultor. Formigas e térmitas, por exemplo, replicam o comportamento, de suas espécies e utilizam seus dotes anatômicos (presas, mandíbulas, etc.) para obter ganhos de outras espécies já previamente domesticadas (de forma

inata), enquanto que humanos desenvolveram a técnica de domesticar plantas e animais. Neste ato, proporcionaram a estas espécies um aumento na sua *valência ecológica*.

O advento da metalurgia tornou possível um considerável avanço nas técnicas de cultivo à medida que o revestimento metálico dos utensílios utilizados para revolver o solo tornou-os mais resistentes.

Pesquisas arqueológicas afirmam que o primeiro arado de tração animal foi utilizado na China, por volta de 2.800 a.C. A Bíblia, refere-se à tração animal pela primeira vez no livro de Jó⁵, que tem data estimada anterior à 1.500 a.C., embora o livro de Gênesis⁶ já faça referência à culturas em grandes áreas. Devido às dificuldades relacionadas às técnicas de metalurgia, não se tem notícia de grandes evoluções nos arados, desde então.

O centro da atividade econômica, durante milênios, foi a agricultura. Toda produção de bens e riquezas esteve baseada nos trabalhos com a terra e na produção de alimentos.

No início do século XVIII, na Inglaterra, Joseph Foljambe inovou e produziu o que se pode chamar de primeiro arado de aivecas moderno, o qual foi construído em larga escala por uma indústria. Somente em 1763, em Berwickshire, no sul da Escócia, foram produzidas aivecas com base em cálculos matemáticos para suas curvaturas.

Em 1892, John Forlich, mecânico de Iowa, nos EUA inventa o primeiro trator com motor movido a gasolina, que se locomovia sobre esteiras. Clarence Leo Best inicia em 1910 a fabricação de tratores de rodas pneumáticas,

⁵ Ou com corda amarraráis, no arado, ao boi selvagem? Ou escavará ele os vales após ti? Jó, 39:10

⁶ Porque já houve dois anos de fome no meio da terra, e ainda restam cinco anos em que não haverá lavoura nem sega. Gênesis, 45:6

também nos EUA. Em 1917 Henry Ford lança o primeiro modelo Fordson, que se tornou um enorme sucesso de vendas e a partir daí a tecnologia começa a mudar decisivamente a história da agricultura.

Durante o século XIX, o alemão Justus von Liebig, iniciou seus estudos sobre a nutrição das plantas com a adição de substâncias químicas ao solo (o que lhe conferiu o título de “Pai da Agricultura Moderna”). No entanto, somente em meados do século XX foi possível aplicar os conhecimentos em larga escala, por questões de tecnologia industrial de produção de compostos químicos em quantidades necessárias, além de questões culturais. Depois da Segunda Grande Guerra Mundial, com o advento dos fertilizantes químicos, a agricultura deu seu grande salto. Estas substâncias produziram no solo, em semanas, efeitos que o pousio ou a adição de esterco necessitariam de anos para realizar.

Datam da mesma época, a introdução no mercado agrícola de outras substâncias químicas que serviriam de suporte aos agricultores para controle de pragas e doenças das plantas e animais domésticos, o que resultou num enorme ganho de produtividade.

Estes avanços possibilitaram a substituição da mão de obra no campo provocando uma rápida urbanização⁷. Nos EUA, em 1930 a população rural seria de trinta milhões de pessoas que produziam alimentos para cem milhões de habitantes. No ano de 2006, somente três milhões de trabalhadores rurais produziam alimentos para trezentos milhões de habitantes, com excedentes para exportação ao resto do planeta.

⁷ Segundo Mazoyer & Roudart (2010) o êxodo rural verificado a partir do final do século XIX é resultado de um fenômeno complexo relacionado com a queda de preço dos produtos agropecuários e que provocou a

Os preços das *commodities* agropecuárias foram rapidamente minorados com a introdução das novas tecnologias, de modo que a diferença dos custos de produção entre a agricultura manual e menos produtiva, quando comparados com aqueles que aplicam as técnicas mais produtivas, passaram de um para dez anteriormente, para um para quinhentos após o advento da mecanização⁷.

A despeito de todo o progresso observado, surge uma questão:

Qual foi o preço do aumento de eficiência na atividade agrícola?

Esta não é uma pergunta fácil de responder. As controvérsias que esta discussão pode gerar são imensas. Mas é inegável que, ao observar as figuras 1.1 e 1.2, uma reflexão seja feita. A população humana está crescendo num ritmo desenfreado. No início da era cristã, estima-se que havia cento e setenta milhões de seres humanos. Por volta do ano 1.800, pela primeira vez, foi possível manter vivos sobre a Terra, um bilhão de habitantes. No entanto, num período posterior, de somente cento e trinta anos (por volta de 1930), já seriam mais de dois bilhões de pessoas e atualmente (UNFPA, 2012), mais de sete bilhões, crescimento aproximado de um bilhão de pessoas em apenas treze anos (a cifra de seis bilhões de habitantes no mundo ocorreu em 1999).

Projeções da Organização das Nações Unidas (ONU, 2009), com base em índices estimados para a fertilidade feminina⁸, informam que a população humana poderá crescer de quatro

extinção mundial de dezenas de milhões de pequenas e médias propriedades rurais.

⁸ Fertilidade média observada entre 2005 e 2010: 3,81 filhos por mulher. A projeção para 2050 considera índices médios de fertilidade convergindo para os seguintes números, de

formas diferentes, a partir do ano de 2010, conforme figura 1.3. De acordo com os cenários que resultariam destas considerações, uma população superior a onze bilhões de habitantes poderia ocorrer dentro das próximas quatro décadas.

A condição de crescimento da população do Brasil, relatada pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), está mostrada na figura 1.4.

Considerando o período entre 1950 e 2006, observa-se que a população mundial cresceu 141,8%, enquanto a população brasileira teve um incremento de 226,9%. Este fato pode sugerir que o nível médio de fertilidade no Brasil é

superior àquele que, se espera, produza um crescimento menor na população.

Qualquer que seja o índice considerado, o crescimento da população mundial (assim como a do Brasil) terá importante incremento nas próximas décadas. Além disso, o avanço tecnológico nas ciências médicas e farmacêuticas possibilitará que as pessoas vivam cada vez mais tempo, com uma melhor qualidade de vida, mesmo nos países de menor nível de desenvolvimento. A ONU (2009) estima que a expectativa média da vida do ser humano por volta de 2050 será de setenta e cinco anos e meio, assim divididos por sexo: 73,3 anos para os homens e 77,9 anos para as mulheres.

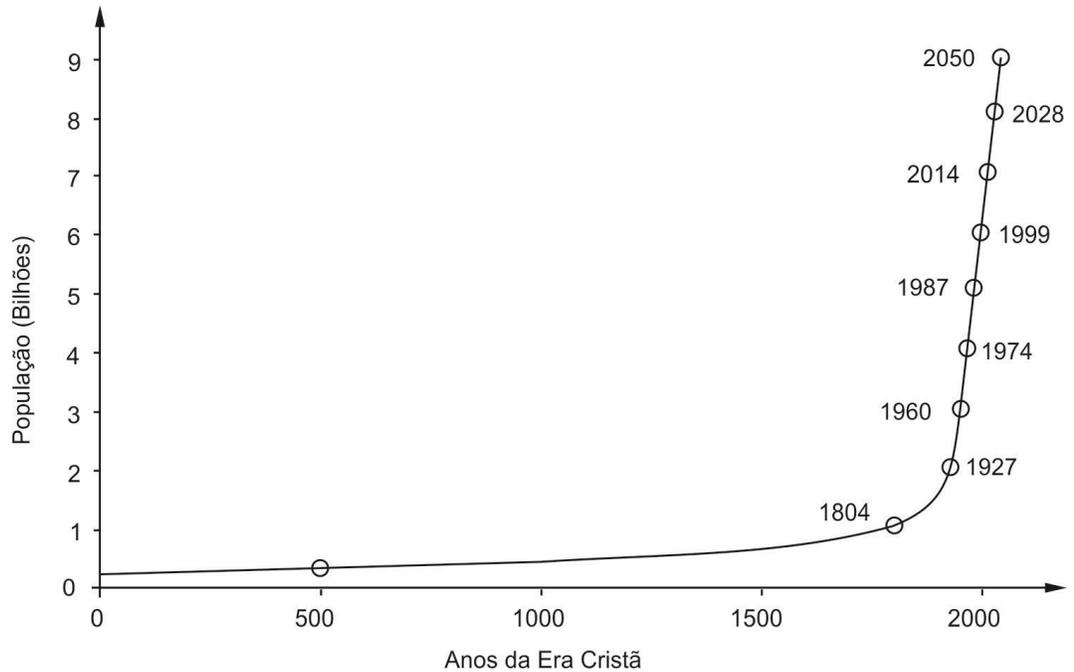


Figura 1.2. Crescimento histórico e projetado da população humana durante o período da era cristã.

acordo com cada classe mostrada no gráfico da Figura 1.3:
Baixo = 1,35; Médio = 1,85 e Alto = 2,35.

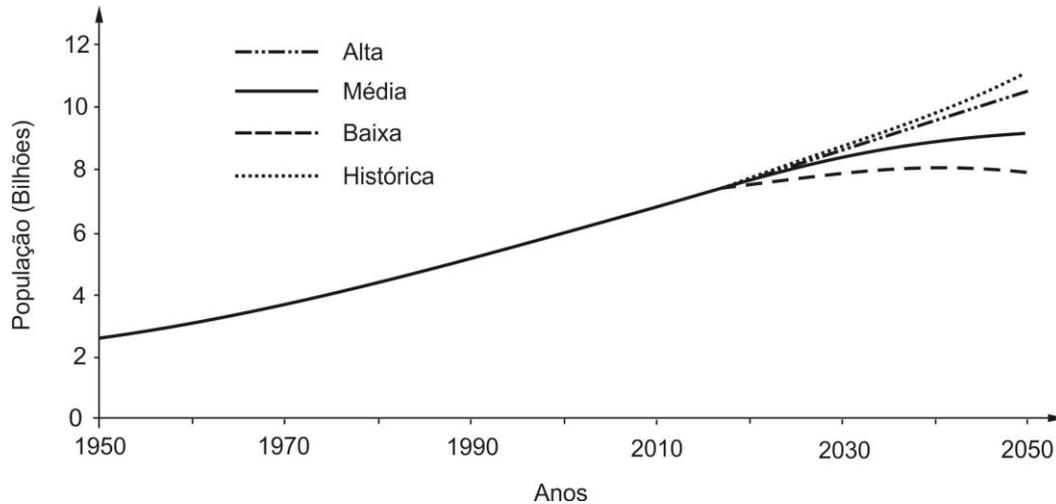


Figura 1.3. Projeção de crescimento da população humana a partir de 2010, até 2050, de acordo com índices de variação da fertilidade das mulheres. Estimativa efetuada pela ONU (2009).

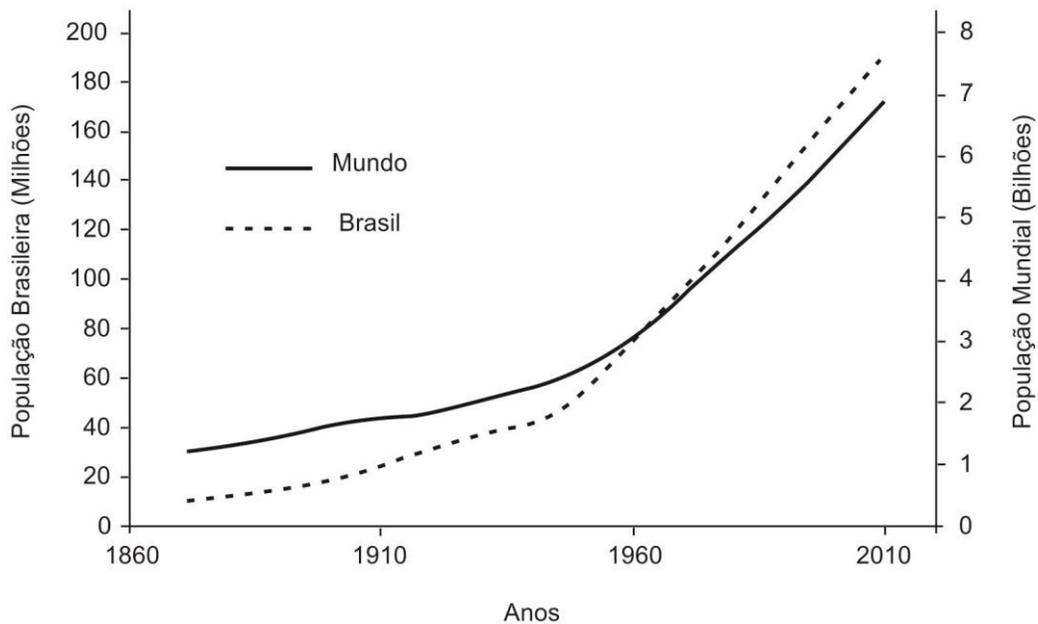


Figura 1.4. Evolução da população brasileira e mundial. Fonte: ONU (2009) e IBGE (2010).

Este fato exige que a sociedade solucione algumas questões importantes relativas ao abastecimento das populações com alimentos, água, energia, segurança, moradia, lazer, etc. Mais

impressionante ainda são as previsões de que, somente nos países em desenvolvimento, deverão ser incluídas três bilhões de pessoas na camada socioeconômica denominada *classe média*⁹.

⁹ Heller (2012)

Estes participantes do processo econômico terão sua renda aumentada dos atuais dez ou quinze dólares, para valores com média entre 50 e 100 dólares diários. Estas pessoas estarão ávidas por comprar melhores alimentos, como carnes mais nobres, frutas selecionadas e bem embaladas, roupas mais sofisticadas, somente para citar aquilo que está diretamente relacionado com a agropecuária, além de consumir outros produtos que causarão impactos importantes no ambiente como, por exemplo, energia ou um automóvel para levar as crianças à escola.

Ao profissional de ciências agrárias, seja ele um técnico formado em nível médio, superior ou um produtor rural com formação prática, caberá a tarefa de suprir a demanda por alimentos e fibras além de outros materiais de interesse comercial, assim como flores por exemplo. Cabe também a esta parcela da sociedade a responsabilidade de diminuir ao máximo a agressão ambiental decorrentes das atividades agrícola, pecuária e florestal, principalmente no que se refere à degradação do solo, conservação da água e utilização de insumos que podem contaminar o ambiente, como os fertilizantes, pesticidas e demais agroquímicos.

Fornecer, pois, as chamadas *commodities* agropecuárias, para a totalidade da população será, com certeza, uma questão de difícil equacionamento. Maior número de pessoas viverá por mais tempo e com melhor qualidade de vida, o que significa aumento da demanda por área agricultável, água e todos os outros insumos citados anteriormente.

Apesar de todos os esforços o fenômeno acerca da fome no mundo tende a agravar-se. O percentual da população que tem fome diminuiu desde a Conferência da Cúpula Mundial pela Alimentação patrocinada pela Fundação das Nações

Unidas para a Agricultura e Alimentação (FAO), realizada em Roma, 1996, mas a quantidade total de pessoas que sofrem suas consequências aumentou com o decorrer dos acontecimentos. A proposta seria erradicar a fome do mundo no longo prazo e reduzir o número de pessoas desnutridas pela metade do observado na época, no mais tardar, até o ano 2015. Novo encontro com os mesmos objetivos, em 2001, reconheceu que o mundo contaria ainda com algo em torno de setecentos milhões de famintos. O Secretário Geral da ONU, Sr. Ban Ki-moon, durante o mesmo fórum de discussão, no ano de 2008, afirmou que o mundo teria oitocentos e cinquenta milhões de pessoas em estado de fome e que este número poderia aumentar em trezentos milhões, se até 2030 a produção de alimentos não for majorada, em pelo menos 50%, em relação à observada na época da declaração.

Considerando os resultados das conversações pode-se verificar que o número absoluto de pessoas acometidas por escassez de alimentos é cada vez maior. E as perspectivas futuras mostram-se sombrias. No entanto, esta questão não é somente um problema. Ela pode se transformar numa grande oportunidade.

1.2 A Situação da agropecuária brasileira

A agropecuária brasileira apresentou evolução importante nas últimas décadas. A produtividade de algumas das principais culturas exploradas no Brasil e sua evolução está mostrada na tabela 1.2.

Resultados de concursos de produtividade e informações obtidas de técnicos que trabalham com melhoramento genético dão ideia do real potencial das plantas cultivadas. Somente como exemplo, pode-se citar valores corriqueiramente superiores a 15.000kg/ha para milho,

8.000kg/ha para soja e trigo, 60.000kg/ha para citros e 4.500kg/ha para o feijão, de modo que, apesar do progresso observado, os valores obtidos na agropecuária brasileira poderiam ser considerados muito aquém do desejável.

É evidente que as produtividades obtidas como resultado de pesquisas e concursos são impraticáveis em grandes áreas de culturas comerciais, por motivos muito bem conhecidos, mas também é verdade que não se pode aceitar as médias de produtividade nacional mostradas na tabela 1.2, com resignação.

Esta situação poderia ser creditada à grande participação da chamada “agricultura familiar” no panorama da agropecuária brasileira, com resultados mostrados na figura 1.5. Como afirmam Mazoyer & Roudart (2010):

Podemos medir a produtividade bruta do trabalho agrícola pela produção de cereais

*ou de equivalente-cereal por trabalhador agrícola e por ano. Em pouco mais de meio século, a relação entre a produtividade da agricultura menos produtiva do mundo, praticada exclusivamente com ferramentas manuais (enxada, cajado, facão, faca ceifeira, foice, pá...) e a agricultura mais bem equipada e produtiva do momento realmente se acentuou: **passou de 1 contra 10 no período entre guerras, para 1 contra 2.000 no final do século XX.***

Os autores classificam a agricultura familiar (formada por pequenos produtores) como *menos tecnificada* quando comparada com aquela *motorizada e mecanizada*, sugerindo que os pequenos agricultores (embora se utilizem de alguma tecnologia, como tração animal, por exemplo) são menos equipados e que a diferença de produtividade, neste caso, pode chegar à proporção de um para quinhentos.

Tabela 1.2 Evolução da produtividade de algumas das principais culturas, no Brasil, em kg.ha⁻¹. Fonte: IBGE (2010).

Ano	Tipo de produção vegetal								
	Café (coco)	Laranja	Algodão (caroço)	Arroz (casca)	Cana-açúcar	Feijão (grão)	Milho (grão)	Soja (grão)	Trigo (grão)
1960	666	13.078	438	1.275	34.196	398	1.075	-	-
1970	460	14.856	849	1.222	39.970	372	1.197	862	926
1975	729	18.185	923	1.333	42.979	410	1.335	1.542	679
1980	571	17.186	1.121	1.416	53.618	397	1.521	1.639	914
1985	926	18.721	1.063	1.737	60.525	377	1.476	1.773	1.519
1995	1.034	16505	1.333	2.711	62.086	507	2.442	2.334	1.701
2006	1.399	19.585	2.986	3.921	68.876	718	3.606	2.602	1.737
2010	1279	22.632	3.655	4.163	78.939	929	4.160	2.915	2.383

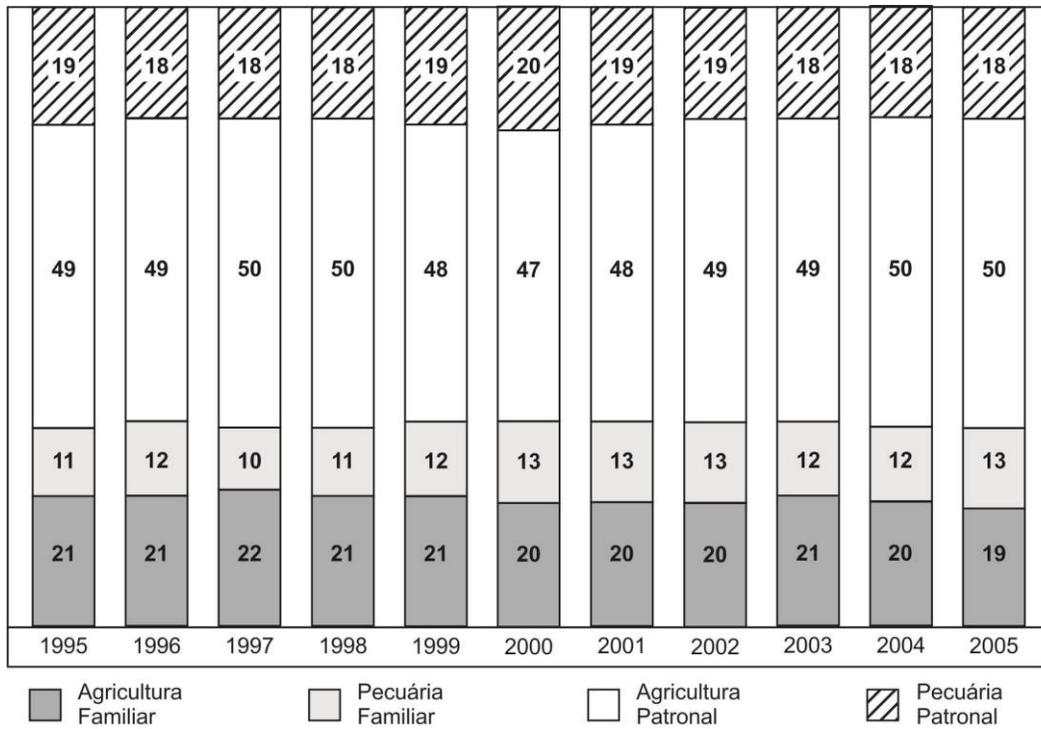


Figura 1.5. Participação proporcional da atividade pecuária e agrícola das atividades familiar e patronal na composição do PIB agropecuário brasileiro. Fonte: Guilhoto et al. (2007) e CEPEA (2011).

A ocupação de terras no Brasil, segundo o censo agropecuário de 2006 (IBGE, 2012) contava com mais de cinco milhões de estabelecimentos rurais, em área de aproximadamente trezentos e trinta milhões de hectares. A distribuição proporcional da área do território (851.487.659ha) brasileiro está mostrada na figura 1.6.

O IBGE (2010) afirma que na safra plantada em 2009 e colhida em 2010, foram utilizados perto de 61,5 milhões de hectares de terra agrícola. A área destinada às culturas chamadas convencionalmente de “grãos” (compostas pelos cereais, leguminosas e oleaginosas), ocupou perto de 47 milhões de hectares com uma produção total acima de 146 milhões de toneladas. Considerando também atividades como produção de forragem, flores, hidroponia e plasticultura, casas de vegetação e viveiros de mudas, o total seria de 76,7 milhões de hectares.

A área utilizada com pastagem, natural ou implantada é da ordem de 172,3 milhões de hectares. Pode-se dizer que a produtividade média da pecuária no Brasil está nas mesmas condições da observada para a agricultura, ou seja, no decorrer dos anos apresentou ganhos importantes de produtividade, mas poderia ser muito melhor.

Conforme mostra a Figura 1.7, observa-se que o aumento de área agrícola entre 1980 e 2006 foi de 56,2%, enquanto a de pastagem observou um pequeno decréscimo. A área de grãos, neste mesmo período, cresceu 19,3% e a produção foi majorada em 128,3%. Este fato indica crescimento médio da produtividade superior a 90% num período de pouco mais de 25 anos.

Quando, porém, compara-se o crescimento das áreas utilizadas na agropecuária no período entre o final da década de 1950 e início de 1960,

coincidente com o início da tratorização da atividade no Brasil, verifica-se um incremento de 167,1% para área agrícola e de somente 64,8% para a área total. Neste mesmo período, o aumento do número de tratores foi de 1.184,6%, atingindo uma frota superior a setecentos e oitenta mil unidades no ano de 2006.

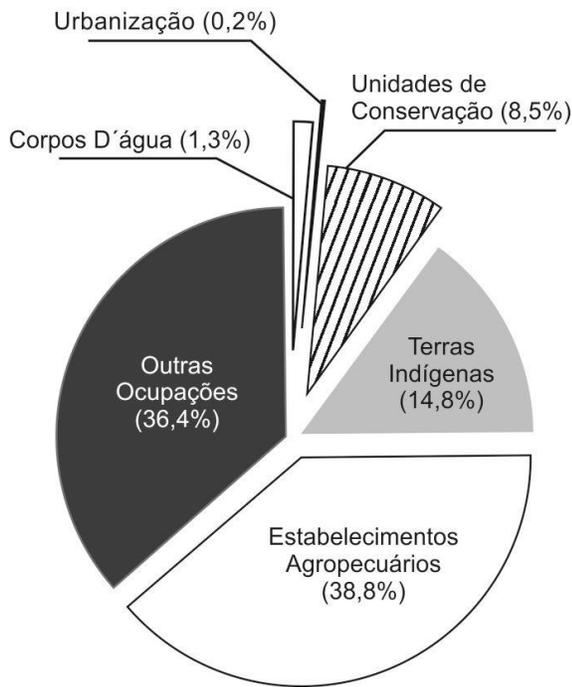


Figura 1.6. Ocupação do território brasileiro, segundo o censo agropecuário de 2006. Fonte IBGE (2012).

Tal fato está associado à utilização de tratores e à mobilização do solo, mediante revolvimento com o uso de arados, cujo objetivo principal é a implantação de culturas agrícolas. O advento dessas máquinas possibilitou o avanço da fronteira agrícola nos países menos desenvolvidos (o que inclui o Brasil), desde o momento em que sua utilização tornou-se massiva.

No caso brasileiro observa-se, a partir de então, o aumento incontrolável do desmatamento e o início da degradação acentuada dos solos

agricultáveis. Pode-se observar, também, que as figuras 1.4, 1.7 e 1.8 mostram a mesma tendência, ou seja, à medida que o número de tratores aumenta, aumentam também a população e a área utilizada com agricultura.

O crescimento do número de tratores tem uma característica exponencial em quase todos os países, a partir de um determinado momento¹⁰.

Entende-se, equivocadamente, que é necessário preparar (revolver) o solo para implantação das culturas, e que esta é uma operação de execução simples, facilmente compreendida e que pode ser executada por qualquer pessoa.

No entanto, revolver o solo requer extrema qualificação técnica, pois a complexidade da operação é elevada e que pode causar danos ambientais severos, não se restringindo somente à degradação do solo, mas também da água e da atmosfera. Na escala de tempo em que se compara a vida de uma pessoa de vinte e cinco anos com a história do planeta, a descoberta da agricultura representa somente *os últimos vinte e nove minutos*. Nesta mesma escala, a invenção e a popularização do uso do trator representa um intervalo correspondente *aos últimos quinze segundos de vida* desta pessoa.

A possibilidade de atrelar equipamentos que realizam trabalhos agrícolas a tratores causou uma revolução na economia mundial e no modo de vida de toda humanidade. Ao substituir o trabalho físico ineficiente do ser humano e dos animais o trator proporcionou a mudança total das relações sociais, a partir dos primeiros anos do século XX, mas também trouxe inúmeros problemas de ordem ambiental, os quais necessitam de soluções urgentes. Estas soluções passam, indiscutivelmente pela educação tecnológica de todos aqueles que se utilizam de máquinas para produção agrícola.

¹⁰ Ver Figuras A1 e A2, no Apêndice.

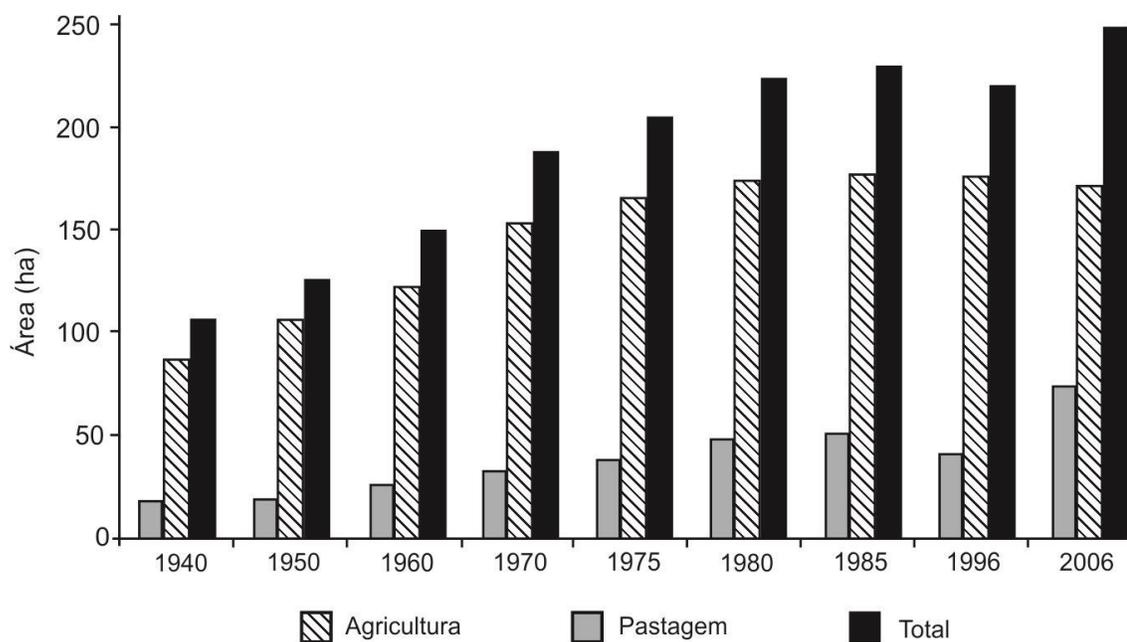


Figura 1.7. Evolução das áreas utilizadas na agropecuária brasileira entre 1940 e 2006. Fonte: IBGE (2010).

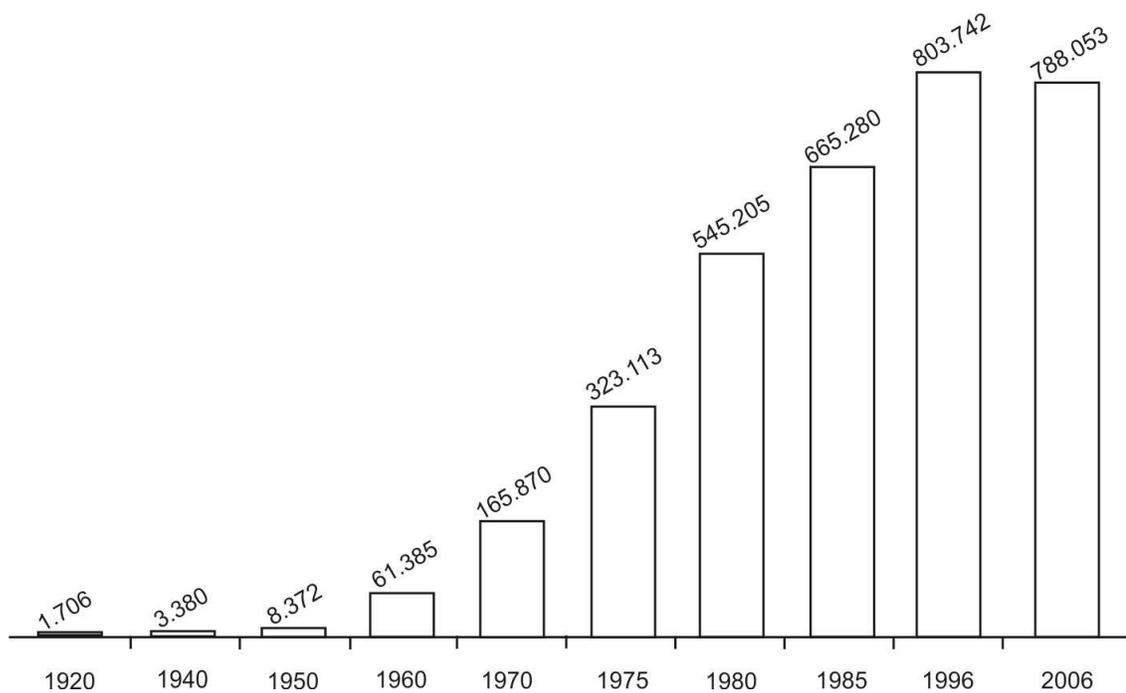


Figura 1.8. Evolução do número de tratores na agropecuária brasileira entre os anos de 1920 e 2006. Fonte: IBGE (2010).

Assim, a oportunidade para os profissionais da área de ciências agrárias revela-se interessante, pois a possibilidade de negócios no setor torna-se mais atrativa, em razão da maior participação nas atividades econômicas e de suas implicações ambientais.

No caso brasileiro, apesar de ser uma nação com uma economia colocada entre as dez maiores do planeta, possuindo indústria de elevado nível de desenvolvimento, o setor rural participa do Produto Interno Bruto (PIB), numa escala semelhante àquela observada em países classificados pelo Banco Mundial (2007) como de *economia baseada na agricultura*. A parcela do PIB creditada ao setor agropecuário representa 5,7% do total¹¹, o que significa uma participação da ordem de três a cinco vezes maior que a encontrada nos países com classificação de *urbanizados*, com maior desenvolvimento e melhores condições de vida da população. Tal fato, embora paradoxal, mostra a vocação agrícola brasileira e a participação da atividade no PIB do país poderia ser majorada em muito caso houvesse maior qualificação da mão de obra rural. Apesar dos esforços de muitos pesquisadores e professores universitários, produzindo conhecimento de alto nível no país o retrato da educação no meio rural está mostrado na figura 1.9. A tabela 1.3 mostra a distribuição proporcional do PIB para alguns países, nas duas classes (*economia agrícola e urbanizados*) de qualificação considerada.

Informações do Banco Mundial (2011) apontam que o Produto Interno Bruto brasileiro pode ser classificado como o sétimo do planeta, sendo superado¹² somente pelos países listados na tabela 1.4. Além disso, dentre todos os países que

se encontram na lista pesquisada, Arábia Saudita, Noruega, Polônia, Suécia e Suíça possuem PIB total equivalente ao do agronegócio brasileiro.

A crescente demanda por alimentos nos países emergentes e consequente elevação de preços internacionais proporcionaram para o ano de 2011 um crescimento, para o agronegócio brasileiro, em torno de 5,7%, o que é mais do que o dobro do verificado para o crescimento global do país, que ficou em 2,7%¹³.

Tabela 1.3. Participação percentual das atividades econômicas no Produto Interno Bruto de algumas nações.

País	Participação do Setor no PIB (%)		
	Serviço	Indústria	Agropecuária
Índia	55,2	26,3	18,5
Bolívia	50,0	38,0	12,0
Angola	19,9	70,3	9,8
Argentina	59,8	31,6	8,5
Brasil	66,7	27,7	5,7
Austrália	70,0	26,2	3,8
França	78,9	19,0	2,1
Itália	72,8	25,3	1,9
Japão	75,7	22,8	1,5
EUA	78,9	21,9	1,2
Alemanha	70,0	29,1	0,9

Fonte: IBGE (2010) e GRUPO BANCO MUNDIAL (2011).

Quando se considera toda a parcela do agronegócio, no entanto, a participação no PIB nacional cresce para valores da ordem de aproximadamente um quarto do total das riquezas, como mostra a figura 1.10.

¹¹ Informação do IBGE (2010). O Banco Mundial (2007) reporta participação de 7%.

¹² Valores de PIB correspondentes ao ano de 2009.

¹³ CEPEA (2012)

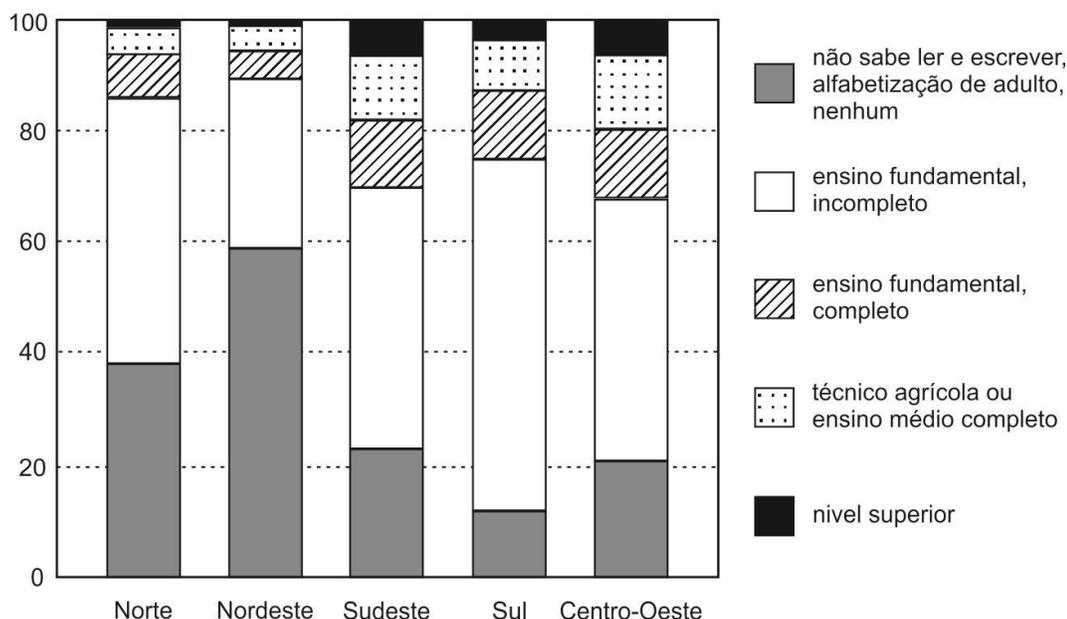


Figura 1.9. Distribuição percentual dos produtores rurais, por nível de instrução, segundo as grandes regiões do Brasil. Fonte: IBGE (2012).

Tabela 1.4. Relação de países com PIB superior ao PIB do Agronegócio Brasileiro, segundo Banco Mundial (2011).

Posição	País	PIB (Bilhão de US\$)	Posição	País	PIB (Bilhão de US\$)
1	EUA	14.582	9	Índia	1.729
2	China	5.878	10	Espanha	1.487
3	Japão	5.497	11	Rússia	1.479
4	Alemanha	3.309	12	Canadá	1.574
5	França	2.560	13	México	1.039
6	Reino Unido	2.246	14	Coréia	1.014
7	Brasil	2.087	15	Holanda	783
8	Itália	2.051	16	Turquia	735

Analisando os valores mostrados na figura 1.10 apura-se uma média de 24,03%, (coeficiente de variação de 9,24%). Isto significa que a atividade econômica relacionada com a agropecuária “fora da porteira” das propriedades agrega mais de três vezes valor à produção. O total

desta participação equivale a uma riqueza de aproximadamente a 1 trilhão de reais.

Assim, pode-se vislumbrar uma grande oportunidade para os profissionais das ciências agrárias, o que exigirá deles cada vez maior domínio de técnicas relacionadas com atividades

inerentes à produção e comercialização, sem negligenciar aquelas voltadas para a conservação ambiental.

Portanto, nos próximos capítulos serão discutidos assuntos relacionados às características dos solos, cujo objetivo é esclarecer o seu

comportamento físico como meio de produção, onde ocorrem as operações de cultivo e tração, sem se esquecer de que além dessa utilização ele é parte integrante do ecossistema agropecuário e como tal deve ser tratado.

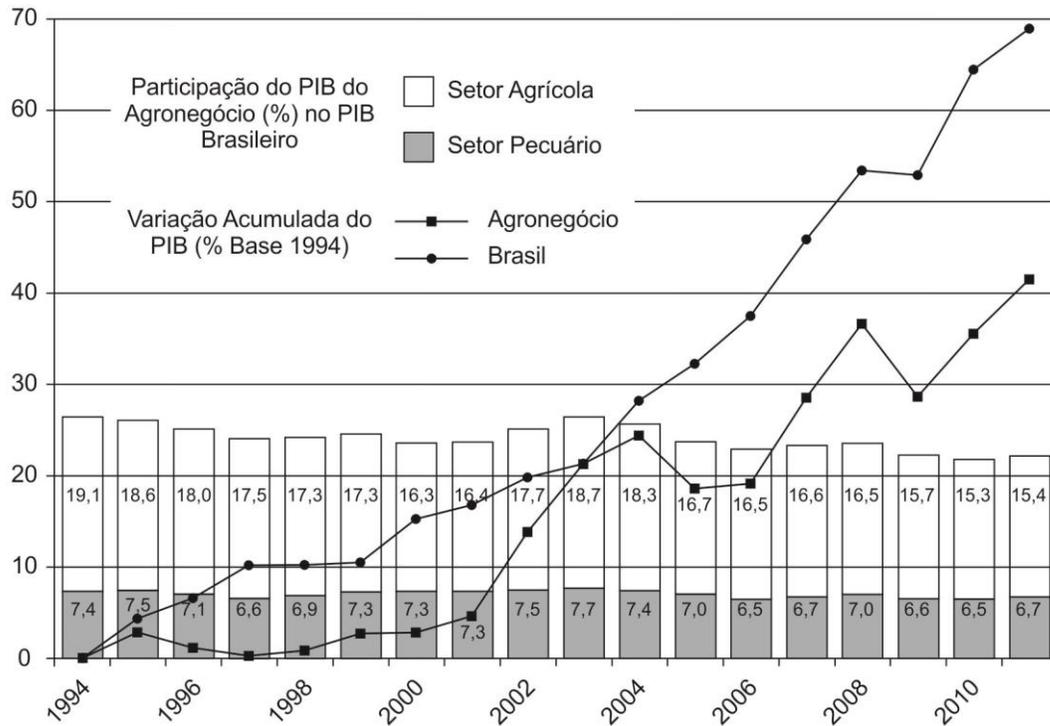


Figura 1.10 Formação do Produto Interno Bruto Agropecuário brasileiro e sua evolução percentual (ano base 1994). Fonte: Guilhoto et al. (2007); IBGE (2010) e CEPEA (2012).

BIBLIOGRAFIA CONSULTADA

- AGROSOFT BRASIL. **ONU diz que produção de alimentos tem de aumentar 50% até 2030.** 2008. Disponível em www.agrosoft.org.br/agropag/101124.htm. Acesso em 18 ago. 2010
- BANCO MUNDIAL. **World development report 2008: agriculture for development.** Washington: The World Bank, 2007. 365p.
- BANCO MUNDIAL. **GDP (current US\$).** 2011. The World Bank. Disponível em <http://data.worldbank.org/indicator/NY.GDP.MKTP.CD>. Acesso em 27 set. 2011.
- BEAR, D. M. et al. **The Dawn of Human Matrilineal Diversity.** The American Journal of Human Genetics, Boston, n.82, p.1130–1140, 2008.
- BELNETY, F. **Os primeiros agricultores.** Revista história viva, São Paulo, n.117, p.78-80, 2013.
- BERETTA, C. C. **Tração animal na agricultura.** São Paulo: Nobel, 1988. 101p.
- BERTALOT-BAY, M. M. **Consequências ambientais e sociais da atividade agrícola: reflexões epistemológicas sobre a regenerabilidade.** 2008. 113p. Dissertação (Mestrado em Geografia). Instituto de Geociências. Universidade Estadual de Campinas. 2008.
- BOARETTO, A. E. **A evolução da população mundial, da oferta de alimentos e das ciências agrárias.** Revista Ceres, Piracicaba, n.56, v.4, p.513-526, 2009.
- BREMNER, J.; HAUB, C.; LEE, M.; MATHER, M.; ZUEHLKE, E. **World population highlights: key findings from PRB's 2009 world population datasheet.** Population Bulletin: Washington, n.3, v.64, 2009. 12p.
- CASTRO, O. M. **Manejo e preparo do solo e erosão.** In: Aspectos de manejo dos solos. Campinas, Fundação Cargill, p.45-70. 1985.
- CENTRO DE ESTUDOS AVANÇADOS EM ECONOMIA APLICADA. **PIB Agro CEPEA-USP/CNA.** Piracicaba: DEAS/ESALQ/USP, 2012. Disponível em: <http://www.cepea.esalq.usp.br/pib/>. Acesso em 17 abr. 2012.
- CHAIMOVICH, H. **Origem da vida.** Ciência e Cultura, São Paulo, n.esp., v.60, p.54-56, 2008.
- CORAZZA, G.; MARTINELLI JR, O. **Agricultura e questão agrária na história do pensamento econômico.** Teoria e Evidência Econômica, Passo Fundo, n.19, v. 10, 9-36, 2002.
- DILLEHAY, T. D.; ROSSEN, J.; ANDRES, T. C.; WILLIAMS, D. E. **Pre-ceramic adoption of peanut, squash, and cotton in northern Peru.** Science, v. 316, n. 5833, p. 1890-1893, 2007.
- DECICINO, R. **Fósseis e radioatividade revelam fases do planeta.** 2010. Disponível em <http://educacao.uol.com.br/geografia/ult1701u77.htm>. Acesso em 13 ago. 2010.
- EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Resultados de concurso revelam troca de conhecimentos e potencial produtivo da região.** 2009. Disponível em <http://www.cnpms.embrapa.br/noticias/mostranoticia.php?codigo=541>. Acesso em 19 ago. 2010.
- GILHOTO, J.J.M., AZZONI, C.R., SILVEIRA, F.G., ISHIHARA, S.M., DINIZ, B.P.C., MOREIRA, G.R.C. **PIB da agricultura familiar: Brasil-estados.** Brasília: Ministério do desenvolvimento Agrário, 2007. 172p.
- GIRARDI, E.P. **Atlas da questão agrária brasileira.** Disponível em <http://www4.fct.unesp.br/nera/atlas/agropecuaria.htm>. Acesso em 23/09/2011.

GRUPO BANCO MUNDIAL. **Dados e estatísticas.** Disponível em: <http://web.worldbank.org/WBSITE/EXTERNAL/HOMEPORUGUESE/EXTPAISES/EXTLACINPOR/BRAZILINPOEXTN/0,,menuPK:3817201~pagePK:141132~piPK:141109~theSitePK:3817167,00.html>. Acesso em 23 set. 2011.

HELLER, T.C. **A nova ordem mundial é verde.** Revista Veja, São Paulo, v.45, n.2, p.15-19, 2012.

INSTITUTO AGRONÔMICO DO PARANÁ. **Cultivar do feijão IPR Eldorado.** 2010. Disponível em <http://www.iapar.br/arquivos/File/folhetos/ipredorado/ipredorado.html>. Acesso em 19 ago. 2010.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Censo agro 2006: IBGE revela retrato do Brasil agrário.** 2012. Disponível em: http://www.ibge.gov.br/home/presidencia/noticias/noticia_visualiza.php?id_noticia=1464&id_pagina=1. Acesso em 25 jun. 2012.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Séries estatísticas e séries históricas.** 2010. Disponível em http://www.ibge.gov.br/series_estatisticas/exibedados.php?idnivel=BR&idserie=PO05. Acesso em 17 ago. 2010.

LOPES, R. J. Iranianos estão entre os pioneiros da agricultura. Disponível em: <http://www1.folha.uol.com.br/ciencia/2013/07/1306512-iranianos-estao-entre-os-pioneiros-da-agricultura.shtml>. Acesso em 26 jun. 2014.

MALUF, R.S. **Segurança alimentar e fome no Brasil – 10 anos da cúpula mundial de alimentação.** Rio de Janeiro: CERESAN/UFRRJ, 2006. 72p. Relatórios Técnicos, 2.

MAZOYER, M.; ROUDART, L. **História das agriculturas no mundo: do neolítico à crise contemporânea.** São Paulo: UNESP, 2010. 568p.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. **World population prospects: the 2008 revision – population database.** Department of Economic and Social Affairs, New York, n.87, 20p. 2009.

PAWLAK, J. **Farm machinery market in the second half of the XX century.**” Agricultural Engineering International: the CIGR Journal of Scientific Research and Development. Paper. Vol. IV. July, 2002. 10p.

PILZER, P. Z. **The wellness revolution.** John Wiley & Sons, Hoboken, 304p. 2007.

SOUZA, P.M.; LIMA, J.E. **A Distribuição da Terra no Brasil e nas Unidades da Federação, 1970.95/96.** Revista Econômica do Nordeste, Fortaleza, v. 34, n. 1, p.113-132, 2003

UNITED NATIONS EDUCATIONAL SCIENTIFIC AND CULTURAL ORGANIZATION. **Terra e Vida – as origens da diversidade.** UNESCO, Earth Sciences for Society Foundation, Leiden, 16p. 2007.

UNFPA. Fundo de População das Nações Unidas. Relatório sobre a situação da população mundial 2012. New York, 2012, 137p.

VALOR ECONÔMICO. **Trigo alimenta evolução da humanidade.** 2006. Disponível em <http://www.valoronline.com.br/?impresso/especial/195/3487030/trigo-alimenta-evolucao-da-humanidade>. Acesso em 16 ago. 2010.

WHITE, W. J. **Economic history of tractors in the United States.** 2010. Disponível em <http://eh.net/encyclopedia/article/white.tractors.history.us>. Acesso em 19 ago. 2010.

O SOLO: MEIO DE PRODUÇÃO AGRÍCOLA, PECUÁRIA E FLORESTAL

*A humanidade depende do solo e,
até certo ponto, bons solos
dependem do homem e do uso
que deles faz.*

Nyle C. Brady

A frase que está em destaque no início deste capítulo¹⁴, é também a primeira frase do primeiro capítulo de um dos livros mais utilizados nas escolas de ciências agrárias do Brasil, quando se estuda o solo como meio de produção agropecuária: *Natureza e Propriedades dos Solos*.

A despeito de “ser a humanidade dependente do solo”, todos os dias, as terras agricultadas do planeta, os solos são, em grande parte, trabalhados por pessoas com instrução precária e quase nenhum conhecimento técnico sobre ele e sem qualquer treinamento técnico para utilização de máquinas, implementos e ferramentas que provocam sua mobilização.

Fica claro, ao observar a história socioeconômica da humanidade, que as grandes civilizações se firmaram, criaram organizações estáveis e progrediram em locais que dispunham, principalmente, de dois recursos básicos e primordiais: bons solos e água.

Da mesma forma, é possível verificar que o declínio de grandes civilizações pode estar intimamente relacionado com a degradação ou a exploração desordenada destes solos. Tais ações, ao mesmo tempo, desencadeiam processos acelerados e, muitas vezes irreversíveis, de degradação de suas reservas hídricas.

Antes, portanto, de passar para o assunto objeto desse texto, que é o comportamento mecânico do solo quando submetido à ação de equipamentos que o mobilizam, proporcionam condições

¹⁴O autor, Nyle C. Brady lecionou na Universidade de Cornell, de 1947 a 1973 tornando-se Professor Emérito. Foi pesquisador do IRRI's e Administrador Sênior para

Ciência e Tecnologia na USAID. Seu texto é um clássico das ciências do solo e encontra-se atualmente na 14ª edição em inglês.

para instalação de culturas agrícolas e explorações pecuárias e florestais, serão feitas conjecturas a respeito de informações básicas, sobre sua estrutura física, química e suas propriedades.

2.1 O solo agrícola

O conceito que se tem sobre o significado da palavra *solo*¹⁵ evoca compreensões variadas em cada ser humano, em razão de sua educação, profissão ou interesse. Por exemplo, para uma dona de casa, solo tem a ver com sujeira, poeira, pó, terra na sola dos sapatos e demais conotações afins. Para o engenheiro civil ele é razão de preocupação e felicidade, pois quando não oferece resistência para suportar suas construções deve ser eliminado e substituído. Por outro lado, pode oferecer material de boa qualidade para ser a base de suas obras ou até servir como fonte de matéria prima para fabricação de diversos materiais para construção, como tijolos e telhas. Para o engenheiro de minas é um estorvo total. É o material que recobre as rochas e por isso deve ser totalmente eliminado. No entanto, para os agricultores é fonte de vida, o meio onde vivem as plantas, sem as quais não proveriam seu sustento.

A compreensão do comportamento do solo ao ser utilizado como meio de produção agrícola remonta a história da humanidade. Há evidências históricas em textos muito antigos, como a *Odisseia* de Homero ou o *Velho Testamento* Bíblico falam dos cuidados que os antigos agricultores dispndiam com relação à fertilidade do solo. Achados arqueológicos comprovam tais relatos e, quase sempre, fazem referência à adição de rejeito das atividades pecuárias (estume) e alguma forma de matéria orgânica em decomposição.

A partir do período histórico conhecido por *renascença* até os dias atuais, pesquisas mais elaboradas investiram tempo e recursos disponíveis com o objetivo de aumentar a produtividade das culturas através da adição de substâncias químicas minerais ao solo. São clássicas as experiências de pesquisadores europeus como *van Helmont* e *Liebig*, somente para citar alguns.

Como fato resultante do desenvolvimento econômico das novas nações estabelecidas nas Américas durante o século XIX, verificou-se o aumento da área de terras utilizadas para a agricultura e pecuária. Em função da vasta disponibilidade de terras devolutas, durante muito tempo perdurou o comportamento de abandonar áreas exauridas (após cultivo por alguns poucos anos) e abrir áreas novas – o que implica em derrubada da floresta ou erradicação da cobertura vegetal nativa – para utilização do solo na produção agropecuária. Este tipo de agricultura primitiva, num sistema itinerante, poucos danos provoca ao ambiente, pois a alta capacidade de regeneração da mata nativa, principalmente em ambientes tropicais, logo repõe a vegetação e restabelece o equilíbrio.

No entanto, com as fortes pressões exercidas pelo crescimento populacional e pela demanda por alimentos, a exploração agropecuária se intensificou e os solos passaram a ser utilizados além de sua capacidade de sustentação e regeneração.

Muitos dos profissionais que usam o solo como meio de produção agrícola, de maneira geral, o entendem como o local onde vivem as plantas e imaginam que sua única função é fornecer nutrientes de forma a proporcionar o desenvolvimento de produtos de interesse comercial. Suas ações são, portanto, imediatistas.

¹⁵ Do latim, *solum*, que significa “terra, país, fundo, piso, fundação”, de acordo com Cawley (2011).

Até mesmo alguns estudiosos referem-se a ele da seguinte forma: “o solo está para a Terra, assim como a casca está para a laranja¹⁶”. Esta analogia poderia remeter o raciocínio a um comportamento inconsciente e perigoso, pois é de conhecimento geral o que interessa ao homem no fruto da laranjeira e qual é o destino dado à sua casca.

Em função desse conceito, a visão que a maioria das pessoas possui sobre o solo é bidimensional. Além disso, quando o objetivo é a implantação de culturas agrícolas, na grande maioria das vezes, somente se concebe um plano – ou o plano horizontal, que é a superfície, resultado da mobilização causada por uma ferramenta ou no plano vertical, ao verificar a profundidade na qual ocorreu tal mobilização. De outra forma, a observação do plano vertical pode ser assumida quando se deseja saber como se distribui o conjunto de nutrientes que irá servir de meio para o desenvolvimento das plantas cultivadas. É, na realidade, difícil imaginar o solo em *todas* as suas dimensões ao mesmo tempo.

2.2 O que é o solo e de onde surgiu?

A evolução histórica do estudo dos solos divide o conhecimento em duas concepções básicas, de acordo com o objeto de interesse, dando origem a duas modalidades da ciência: a *pedologia* e a *edafologia*.

A *pedologia* estuda os solos do ponto de vista meramente físico, como um corpo natural: *um objeto inanimado*. Esta vertente da ciência busca a formação de conceitos sobre aquilo que

se encontra na natureza, examinando os fenômenos que deram origem ao material, sua composição física, a disposição dos componentes e procura classificar os solos de acordo com tais características. Tal coleção de conhecimentos é útil a todos os que têm no solo o seu ambiente de trabalho, desde os engenheiros que constroem casas, rodovias e barragens, até os profissionais de ciências agrárias e agricultores em geral.

A *edafologia* enfatiza os solos como o meio em que se desenvolvem as plantas, considerando suas propriedades na medida em que interferem na produtividade dos vegetais. Assim, a edafologia usa seu conjunto de conhecimentos numa atividade prática voltada para a orientação daqueles que trabalham a terra com o objetivo de produzir alimentos, fibras, energia, madeira, flores e demais *commodities*, estabelecendo razões que nele interferem e busca meios para manter e melhorar a fertilidade.

O que fica claro à luz destas duas vertentes de estudo é que o solo é um *sistema complexo* que, além de possuir uma *fase sólida*, composta de minerais originários da litosfera e de matéria orgânica em diferenciados estágios de decomposição, relaciona-se intimamente com outros componentes básicos da natureza, dos quais não pode ser separado. Com eles realiza trocas importantes que podem definir o futuro da humanidade, fazendo valer a frase que abre este capítulo. Ao contrário do conceito bidimensional descrito anteriormente, o solo é uma entidade com quatro dimensões.

Verifica-se, através do esquema da figura 2.1, que a *PEDOSFERA*, que é o local do planeta

¹⁶ BRADY, N. C. O solo em perspectiva. In: BRADY, N. C. *Natureza e propriedades dos solos*. 9ed. Rio de Janeiro: F Bastos, 1989. p9.

onde se aloja fisicamente o solo, está intimamente ligada a todo o sistema ambiental, fornecendo a ele benefícios físicos e em troca, obtendo dele subsídios que permitam ao homem utilizá-lo como meio de produção.

Refletindo sobre a figura 2.1, o “conceito da casca de laranja” poderia ser mudado. A nova analogia deveria ser: *o solo é a pele que recobre a terra*. Ninguém se imagina apreciando uma laranja com a casca. A casca é rejeitada, atirada ao lixo. Agora, imagine viver sem a sua pele. Imagine tratar mal sua pele: arranhar, lixar, desgastar, moer. Impensável, não é mesmo? Pode-se dizer que para que haja saúde do corpo é necessário que se estabeleça um padrão de tratamento para a pele. E no caso do ambiente do planeta Terra, este padrão está relacionado ao equilíbrio obtido com as trocas efetuadas entre os quatro componentes básicos da natureza – a *hidrosfera*, a *atmosfera*, a *biosfera* e a *litosfera*.

Considerando, pois o solo como a pele que recobre a terra, entende-se a primeira parte da pergunta título deste subcapítulo: o que é o solo?

Até pouco tempo, o solo era visto como um recurso mineral, juntamente com os combustíveis, e a água. Simplesmente isto – recurso.

No entanto, cada vez mais compreende-se de que forma o solo, além de fornecer suporte para o desenvolvimento das plantas, para as bases das construções e alguns minerais de interesse comercial, tem importância capital no futuro da vida no planeta Terra. Pode-se afirmar que, na realidade, a maior parte da biodiversidade ocorre *no interior* do solo e não *sobre* ele.

A vida, a atmosfera, a água, o solo e as formas da paisagem evoluíram juntas e nenhuma delas seria como hoje se apresentam, se não

fossem todas as demais. E, sem nenhuma dúvida, a colaboração do ser humano na condição atual do ambiente planetário é indiscutível. Portanto, para que num futuro não muito distante nossos descendentes possam ver seus campos produzirem alimentos, os jardins florescerem, o gado crescer, as nascentes verterem água, os poços se encherem, as ruas, estradas e pontes com estruturas estáveis, seus investimentos seguros e rentáveis, é necessário iniciar rapidamente a gestão sustentável do solo e dos demais componentes do ambiente. Eles são inseparáveis e interdependentes.

O pioneirismo no estudo científico da origem dos solos é creditado ao russo Vasiliy Dokuchaev (1846-1903). Ele concluiu que diversos tipos de solo ocorrem de forma diferente em diversas paisagens, mas não de forma aleatória e sim de acordo com um padrão, que está relacionado com o material (rocha) de origem, clima, relevo e dos organismos vivos que atuaram ao longo dos séculos numa dada região – o que foi denominado “idade da paisagem”.

Estudar ou descrever detalhadamente a formação dos solos não é propósito deste texto. No entanto, para maior compreensão das técnicas utilizadas no uso dos equipamentos de mobilização de solo, das necessárias e decorrentes ações de conservação a serem comentadas e discutidas nos capítulos posteriores, seria fundamental conhecer, mesmo que de maneira básica (como será descrito a seguir), os fenômenos que dão origem aos solos e os que nele se processam.

Entende-se por *fatores de formação* a condição básica para o aparecimento do material granulado que compõe o solo. São eles: o *material de origem*, o *clima*, o *relevo* (ou topografia), o *tempo* e os *seres vivos* (*organismos biológicos*) que habitam a área.

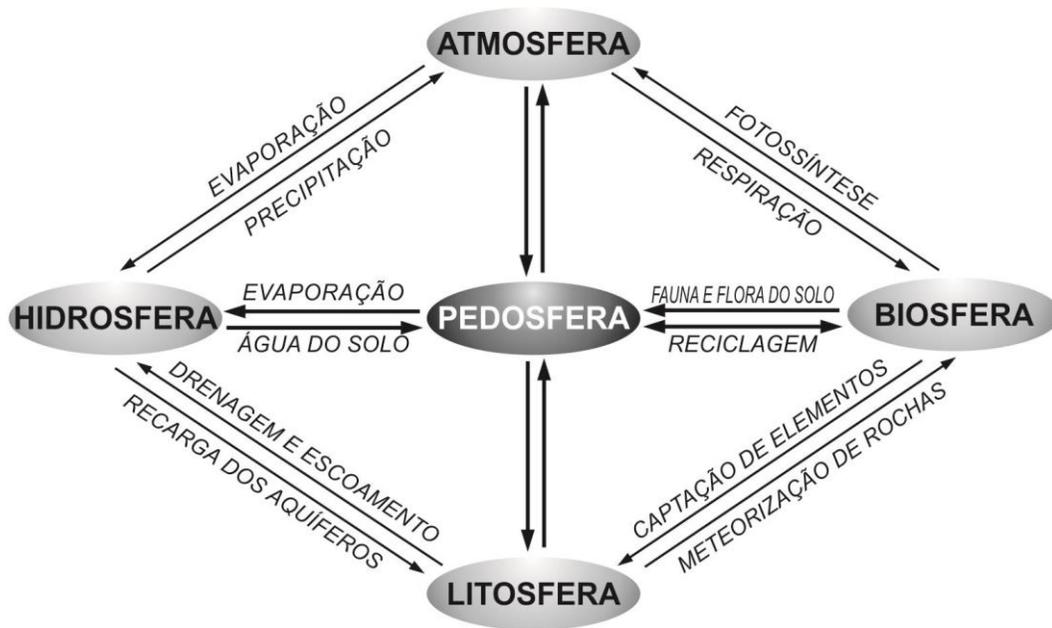


Figura 2.1. As quatro dimensões do solo. A pedosfera, que aloja os solos, está em comunhão com a biosfera, composta por todos os seres vivos que habitam a Terra; a litosfera que é a parte sólida do planeta; a hidrosfera que contém a toda água existente e a atmosfera, composta pela fração gasosa que envolve o todo, inclusive os chamados “espaços vazios” do solo. Adaptado de UNESCO (2007).

2.2.1 Material de origem

O material de origem é a rocha que forneceu os minerais para que fosse possível o aparecimento do granulado (ou desagregado) que constitui o solo. O fenômeno que dá origem a esse material granulado é chamado de *intemperismo*.

Pode-se entender intemperismo como sendo o conjunto de fenômenos químicos, físicos e biológicos que provocam a alteração das rochas e seus minerais. Independente do estado ou das dimensões do fragmento da rocha, o intemperismo é um processo contínuo e constante e seus resultados são muito variáveis. O processo, ao longo do tempo, recebe o nome de *intemperização* e ocorre desde a superfície avançando em profundidade. Como resultado é possível que, num mesmo local, encontre-se material rochoso em

níveis de alteração bem distintos, e como consequência, o conjunto final apresenta aspecto diferenciado. Geralmente, a superfície apresenta material em estado avançado de desagregação e decomposição, quando comparado com aquele encontrado num ponto mais profundo, onde pode haver mistura, em grau bastante irregular, de material não alterado com material alterado.

O material alterado da rocha original (*rocha sã*), em seu conjunto total, recebe o nome de *regolito*, enquanto que o material superficial, em grau mais avançado de alteração e lixiviação, que na maioria das vezes está associado à matéria orgânica, chama-se *solo*.

Para que ocorra intemperismo é necessário que forças da natureza atuem sobre as rochas. Tal fenômeno não é somente importante na formação do solo, mas participa também, e de forma intensa,

no ciclo de transformação das rochas, como pode ser observado na figura 2.2. Na prática é um conjunto dinâmico de acontecimentos que vai, lentamente, desestruturando a rocha. Para classificação didática pode-se classificar o intemperismo em duas categorias: *físico (ou mecânico)* e *químico*.

Basicamente há três tipos de rochas na natureza. As *ígneas ou magmáticas*, cuja origem está relacionada com a atividade vulcânica e, portanto, trata-se de lava resfriada; as *sedimentares* que são resultado da deposição e recimentação de fragmentos de outros tipos de rocha, cuja origem é derivada de alguma forma de intemperismo e as *metamórficas*, que surgem pela mudança na forma de algum dos outros dois tipos de rocha, devido à ação da pressão e temperatura. O intemperismo atuando sobre este material produzirá solos de diferentes características. Porém, mesmo para rochas de mesma origem é possível obter solos diferentes, em função dos processos de formação (intemperização) no decorrer do tempo. Um esquema que procura resumir e generalizar os efeitos do intemperismo e dos fenômenos que dão origem aos solos é mostrado na figura 2.3.

O intemperismo físico, também chamado de *desintegração* ou *desagregação* age no sentido de diminuir o tamanho das rochas e dos minerais, sem que isso resulte em mudança de sua composição. Os fenômenos que dão origem ao caráter físico do intemperismo são bem conhecidos, sendo que a importância de cada um deles é associada ao tempo em que ocorreram. As várias eras *glaciais* às quais o planeta foi submetido participaram abundantemente do intemperismo físico, agindo no desgaste por abrasão e no transporte das rochas. As geleiras, devido ao seu peso e deslocamento, trituraram e misturaram os minerais. Também o *vento* provoca ação abrasiva nas rochas que encontra em seu caminho, pois

carrega consigo resíduos material granulado fino (areia). É conhecido que também os *vegetais* podem desagregar rochas pela ação de suas raízes, porém em menor escala.

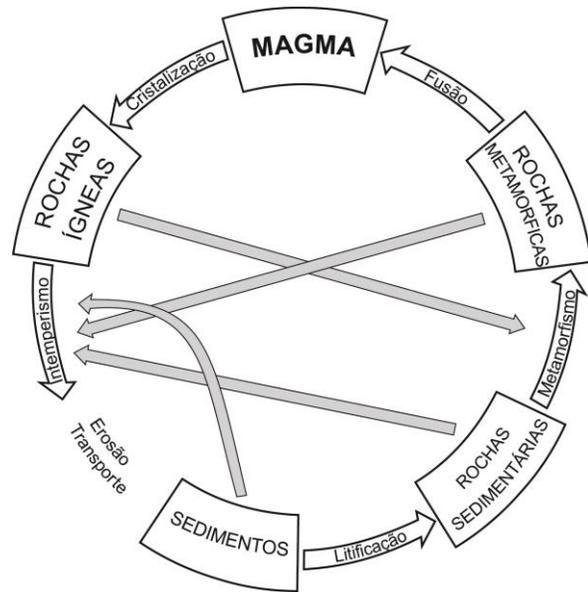


Figura 2.2. O ciclo de transformação das rochas. Adaptado de Caputo (1973).

No entanto, nenhum outro fenômeno físico é mais agressivo no intemperismo que a *temperatura*. A ação do calor solar durante o dia e o resfriamento noturno provocam dilatação e contração nas rochas. Por serem constituídas de minerais de diferentes composições cristalinas, possuem propriedades físicas distintas. Sabe-se que a dilatação térmica difere de um tipo de material para outro e, como consequência disso, as rochas ficam sujeitas a enormes tensões com a variação da temperatura. Como resultado destas tensões o material fragmenta-se ou nele aparecem fissuras. O processo de decomposição será acelerado quando, por exemplo, água preenche tais espaços e congela-se. É importante ressaltar que a diferença de pressão existente entre o interior da crosta e a superfície também contribui para a expansão diferencial. Tais modificações, no

entanto, não alteram a composição mineralógica do material.

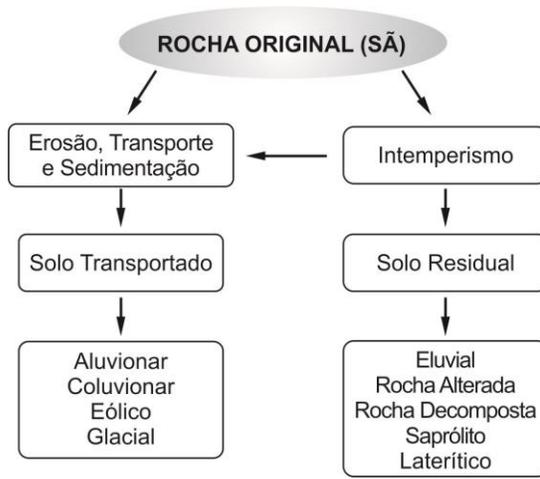


Figura 2.3. Representação esquemática dos efeitos físico-químicos que atuam na formação dos solos.

O intemperismo químico, também chamado de *decomposição* é o processo que age nos minerais que compõem as rochas e sua ação será tanto maior, quanto menor forem os tamanhos das partes desagregadas. Fica claro, portanto, que decomposição e desagregação são processos simultâneos e não podem ser dissociados. Seu resultado é acelerado pelas condições ambientais de umidade e calor. As reações físico-químicas mais comuns no que se denomina intemperismo químico são a *hidrólise*, a *acidificação*, a *oxidação*, além de *hidratação* e *dissolução*. Tais reações, por sua vez, alteram a composição química dos minerais que compõem a rocha original.

Como se pode observar pelo esquema da figura 2.3, o intemperismo é o responsável pela formação dos *solos residuais*, cuja origem implica na decomposição “in situ” da rocha de origem. Apesar disso, este fenômeno facilita o aparecimento dos solos chamados de *transportados*, fornecendo material para ação de transporte, principalmente das águas e do vento.

2.2.2 Ações climáticas na formação dos solos

O clima funciona como um catalizador do processo de intemperismo e determina a sua natureza. Quanto mais úmido for o local, maior será a quantidade de reações químicas possíveis e de ações mecânicas que ocorrerão, em função da quantidade de água presente. O mesmo pode-se dizer da temperatura. Assim, se forem oferecidas amplas oportunidades, o clima tenderá a dominar o processo de formação dos solos.

As condições climáticas são fundamentais para o desenvolvimento da biota local, determinando a ação das plantas, de suas raízes, da movimentação dos animais dentro e fora do solo, do tipo e quantidade dos dejetos que serão metabolizados e quimicamente transformados, influenciando tanto no intemperismo físico como no químico. Uma evidência deste fato é a quantidade de material orgânico encontrada nos solos das regiões tropicais úmidas em contraste àquela encontrada nos solos de regiões áridas.

2.2.3 Interferência do relevo ou topografia

Regiões com relevo de características pouco onduladas que favorecem drenagem vertical, regra geral, apresentam solos mais desenvolvidos, podendo alcançar grandes profundidades. No entanto, se a drenagem destes locais for deficiente e eles permanecerem alagados por grande parte do tempo, a ação do clima será anulada pela presença da água. Por outro lado, topografias acidentadas e fortes declives, onde o processo de drenagem é lateral, facilitando e promovendo a erosão, produzem solos mais rasos.

Além disso, o relevo tem influência decisiva na vegetação que recobre um dado solo. Por isso pode-se afirmar que a vegetação, em função do relevo, torna-se um fator controlador das modificações observadas nestas áreas.

2.2.4 O efeito do tempo

O tempo em que ocorre o intemperismo é determinante na *madureza* dos solos. Quando as condições são favoráveis, como é o caso das regiões tropicais (quentes e úmidas), o fator tempo ganha maior importância, dando origem a solos mais desenvolvidos.

2.2.5 Organismos agindo no meio mineral

Além de microrganismos, uma variedade enorme de seres vivos se estabelece na superfície de rochas. Dentre eles, torna-se importante para o intemperismo a presença de musgos e líquens, cuja conformação física facilita o acúmulo de poeira e outros detritos, que combinados com resíduos da decomposição das partes mortas dessas plantas inferiores, produzem substâncias químicas que podem atacar a estrutura das rochas.

Ao mesmo tempo em que as rochas são desagregadas e decompostas, o processo de formação do solo vai se concretizando. Depois dos micróbios e vegetais inferiores ele começa a ser “habitado” por toda espécie de organismos, cujo papel na diferenciação do material original não deverá ser subestimado. A vegetação reduz a erosão e por consequência o ritmo da remoção de nutrientes. Os animais e as raízes introduzem grandes quantidades de nitrogênio ao sistema e promovem homogeneização das camadas em função de seus movimentos.

Por fim, a influência do ser humano exerceu importância fundamental no desenvolvimento dos solos em eras geológicas recentes - o *Holoceno*, que teve início há aproximadamente 11.500 anos. A retirada da vegetação nativa para uso agrícola, urbano, construção de estradas e barragens tem importância capital na mudança da paisagem e, por conseguinte, na formação dos solos, mesmo sendo muito recente na história do planeta. Além

destas ações diretas, pode-se acrescentar a irrigação de terrenos áridos, a adição de fertilizantes, corretivos e agroquímicos, assim como as operações de mobilização em aradura como fatores intensamente determinantes na alteração do ambiente.

Antes, de analisar a ação do homem sobre a modificação dos solos, é preciso que se saiba que o processo de formação interfere nas suas características físicas, que são semelhantes em todas as regiões do planeta, como constatou o pedólogo Dokuchaev, em meados do século XIX: a chamada *estratificação em camadas*. De maneira geral, considera-se que tal estratificação é composta de materiais não consolidados sobre um leito rochoso – o regolito. Este material pode variar de alguns centímetros até dezenas de metros de profundidade (como mostrado na tabela 2.1), em função da rocha da qual se originou e sua composição. Também é função dos processos de formação, podendo ser material desintegrado da rocha subjacente assim como transportado e depositado por água, vento ou geleiras, ao longo dos tempos.

Tabela 2.1 Espessura de camadas (m) do solo em função da rocha de origem (adaptado de Nogueira, 1988).

Basalto	18 – 25
Granito	19 – 24
Gnaisse Micáceo e Micaxisto	33- 42
Arenito	28 - 45

Percebe-se, ao examinar o regolito nas suas camadas superiores (próximo da superfície do solo, o que pode significar em alguns locais até 2 metros de profundidade), que a composição difere do restante, mais profundo. É a esta diferenciação que se chama de solo. Como mostra a figura 2.4, de todo o material não consolidado, é na parcela superior onde ocorre o maior número e as principais inter-relações com os organismos

vivos, sendo por isso a região de maior interesse para a agricultura. As camadas estratificadas que compõem o solo têm características distintas entre si, no que se refere à sua composição física, química e granulométrica e cada uma delas é conhecida pelo nome de *horizonte*. A sequência estabelecida pelos horizontes superpostos é conhecida como *perfil do solo*. Portanto, o perfil do solo é que lhe confere suas características agrônomicas e determina a forma com que ele será manejado com vistas à manutenção e melhoria de sua fertilidade.

Basicamente, os horizontes são classificados de acordo com sua composição geral e são identificados pelas letras maiúsculas *O*, *A*, *B* e *C*. A

formação do solo depende das diversas condições de origem das rochas, do clima, da umidade, além de outras, sendo que os horizontes apresentam variações em função de tais condições. Em alguns solos um ou mais horizontes podem estar ausentes, assim como o desenvolvimento de cada um deles é extremamente variável. Muitas vezes, pelas características verificadas na investigação, há necessidade de dividir um determinado horizonte em subclasses ou estabelecer uma região chamada de *transição*, por não ser possível determinar com clareza os limites entre eles.

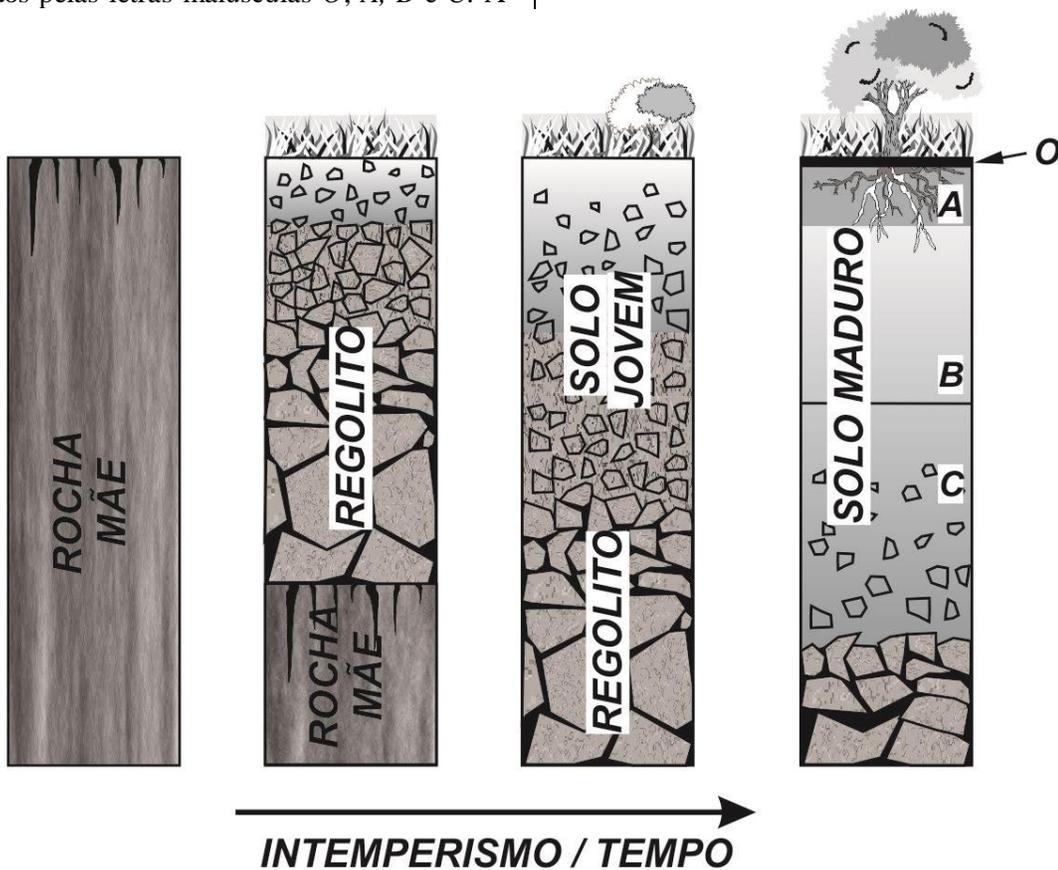


Figura 2.4 Representação esquemática do regolito e seu posicionamento em relação à rocha subjacente. Posição ocupada pelo solo e seus respectivos horizontes.

A figura 2.5 mostra, teoricamente, como deveria ser a composição volumétrica de um solo natural sem nunca ter sido utilizado para a atividade agrícola sendo que neste caso, seus horizontes apresentariam com maior intensidade as características descritas a seguir.

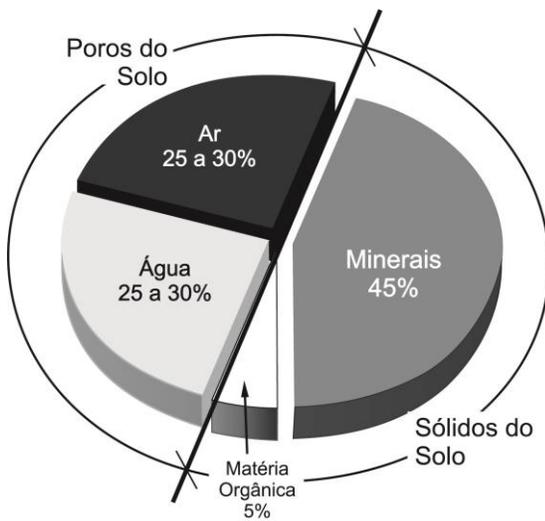


Figura 2.5 Composição volumétrica (média esperada) de um solo na sua camada de aradura. (Adaptado de Brady, 1989).

Horizonte orgânico (O)

Ocorre frequentemente nas florestas e quase sempre são ausentes nas áreas de vegetação mais baixa, como as pastagens naturais. Trata-se de uma fase do solo que está logo acima dos minerais, uma vez que sua composição é basicamente de restos dos seres vivos que ocupam a superfície. Então, são encontrados no horizonte O, folhas e galhos caídos das árvores, carcaças de animais de toda espécie, assim como seus dejetos, todos eles em variados níveis de decomposição. Há quem divida este horizonte em três subclasses (*i*, *e* e *a*) creditando a elas um crescente no estado de decomposição. Evidentemente que, com a utilização agropastoril e conseqüente revolvimento do solo, esta camada

incorpora-se à subseqüente, não sendo mais observada.

Horizontes eluviais (A)

É um grupo de horizontes de característica mineral, constituindo a camada mais superficial, mas fortemente impregnada de matéria orgânica humífera, o que lhes confere uma cor mais escura que os horizontes mais profundos, tendendo ao cinza. Esta é a região mais *lixiviada* do solo (ou eluviada que é sinônimo de “lavada”), mas que possui as propriedades que lhe conferirão as características de fertilidade desejável para exploração agrícola, pastoril e florestal.

O horizonte A compõe, em geral, a região que se convencionou chamar de *camada de aradura*, por se tratar da região em que o arado atua (ou deveria atuar), cortando e revolvendo o solo, para cumprir as finalidades que se espera desta operação na fertilidade.

É nesta fase do solo onde ocorre a esmagadora maioria das transformações micro e microbiológicas.

Horizontes iluviais (B e C)

O horizonte B é a camada do solo que recebe o material lavado das camadas superiores e, portanto, onde se acumula a maior quantidade de substâncias como óxidos de ferro, alumínio e de argilas. Em regiões áridas, devido à ascensão de água por capilaridade e forte evaporação ocorre nesta região o acúmulo de diversos sais.

Por vezes o horizonte B é classificado ou tomado como *subsolo*, o que é equivocado. Embora a quantidade de matéria orgânica seja praticamente inexistente, nesta camada existem substâncias minerais que poderão ser incorporados à camada de aradura, servindo como

nutriente para os vegetais. Além disso, trata-se de um importante “reservatório” de água, devido à sua porosidade.

O horizonte *C*, quando presente, está muito mais profundo e poderá ser ou não composto por material não consolidado da rocha que originou o solo. Suas camadas superiores podem se misturar com as inferiores do horizonte *B*, devido ao processo de intemperismo.

Como no caso do horizonte *C* misturando-se ao *B*, é possível que isto ocorra entre as demais camadas descritas, podendo ser difícil de distinguir onde uma termina e onde a outra começa. Assim, designam-se estas zonas como *AB*, *BA*, *BC* ou *CB*, de acordo com todas as possibilidades de mistura verificadas.

Como é fácil de entender, quando se inicia a lavra de um solo, procede-se à mistura de todos os materiais componentes, originando daí uma estrutura que compõe a camada de aradura. Frequentemente, torna impossível o reconhecimento dos horizontes superficiais, principalmente em solos mais rasos. A camada de aradura, por sua vez, deveria apresentar uma composição volumétrica, na média, equivalente ao apresentado na figura 2.5, para o bom desenvolvimento vegetal.

2.3 Fertilidade do solo e desenvolvimento vegetal

A definição mais aceita de *fertilidade* refere-se à propriedade do solo em fornecer os nutrientes que os vegetais necessitam para seu metabolismo, em quantidades adequadas e proporções convenientes.

Esta definição poderia provocar enganos nos leitores menos avisados, pois levaria a crer que é possível adicionar ou retirar tais “nutrientes”, como forma de regular seu fornecimento aos

vegetais, o que é verdadeiro somente dentro de certos limites. Assim, tomar esta verdade como referência ao trabalho do agricultor ou dos profissionais das ciências agrárias poderia conduzir a sérios danos ambientais.

Para que se forme um conjunto de conhecimentos que permita entender o conceito amplo e moderno de fertilidade faz-se necessário definir algumas características básicas dos solos cultivados.

Ao observar a figura 2.5 verifica-se que o volume ocupado pelo solo é dividido em duas partes, praticamente iguais, compostas de vazios (ou poros) e sólidos.

2.3.1 Algumas características dos espaços vazios ou porosidade do solo

A porosidade do solo é formada basicamente em função da acomodação das partículas orgânicas e minerais que o compõe. Desta forma, a distribuição da porosidade variará na mesma proporção em que varia a mistura dos sólidos do solo e a composição mineral também determinará as dimensões dos poros, classificados como *microporos* e *macroporos*, em função do seu diâmetro médio. Estas duas categorias de poros desempenham funções diferentes e de importância capital para a fertilidade. Em condições de campo não se pode desprezar a ação das galerias produzidas por animais e pelas raízes mortas.

O limite físico entre macro e microporosidade é controverso e alguns autores interpolam uma terceira classe definida como *mesoporos*. No entanto, aceita-se que espaços com diâmetro médio até 10^{-4} m seriam microporos e quando os diâmetros estiverem acima deste limite seriam macroporos.

Como é de se esperar, a água preenche os poros, à medida que o solo vai umedecendo, por chuva ou eventualmente por irrigação, podendo ocupar até 100% dos espaços vazios. A partir desta condição de umidade, a cada gota acrescentada, uma será drenada. Esta condição é denominada *máxima capacidade de retenção*. Cessando a fonte de fornecimento de água ocorre que, naturalmente, o excesso é drenado por um mecanismo gravitacional chamado *gradiente hidráulico*. Com o progresso da drenagem, num determinado momento, quase todos os macroporos estarão tomados pelo ar e o líquido restante no solo ocupará a maioria dos microporos, não mais ocorrendo drenagem pela ação gravitacional. Este é o segundo ponto importante na caracterização das condições físicas do solo, relativo à sua umidade, denominado *capacidade de campo*. Isto ocorre devido ao fenômeno de adesão da água às paredes dos microporos, da coesão entre suas partículas e da gravidade, o que é conhecido por *capilaridade*. Nesta situação a respiração do sistema radicular dos vegetais é plena, assim como a absorção da água e dos nutrientes nela dissolvidos (solução do solo) ocorre sem maiores dificuldades.

Se não ocorrer novo fornecimento de água, o fenômeno de metabolismo vegetal “bombará” a água disponível no interior do solo para suas partes aéreas, provocando transferência do líquido para a atmosfera, processo conhecido por *evapotranspiração*. Além disso, tanto o calor solar como a movimentação de ar nos poros do solo provocará a evaporação da água existente nas camadas mais superficiais, diminuindo gradativamente as reservas. Nesta situação, verifica-se que os vegetais perdem água durante o dia, consequentemente murchando, recuperando sua turgescência durante a noite. A permanecer a falta de fornecimento da água os vegetais não mais

terão capacidade de retirá-la do solo, embora ainda exista umidade nele. Nesta condição, chamada de *ponto* ou *coeficiente de murcha permanente*, ocorre situação crítica e os vegetais morrerão em curto período de tempo, caso não haja reposição dos estoques líquidos.

Em função do comportamento descrito conclui-se que a água adicionada ao solo pela chuva, irrigação ou outra forma qualquer, pouca importância teria, não fosse sua capacidade de retê-la nos seus espaços vazios e, quando encharcado, proporcionar o escoamento do excesso, para permitir a vida (respiração) das raízes. O solo funciona, pois, como um reservatório entre uma chuva e outra sendo que a capacidade de armazenamento depende, dentre outras propriedades, principalmente, de sua profundidade, textura e constituição. A quantidade de água armazenada e que fica disponível para as plantas é conhecida como *capacidade de retenção de água disponível*.

O comportamento médio dos solos, com relação à sua capacidade de retenção de água em função de sua textura está representado na figura 2.6. É necessário lembrar que outras propriedades importantes para o fenômeno foram negligenciadas.

A influência da textura dos solos sobre a disponibilidade de água para as plantas tem relação com a capacidade das partículas em retê-la “aderida” à sua superfície. Os solos de textura fina têm maior capacidade de retenção, se comparados com os de textura mais grossa, porque quanto menor o tamanho das partículas, maior será a área superficial encontrada em um mesmo volume, conforme mostra a figura A3 do apêndice.

A estrutura do solo, que é característica do arranjo das partículas, também influencia a capacidade de retenção de água, pois é a respon-

sável pela porosidade (principalmente a micro-porosidade). Então, solos em cuja estrutura as partículas se unem mais firmemente possuem como característica reter maior quantidade de água de que os mais soltos. No entanto, a firmeza como a água é retida em alguns solos de textura muito fina (o que também é influenciado pelo

tipo de argila existente) pode indisponibilizar a umidade às plantas. Como esquematizado na figura 2.6, quando a porcentagem de argila fica ao redor de 30%, verifica-se a maior diferença entre as linhas limites de capacidade de campo e ponto de murcha permanente, significando a maior disponibilidade de água para as plantas.

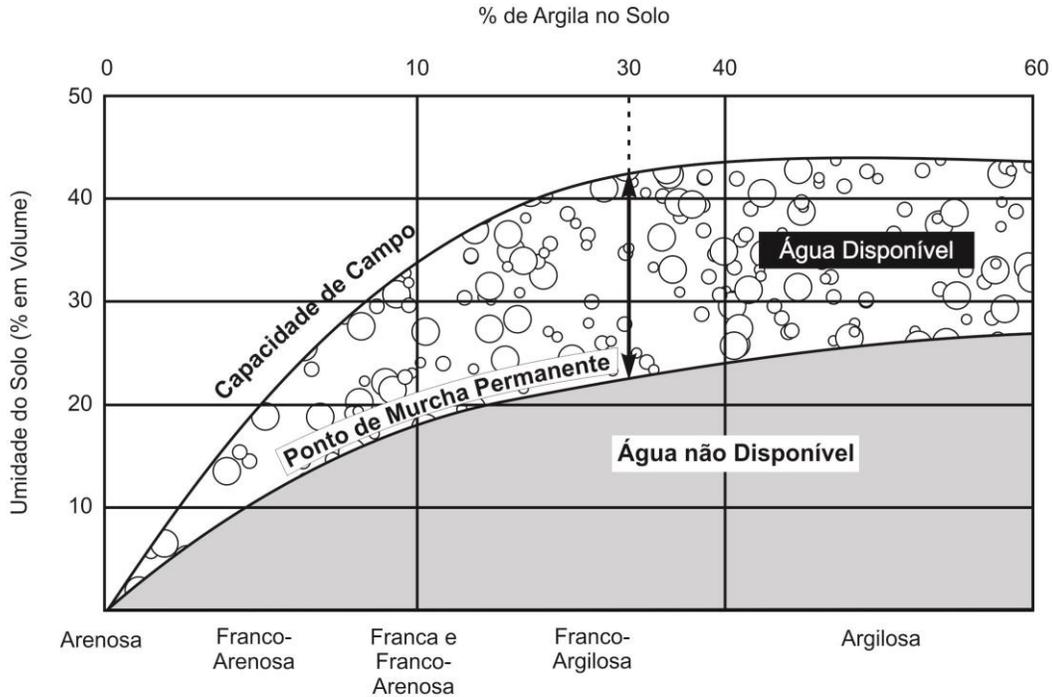


Figura 2.6. Comportamento dos solos de acordo com sua capacidade de retenção de água em função da textura. Adaptado de Troeh & Tompson (2007).

A matéria orgânica é outro fator que pode influenciar a retenção de água, principalmente nos solos arenosos. Estes apresentam, em média, retenção de 15%, em volume, quando na capacidade de campo. Estima-se que 1% em peso de matéria orgânica possa aumentar a capacidade de retenção em 1,5% representando, neste caso, algo em torno de 10% da capacidade total de retenção de água num solo arenoso. Porém, a simples adição de matéria orgânica não terá influência imediata na retenção de

água, pois ela deve estar intimamente ligada às partículas fazendo parte da estrutura do solo. Além disso, considerando a profundidade da camada de aradura, para aumentar em 1% o índice de material orgânico num solo, deveriam ser adicionados a ele, aproximadamente 40.000m³ de estrume ou algum material desse tipo¹⁷ por hectare, tarefa economicamente inviável. Mesmo que fosse executada tal operação, grande parte da matéria orgânica seria decomposta rapidamente. Para surtir efeito, a adição de matéria

¹⁷ Considerando 0,25m de profundidade, massa específicas do solo arado 1.000kg.m⁻³ e do esterco 600kg.m⁻³.

orgânica deve ser realizada ao longo do tempo, de forma planejada. Como mostrado na figura 2.5, da porção porosa do solo, praticamente a metade é ocupada com ar. Alguns autores dividem esta parcela em 3 partes iguais. Uma delas seria a água, outra o ar e a terceira seria completada com a mistura de ambos, para mostrar que há constante alteração nestas proporções.

Na realidade, o solo é um nicho onde vivem animais de variados tipos, microrganismos e, evidentemente, plantas e suas raízes. Para obter energia, os autótrofos utilizam-se de compostos de carbono e mediante reações bioquímicas os reduzem a vários outros compostos. O principal efeito deste fenômeno é que ele consome oxigênio (O₂) e libera gás carbônico (CO₂), no processo aeróbio, que é o mais comum. Credita-se essa atividade quase que totalmente aos microrganismos.

É fácil compreender a necessidade de fazer com que o CO₂, um gás tóxico, saia de dentro do solo e que a quantidade de O₂ seja reposta possibilitando a continuação da respiração. Este efeito, no entanto, não é fácil de ser obtido como se conclui, em função do que foi discutido até aqui, sobre a composição e características do solo. Além de uma parte dos espaços vazios ser tomada pela água, há necessidade de fazer com que o ar do solo “movimente-se”, de forma a provocar as trocas gasosas com a atmosfera. Estas trocas deverão ser tanto mais rápidas, quanto maior for a atividade microbiológica, que é extremamente desejável, na decomposição da matéria orgânica e consequente liberação de nutrientes nela fixados, como fósforo e nitrogênio, dentre outros.

Um solo bem aerado (ou arejado) seria, portanto, aquele que possibilita trocas gasosas com a atmosfera numa velocidade suficiente para evitar a concentração tóxica de CO₂ e forne-

cimento de O₂ para continuidade do desenvolvimento normal dos microrganismos assim como das raízes dos vegetais.

Fica claro, então, que a porosidade total e a umidade do solo interferem decisivamente na sua capacidade de realizar as trocas necessárias com a atmosfera. A deficiência na aeração interfere no crescimento dos vegetais superiores (plantas cultivadas) por dificultar os processos metabólicos nas raízes e consequente absorção da água e nutrientes. Verifica-se que, nestas condições, as plantas apresentam sintomas de deficiências nutricionais, mesmo existindo no solo a quantidade adequada de elementos nutrientes assimiláveis. Uma indicação importante da deficiência de aeração está na observação de grande quantidade de material orgânico não decomposto, consequência da baixa atividade microbiana no solo.

Por sua vez, com aeração deficiente (entenda-se falta de O₂), alguns microrganismos poderão se utilizar de outras formas de sobrevivência e começam a obter energia sob a forma anaeróbia, que embora mais lenta, possibilita a decomposição de matéria orgânica. O inconveniente deste processo é que existe possibilidade de aparecimento de substâncias não totalmente decompostas (chamadas quimicamente de *reduzidas*) que apresentam elevado poder tóxico para as plantas.

2.3.2 Algumas características físicas dos componentes sólidos do solo

Como mostrado na figura 2.5, o solo é um sistema poroso composto por partículas inorgânicas (minerais), material orgânico (em decomposição), água e ar. A seguir, serão apresentadas algumas características da parte sólida de tais componentes.

2.3.2.1 Composição orgânica

Os solos chamados *minerais* contém, em teores muito variáveis, uma porção de material de origem orgânica que pode atingir, na média geral, parcelas de até 5%, na camada arável.

A sua fertilidade está intrinsecamente associada ao teor de matéria orgânica, proveniente de dejetos e resíduos, resultado do metabolismo dos organismos vivos ou de suas carcaças após a morte. A esmagadora predominância, no entanto, faz parte integrante do solo, é de origem vegetal e está totalmente decomposta, recebendo o nome de *húmus* (ou *humo*). O húmus é considerado, portanto, material amorfo, de composição química complexa e extremamente modificada, quando comparada com o tecido orgânico de onde se originou.

Os organismos vivos que estão presentes no solo e fazem parte da matéria orgânica podem ser divididos em:

Raízes Vegetais: constituem a maior parte da matéria orgânica viva abaixo da superfície. Ao se desenvolver movimentam as partículas do solo e modificam seu arranjo à medida que crescem e penetram no perfil. Além disso, durante este processo elas perdem células da epiderme, por esfoliação, além de secretar diversas substâncias que podem colaborar no desenvolvimento das outras formas de vida;

Macrofauna: são animais vertebrados tais como roedores e cavadores que vivem total ou parcialmente enterrados. Sua ação provoca a diminuição de tamanho das partículas vegetais de que se alimentam, por mastigação, e promove a digestão parcial do material, deixando resíduos de toda ordem. Alguns desses animais são predadores carnívoros. Outros são detritívoros e alimentam-se de carcaças e restos de outros seres já sem vida.

Microfauna: são animais pertencentes aos filos Artrópode, Anelídeos, Nematoides e Moluscos (respectivamente animais conhecidos como insetos e aranhas ou ácaros, minhocas, nematoides, caramujos e lesmas em geral). Destes, os insetos e as minhocas são, de longe, os mais importantes e mais numerosos. Seus atributos estão relacionados ao fracionamento do material orgânico em partículas menores que aquelas conseguidas pelos animais da macrofauna. Outra característica importante é que eles escavam galerias, transportam e misturam o solo, contribuindo na drenagem;

Microrganismos: trata-se de um grupo de seres vivos composto por representantes dos reinos animal (geralmente menores que 0,2mm) e a chamada microflora (seres cuja dimensão pode ser de 1µm). Os maiores representantes dos animais microscópicos são os nematoides que, em geral, vivem nos resíduos em putrefação, mas em alguns casos são parasitas, podendo causar danos às plantas cultivadas. Os representantes dos microrganismos, na sua grande maioria, pertencem aos reinos *Plantae* (vegetais), *Fungi* (os fungos), *Monera* (as bactérias) e os *Protistas* (protozoários).

A atividade microbiana é essencial para a transformação dos resíduos orgânicos em substâncias que podem ser aproveitadas pelos vegetais, num fenômeno chamado de *mineralização*, no qual elementos como fósforo, nitrogênio e enxofre, por exemplo, são metabolizados pelos microrganismos e por eles rejeitados, ficando livres na solução do solo em moléculas ionizadas, que serão absorvidas pelos vegetais.

2.3.2.2 Composição mineral

A parte estritamente mineral do solo é composta por partículas oriundas do intemperismo das rochas da qual ele se originou e a sua formação poderia ser representada pela sequência:



A distribuição das partículas inorgânicas no solo não é homogênea e suas dimensões são extremamente variáveis. A tabela 2.2 dá uma ideia destas dimensões e, como é possível notar, não há consenso sobre a delimitação das classes

de partículas, principalmente quando se trata daquelas de menor dimensão. Assim, a classificação de um solo poderá variar de acordo com o padrão adotado.

Tabela 2.2 Limites de tamanho de partículas que compõem os solos de acordo com algumas entidades técnicas especializadas.

Fração	Separados do Solo	Tamanho (10 ⁻³ m)		
		IBP*	SICS	DAEUA
Cascalho		>2	>2	>2
Areia	Areia muito grossa			1<a<2
	Areia grossa	0,6<a<2	0,2<a<2	0,5<a<1
	Areia média	0,2<a<0,6		0,25<a<0,5
	Areia fina	0,06<a<0,2	0,02<a<0,2	0,1<a<0,25
	Areia muito fina			0,05<a<0,1
Silte			0,002<s<0,02	0,002<s<0,05
	Silte grosso	0,006<s<0,02		
	Silte fino	0,002<s<0,006		
Argila	Argila	< 0,002	< 0,002	< 0,002

* **IBP** – Instituto Britânico de Padrões; **SICS** – Sociedade Internacional de Ciência do Solo; **DAEUA** – Departamento de Agricultura dos Estados Unidos da América; a – areia; s – silte.

Em termos gerais, a associação das quantidades de partículas por classe dimensional determina as características de cada solo, classificados a partir daí em *arenosos*, *francos* e *argilosos*, assim como suas subdivisões em termos de textura, que podem ser *grossa*, *média* e *finas*. Esta divisão, que classifica o tamanho das partículas, não considera, no entanto, a composição físico-

química do material. A importância dessa composição está associada ao fenômeno de *plasticidade* que será discutido no próximo capítulo. A saber, pode-se classificar os componentes do solo de acordo com sua origem e composição como descrito na tabela 2.3.

Os sais solúveis contêm os nutrientes que são classificados como essenciais e para o desen-

volvimento sadio das plantas e dividem-se em macro e micronutrientes. Os elementos considerados *macronutrientes* são: nitrogênio (N), fósforo (P), potássio (K), que são os principais componentes das formulações de fertilizantes químicos, além de enxofre (S), cálcio (Ca) e magnésio (Mg). São assim chamados pois a concentração destes elementos, necessária para o desenvolvimento das plantas, é relativamente alta se comparada com os *micronutrientes*, que são: boro (B),

cobre (Cu), cloro (Cl), Ferro (Fe), manganês (Mn), molibdênio (Mo), níquel (Ni) e zinco (Zn). Evidentemente, estes nutrientes apresentam-se no solo sob a forma de combinações com outros elementos, principalmente o oxigênio (que é o elemento presente em maior quantidade), sob a forma de cátions. Outros três elementos são classificados como *benéficos* para algumas plantas. São eles: cobalto (Co), silício (Si) e sódio (Na).

Tabela 2.3. Classificação das partículas componentes do solo conforme a composição físico-química e da origem. Adaptado de Lambe & Whitman (1979).

Argilo - minerais	
SUBSTÂNCIAS INORGÂNICAS	Minerais Não Orgânicos
	Hidróxidos de Fe e Al Micas Feldspatos Cálcio e Dolomita Quartzo
Material Decomposto – HUMUS	
SUBSTÂNCIAS INORGÂNICAS	Organismos vivos ou seus órgãos (raízes, tubérculos, caules, etc.)

A função de cada um destes elementos pode ser estrutural ou regulatória. Isto quer dizer que eles poderão fazer parte da estrutura das plantas em si, dando-lhes sustentação ou participar de suas estruturas metabólicas como proteínas plasmáticas e reservas de energia, por exemplo. De outra forma, somente participariam de reações bioquímicas necessárias à realização do metabolismo, possibilitando o crescimento, o florescimento e o desenvolvimento de maneira geral.

Outros dois elementos presentes no solo são de importância capital na fertilidade: o hidrogênio (H) e o alumínio (Al). Eles determinam uma característica fundamental que é o *pH*. Este

fator mede a concentração de ácidos e bases presentes na solução, determinando se o solo é ácido (quando o valor obtido for inferior a sete) ou alcalino (quando este valor for superior a sete, o que também é classificado como salinidade, principalmente por excesso de sódio). A maioria dos solos têm pH entre quatro e oito, sendo que uma pequena região próxima do valor sete é considerada “pH neutro”. As principais causas da acidez encontrada nos solos podem ser creditadas aos fatores de formação (rochas de origem, intemperismo, etc.), práticas culturais, profundidade de amostragem (região do perfil amostrada), umidade no momento da

amostragem, estação do ano e método de determinação.

A figura 2.7 mostra como a variação da acidez (pH) pode influenciar o desenvolvimento das plantas, determinando a forma química como os nutrientes se apresentam no solo, interferindo na sua disponibilidade às plantas. Em alguns casos a absorção é dificultada, em outros pode transformar os elementos nutrientes em compostos tóxicos ou até mesmo concorrer para sua perda por lixiviação.

Teoricamente, todas as questões relacionadas com a fertilidade do solo poderiam ser corrigidas. Sendo assim, a disponibilidade de nutrientes poderia ser obtida por correção da acidez ou da salinidade. Ainda seria possível acrescentar nutrientes que faltam em alguns solos, proporcionando maior capacidade de produção às plantas e, portanto, aumentando a disponibilidade de alimentos. Analisando a tabela 1.2, as figuras 1.3 e 1.4, assim como as figuras A1 e A2 do apêndice, nota-se claramente que a partir de meados dos anos 1950 houve intensa aplicação de tecnologia na agricultura. Ocorreu aumento de área cultivada em decorrência da mecanização das operações, e sensível melhoria na produtividade das culturas, o que deu suporte ao vigoroso aumento da população, observado até os dias atuais. Grande parte deste sucesso pode ser creditado aos fertilizantes químicos. A partir da mesma época a utilização de fertilizantes cresceu de pouco mais de 30 milhões de toneladas ao ano para mais de 140 milhões de toneladas na atualidade, como mostra a figura 2.8.

Os experimentos de Liebig associados aos de outros cientistas do século XIX, até os dias atuais, mostram que os níveis de nutrientes no solo determinam o sucesso do crescimento e da produção vegetal. Quando estes níveis são baixos, o desenvolvimento é baixo. À medida que aumenta a quantidade de nutrientes, ocorre ganho de produtividade, até um ponto onde o

crescimento é ótimo. Evidentemente, tais níveis variam de acordo com a espécie vegetal considerada, mas de modo geral, existe padrão comum de comportamento. Assim, num intervalo restrito de concentração, verifica-se máxima produtividade, a partir do que não há resposta no desenvolvimento, mesmo que a concentração de nutrientes cresça.

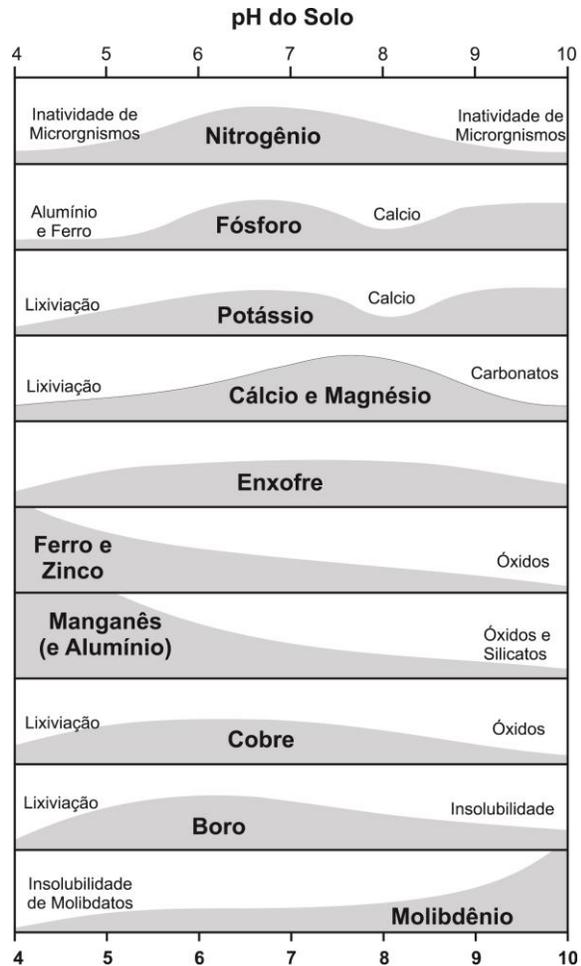


Figura 2.7. Disponibilidade de nutrientes (partes mais espessas das barras sombreadas) em função do pH do solo. Adaptado de Troeh & Thompson (2007).

A figura 2.9 mostra esta situação e pode-se observar que, a partir de um determinado nível de concentração os nutrientes passam a exercer o papel de substância tóxica, determinando o decréscimo de desenvolvimento (ou produção).

De maneira geral, a granulometria do solo determina suas propriedades físicas e químicas de interesse agrônomo, as quais conferem a ele sua fertilidade. Algumas destas características podem ser observadas na tabela 2.4, lembrando

que os solos com textura intermediária (chamados de *francos*), apresentarão comportamentos variáveis, tanto num sentido como em outro, em função da sua tendência em possuir maior ou menor concentração de argila ou areia.

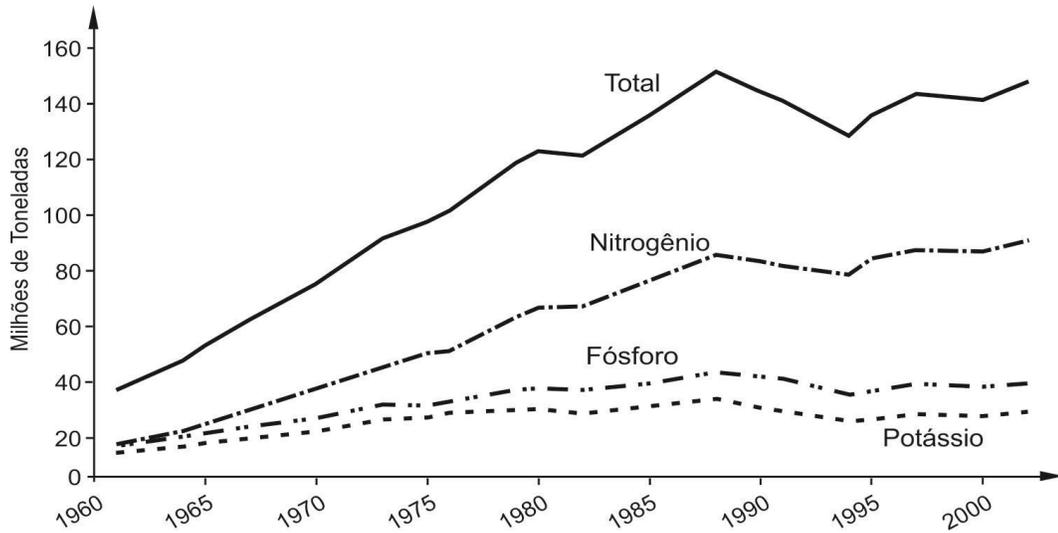


Figura 2.8. Evolução da utilização de fertilizantes à base de Nitrogênio, Fósforo e Potássio (NPK), na agricultura mundial. (FAO, 2010).

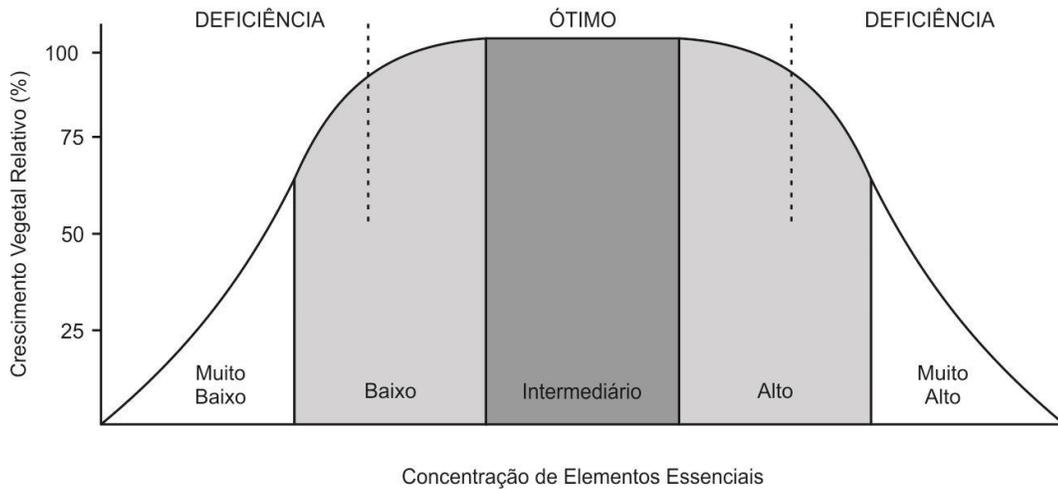


Figura 2.9. O crescimento vegetal em função da concentração de elementos essenciais no solo. Adaptado de Brady (1989).

Tabela 2.4. Características físicas e químicas dos solos, de acordo com sua classificação granulométrica.

Grandes Tipos de Solo Quanto à Textura	
<i>Textura Fina - Argilosa</i>	<i>Textura Grossa - Arenosa</i>
Elevada retenção de água	Baixa retenção de água
Baixa mobilidade de água	Alta mobilidade de água
Plástico e pegajoso quando úmido	Friável quando úmido
Duro quando seco	Friável quando seco
Coesão elevada	Coesão baixa
Peso específico menor	Peso específico maior
Microporosidade alta	Macroporosidade alta
Maior porosidade total	Menor porosidade total
Bem estruturados	Baixa estruturação
Maior superfície específica	Menor superfície específica
Aeração deficiente	Aeração satisfatória
Maior concentração de nutrientes	Menor concentração de nutrientes
Maior capacidade de troca catiônica	Menor capacidade de troca catiônica
Maior dificuldade de mobilização por ocasião do preparo periódico	Menor dificuldade de mobilização por ocasião do preparo periódico

2.3.3 A umidade do solo e a sua fase líquida

A água é tão importante para a humanidade que por milênios, juntamente com a terra, o ar e o fogo, foi considerada um dos quatro elementos formadores do universo. A descoberta de sua real composição somente ocorreu no século XVII: dois átomos de hidrogênio (H^+) e um de oxigênio (O^-), que originam a conhecida fórmula molecular H_2O . A despeito dos estudos e descobertas a seu respeito, a importância da água é cada vez maior para a humanidade.

Esta formação molecular, muito conhecida e aparentemente simples, confere à água propriedades físicas e químicas que a tornam o material mais importante para a sustentação da vida. No planeta Terra ela é também um dos materiais

de maior abundância na natureza e, por isso, dá a falsa sensação de um bem inesgotável. Talvez por esta razão sua preservação tenha sido negligenciada por tanto tempo.

É importante ressaltar que a parcela de água que circula pela atmosfera e na superfície continental, junto daquela encontrada na subsuperfície são oriundas da evaporação oceânica, cujo volume é estimado em mais de $47.10^{12}m^3$ por ano.

Os depósitos freáticos são de especial interesse para a produção vegetal, uma vez que sua profundidade está, quase sempre, ao alcance das raízes das plantas. Além disso, devido às ligações de hidrogênio que conferem à água elevada tensão superficial, ocorre o fenômeno da *capilaridade*, que permite sua ascensão pelos

“tubos” formados pela associação dos poros do solo, disponibilizando a umidade para as raízes.

Ao longo do tempo, à medida que tais depósitos vão recebendo aporte de água (pela chuva ou degelo), juntam-se ao escoamento superficial para formação dos rios e lagos, ou ainda, dando origem às nascentes e minas. Assim, pode-se considerar que o solo teria comportamento análogo a uma esponja, alimentando os cursos d’água nos intervalos das chuvas, principalmente durante os períodos de estiagem, comuns no centro, sul e sudeste brasileiro, durante o inverno e o outono.

A realidade é que toda água que existe no planeta atualmente (figura 2.10¹⁸) é toda água que já existiu, exceto uma parcela muito pequena expelida pelos vulcões, chamada de *água juvenil*. A produção de água artificialmente (juntando hidrogênio e oxigênio), apesar de possível, não é um processo viável na atualidade. Isto significa que a água utilizada para irrigar uma planta do nosso jardim poderia ser a mesma que um dinossauro bebeu num dia ensolarado da era Mesozoica, há milhões de anos.

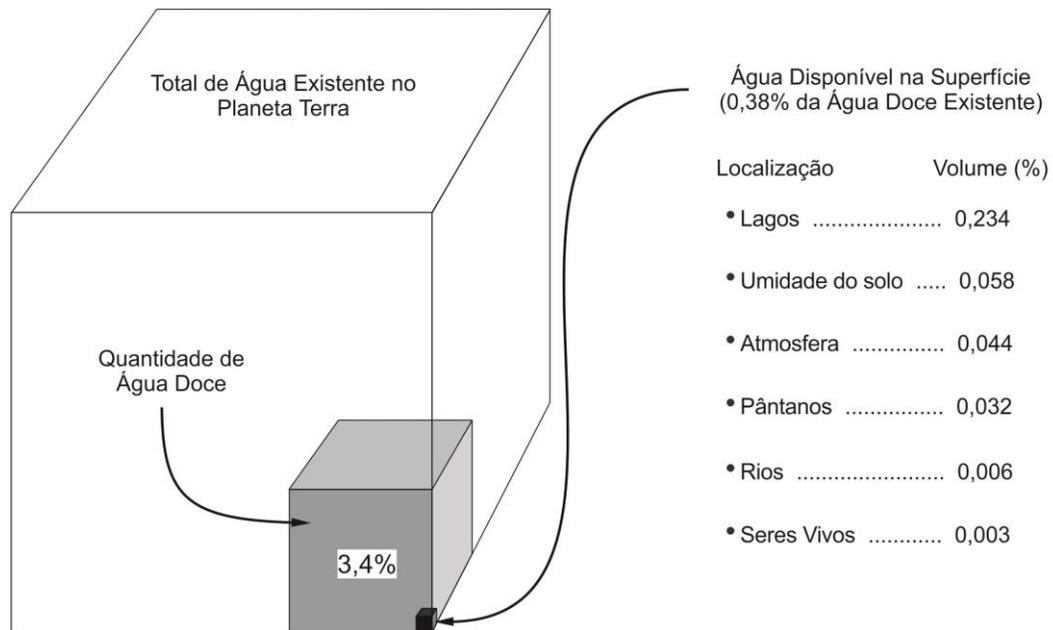


Figura 2.10 Distribuição percentual da água existente no planeta Terra. Adaptado de Barros (2009).

Restringindo a importância da água do solo à exploração agrícola, pecuária e florestal, o nível de interesse abrange vários aspectos. Grande volume é necessário para satisfazer as necessidades da evapotranspiração, que é resultado do processo metabólico vegetal, assim como pelo aumento da evaporação causada pela ação dos sistemas de manejo do solo. A presença de

umidade proporciona a dissolução dos sais que serão utilizados pelas plantas como nutrientes e condições para a vida dos demais organismos que processam a matéria orgânica. A presença da água líquida também regula o fluxo de ar e a temperatura do solo e, por fim, exerce o trabalho de carregar o solo solto, provocando erosão nos

¹⁸ Os cubos relativos a “água de superfície” e “água doce” apresentam dimensões dez vezes maiores que as reais.

campos e como consequência disso, assoreamento dos cursos d'água, lagos e reservatórios artificiais (represas e açudes).

2.4 Conclusão

Uma boa definição de solo poderia ser assim enunciada¹⁹:

Solo é uma coleção de corpos naturais, constituídos por partes sólidas, líquidas e gasosas, tridimensionais, dinâmicos, formados por materiais minerais e orgânicos e ocupa a maior parte do manto superficial das extensões continentais do planeta Terra, contendo matéria viva de todas as ordens, de forma extremamente variável e natural e, eventualmente, apresenta modificações decorrentes de interferências antrópicas.

A importância que deve ser dada ao solo é maior do que aquela relacionada com a produção agropecuária. Dentre os sistemas globais ele é parte integrante do clima, uma vez que interfere no ciclo hidrológico como elemento de ligação desencadeando efeito regulador. Por funcionar como um grande reservatório, fornece água para rios e lagos em períodos de estiagem e possibilita a captação e utilização pelo homem, no abastecimento doméstico e industrial, além do fornecimento natural para o desenvolvimento vegetal e a possibilidade de irrigação das culturas e pastagens.

Também deve-se considerar o seu papel no controle das emissões de gases de efeito estufa, como os óxidos de nitrogênio (NO_x), CO_2 e metano, quando da fixação (*sequestro*) desses compostos em sistemas agropastoris adequadamente conduzidos.

O processo de recirculação de nutrientes e toxinas é outro aspecto a ser destacado nas relações do solo com o planeta, pois é dele a responsabilidade de reciclar grande parte dos dejetos produzidos pela atividade humana e de fornecer nutrientes para o crescimento de inúmeras formas de vida (terrestres ou aquáticas).

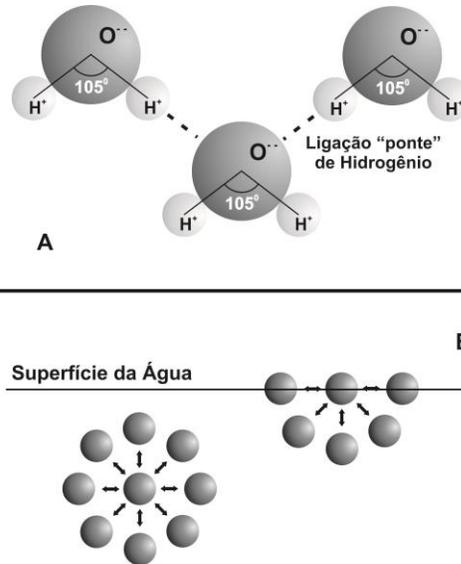


Figura 2.11. Moléculas de água associadas pela ação eletrostática das ligações de hidrogênio (A); consequências da tensão superficial elevada (B).

A alteração abrupta de condições equilibradas pode causar severos danos ao ambiente global, inviabilizando não somente o uso do solo (quer seja como meio de produção ou urbano), como também da água e em alguns casos da atmosfera. A erosão provocada por inoperância do sistema de uso (agropastoril ou urbano), por sua vez, configura-se numa das grandes preocupações da atualidade, sendo causa de degradação irreversível e seus danos irreparáveis, tanto no meio rural como urbano. Em consequência disso poderão resultar baixas produtividades, assoreamento dos leitos dos cursos d'água, inundações cada vez mais frequentes e torrentes de lama,

¹⁹ Adaptado de EMBRAPA (2006)

causando enormes prejuízos materiais, perdas de vidas humanas e catástrofes ambientais.

O solo, como meio para produção agropecuária e viveiro para os vegetais deverá ser capaz de fornecer condições não somente para a sobrevivência das plantas, mas também para que haja uma atividade econômica satisfatória de forma sustentável. Tais condições, no conceito moderno de fertilidade, estão basicamente relacionadas a seis fatores que são: água, nutrientes, ar, calor, sustentação mecânica e luz. Com exceção deste último, que pode ser limitado pelas condições topográficas ou geográficas, todos os outros são supridos pelas características físicas e químicas do meio. A ordem dos seis fatores citados, no entanto, não é importante. O que importa é a adequação de cada um deles para as exigências de cada planta cultivada. Verifica-se, pois, que a produtividade será limitada pelo fator que for oferecido em menor quantidade. Tal fato é conhecido por *princípio dos fatores limitativos* ou *lei do mínimo* cujas bases foram propostas pelos químicos alemães Carl Sprengel (1787-1859) e Justus von Liebig (1803-1873). Considera-se que o crescimento da planta e, por conseguinte, a produtividade de uma cultura está diretamente relacionada com o fator essencial mais limitante. Classicamente esta condição é representada pelo tonel que tem suas ripas serradas, como ilustrado na figura 2.12.

A ilustração 2.12 mostra que o aumento da produtividade somente será observado se houver fornecimento de nitrogênio ao meio e continuará aumentando até que outro fator (no caso, o fósforo) assuma a condição de limitante. O comportamento seria correspondente ao de colocar água dentro do recipiente. O nível mais alto atingido pelo líquido seria limitado pela ripa mais curta.

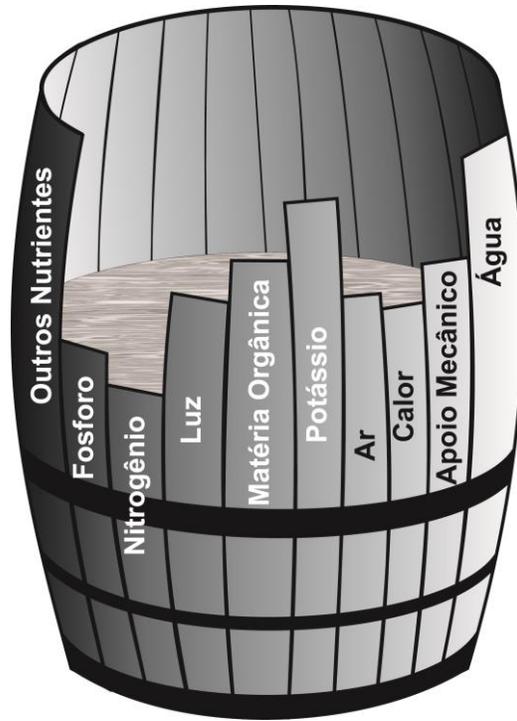


Figura 2.12. Considerando que a produtividade está limitada pelo fator mínimo, no caso representado na figura, ela não será superior àquela permitida pela quantidade de nitrogênio no solo, assim como o barril não suportará água acima do nível representado pela altura da ripa correspondente.

Com base nesta teoria (ou filosofia) fica claro que há necessidade de equilíbrio dos fatores de produção agrícola existentes no solo. Ao mobilizá-lo para realização de agricultura, revolvendo-o na aração e demais operações complementares, muitos dos fatores são afetados. Sendo assim, a mobilização do solo não é uma operação simples, pois trata-se de muito mais que um revolvimento para facilitar a operação de semeadura. Trata-se, pois, de uma ação muito complexa e devido à influência sobre os fatores limitativos à produtividade das plantas cultivadas e para efetuar este trabalho é necessário considerar um sem número de condições que serão alteradas tanto do ponto de vista químico

como aqueles de caráter físico que serão discutidos nos próximos capítulos.

Além disso, quando o solo é utilizado na produção agropecuária, costuma-se medir sua fertilidade pela quantidade de produto *útil*, isto é, aquele que interessa ao ser humano como objetivo da atividade. Se medida pela sua capacidade de produção de biomassa (o que é conhecido por *fertilidade global*), percebe-se que a fertilidade do solo pode ser muito superior à que é geralmente considerada. Acontece que grande parte

da matéria orgânica produzida é considerada *resíduo*, na maioria das vezes descartada, senão no campo, durante o processamento dos alimentos.

Tal fato significa que parte importante da produção do ecossistema agropecuário é composta por material tido como resíduo, cuja destinação, grande parte das vezes é problemática. Estes resíduos, compostos basicamente de matéria orgânica, deveriam, no entanto, receber maior atenção, uma vez que são integrantes do sistema e passíveis de representar retorno em fertilidade quando forem devidamente “reciclados” no processo produtivo.

BIBLIOGRAFIA CONSULTADA

- BALASTREIRE, L. A. **Máquinas agrícolas**. São Paulo: Manole, 1987. 307p.
- BARROS, J. G. C. **Origem, distribuição e preservação da água no planeta Terra**. Revista das Águas. Brasília: Ministério Público Federal, Ano 3, nº 9. 2009. Disponível em <http://revistadasaguas.pgr.mpf.gov.br/edicoes-da-revista/edicao-actual/materias/origem-distribuicao-e-preservacao-da-agua-no-planeta-terra>.
- BRADY, N. C. **Natureza e propriedade dos solos**. 9ed. Rio de Janeiro: F Bastos, 1989. 878p.
- CAPUTO, H.P. **Mecânica dos solos e suas aplicações**. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 1973. 456p.
- CASTRO, O. M. **Manejo e preparo do solo e erosão**. In: Aspectos de manejo dos solos. Campinas, Fundação Cargill, p.1-42. 1985.
- COSTA, L. M. **Aspectos de conservação do solo**. In: Aspectos de manejo dos solos. Campinas, Fundação Cargill, p.71-84. 1985.
- EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Sistema brasileiro de classificação de solo**. 2ed. Rio de Janeiro: EMBRAPA-SPI. 2006. 306p.
- ESPINDOLA, C. R. Solos do estado de São Paulo. In: DRUGOWICH, M. I. **Mecanização conservacionista**. Campinas: Coordenadoria de Assistência Técnica Integral, 1991. p.5-36.
- FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. **FAOSTAT**. 2010. Disponível em: <http://faostat.fao.org/site/422/DesktopDefault.aspx?PageID=422#ancor>. Acesso em 13 set. 2010.
- FREITAS, Z. J. **Esterqueiras para dejetos bovinos**. Niteroi: Programa Rio rural. 2008. 9p.
- LAMBE, T.W., WITMAN, R.V. **Soil mechanics**. New York: Wiley, 1969. 553p.
- LEPSCH, I. F. **O inventário de solos como base para o planejamento racional do uso da terra**. In: Aspectos de manejo dos solos. Campinas, Fundação Cargill, p.43-70. 1985.
- NICOLODI, M; GIANELLO, C; ANGHINONI, I. **Repensando o conceito de fertilidade do solo no sistema de plantio direto**. Revista Plantio Direto, edição 101, set./out. 2007. Aldeia Norte Editora Ltda., Passo Fundo, RS.
- NOGUEIRA, J. P. **Mecânica dos solos**. São Carlos: EESC/USP, 1988. 197p.
- TROEH, F.R., THOMPSON, L.M. **Solos e fertilidade do solo**. 6ª ed. São Paulo: Andrei, 2007. 718p.
- UNITED NATIONS EDUCATIONAL SCIENTIFIC AND CULTURAL ORGANIZATION. **Solo – a pele da terra**. UNESCO, Earth Sciences for Society Foundation, Leiden, 16p. 2007.
- WHITE, R. E. **Princípios e práticas da ciência do solo: o solo como um recurso natural**. 4ªed. São Paulo: Andrei, 2009. 426p.

CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DO SOLO

*Sendo o solo a pele da Terra,
conhecer suas reações quando da
alteração de seu estado natural
poderá evitar a necessidade do
imponderável: uma cirurgia
plástica.*

O solo, utilizado na produção agropecuária, foi durante muito tempo considerado como um meio de sustentação e depósito de nutrientes que permitiria o desenvolvimento dos vegetais. Com o advento da motomecanização das operações agrícolas a mobilização da camada de aradura tornou-se mais fácil e intensa. As mudanças físicas decorrentes destas ações atingiram escalas nunca antes experimentadas, seguidas de consequente e proporcional degradação ambiental. Para minimizar estes efeitos indesejados torna-se cada vez mais necessário desenvolver conhecimentos relativos aos fenômenos físicos que ocorrem no solo durante a mobilização, assim como daqueles derivados da interação do solo com as ferramentas e dispositivos de rodado que permitem o deslocamento das máquinas e a obtenção de tração na sua superfície.

Diferente do interesse da engenharia civil, cujo objetivo é conhecer fisicamente o solo para utilizá-lo como sustentação para suas obras de construção ou da mineração que o considera, na

maioria das vezes, um transtorno, atividades rurais de produção (agrícola, florestal e pecuária) necessitam de conhecimentos que permitam utilizá-lo como meio adequado para o desenvolvimento e frutificação das plantas cultivadas. Do ponto de vista da sua capacidade química de fornecer nutrientes tais conhecimentos encontram-se bastante avançados. No entanto, quando se trata do seu comportamento físico com relação aos procedimentos de mobilização, muito ainda tem que ser aprendido.

O aumento de área agrícola tratorizada e maior eficiência de mobilização quando comparada com as mesmas operações realizadas anteriormente de forma manual ou com o auxílio de potência animal, induziram nos profissionais do setor a ideia de que mobilizar o solo para instalação de culturas seria uma ação simples que poderia ser executada por qualquer pessoa. Assim, algumas das técnicas aprendidas com a observação, tentativas e erros durante milênios de experiência em cultivo foram abandonadas, esquecidas ou o

que é mais preocupante, negligenciadas por aqueles que têm a atribuição de produzir alimentos, fibras e demais produtos agrícolas de interesse comercial. O manejo inadequado do solo produz efeitos imediatos, no curto prazo, como a queda da produtividade e no longo prazo, efeitos degradativos com graves reflexos ambientais.

Uma das características físicas do solo que mais interferem na capacidade de sustentação de atividades agropecuárias ao ser mobilizado é sua textura. Associada à umidade, a textura pode determinar o sucesso ou o fracasso da ação humana neste sentido. Dentre os problemas mais importantes decorrentes da inobservância dos aspectos físicos do solo quando da aplicação de

técnicas de mecanização das atividades produtivas rurais pode-se citar erosão, compactação, consumo de energia, interferência no ciclo da água, além da possibilidade de danos e desgaste prematuro nos equipamentos agrícolas.

A textura dos solos é determinada pela sua composição granulométrica, que é extremamente variável em proporção de componentes. A classificação quanto a esta característica é realizada mediante o auxílio do *triângulo textural* mostrado na figura 3.1. Quando conhecidas as porcentagens de argila, areia e silte encontrados no material, o procedimento permite sua classificação em 13 diferentes categorias.

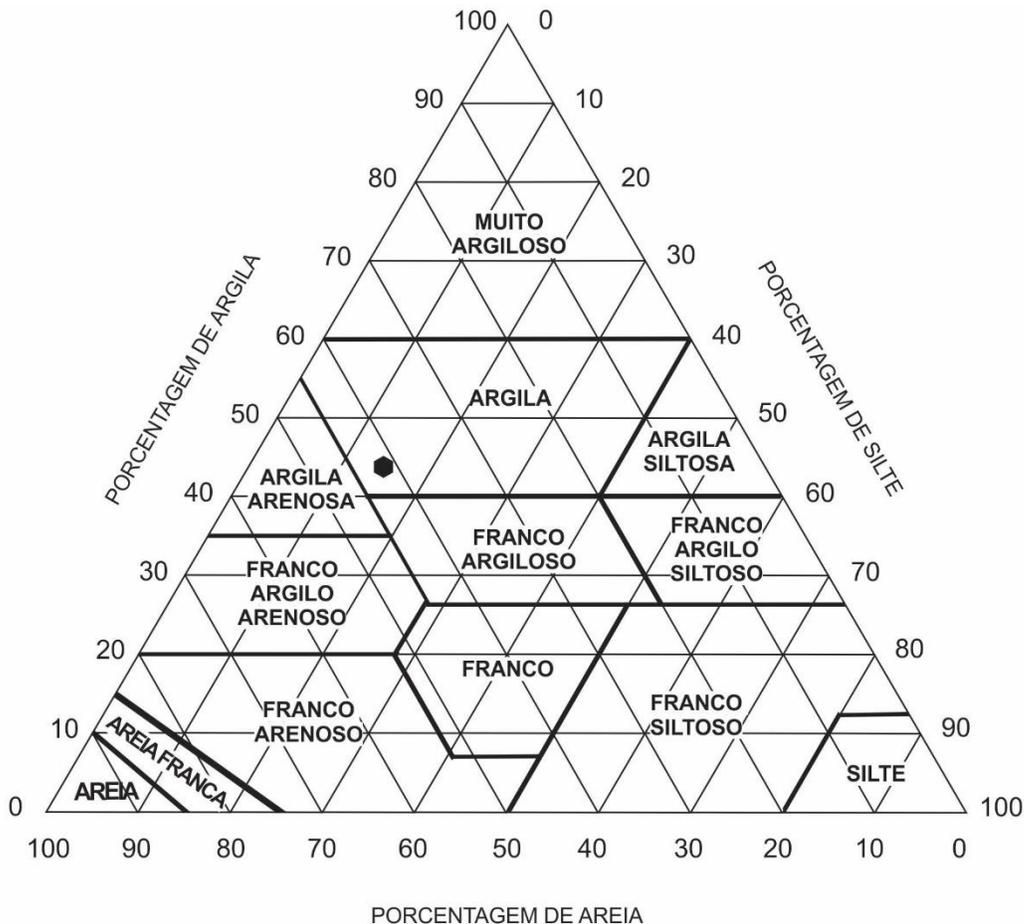


Figura 3.1. Triângulo textural utilizado para determinação da textura do solo, segundo Lemos & Santos (1996). A divisão dos solos argilosos em duas classes distintas não é considerada na classificação proposta pela USDA (2011), que somente faz referência a 12 tipos de solo.

Como exemplo da determinação da textura de um solo hipotético que possua quantidades de 43% de argila, 41% de areia e 16% de silte, encontra-se a posição onde está a marca hexagonal na figura 3.1. Ela representa o ponto de convergência das três linhas paralelas aos lados do triângulo, nas devidas proporções componentes. A classificação deste solo hipotético seria *argila* ou *argiloso*.

De forma mais prática (ou expedita) pode-se utilizar a sensibilidade das mãos e observando o comportamento do solo ao ser pressionado, estimar sua textura. Este procedimento está descrito pelo diagrama da figura 3.2.

As atividades relacionadas à engenharia que se ocupa dos solos como seu meio de trabalho necessita, no entanto, de informações mais detalhadas, sobre as características físicas dos solos, além de sua textura. Estas servirão de suporte para planejamento e projetos de toda ordem. Determinar tais características, em grande parte das vezes, não é uma atividade de execução simples e demanda habilidades técnicas importantes.

Para obter tais informações a mecânica do solo utiliza-se de técnicas que podem ser consideradas caminhos distintos. Um desses caminhos, que é de interesse da utilização do solo como meio de produção rural, seria o de realizar determinações sobre a composição física do material, assim como sondagens para conhecer o comportamento físico de interesse para as ações de engenharia e estabelecer correlações entre eles. A outra solução empregada seria o estudo de solos “sintéticos”, obtidos a partir de materiais cujo comportamento físico é previamente conhecido.

Há dificuldades em estabelecer correlações entre a composição do solo e seu comportamento físico e na grande maioria das vezes esta atividade resulta numa aproximação (às vezes

grosseira). Além disso, existem outras dificuldades. A variação (quanto à composição e textura) observada nos solos naturais, sedimentares ou residuais, pode ser enorme e ocorrer em locais cuja distância seria de poucos centímetros, o que tornaria a amostragem uma operação complicada e delicada. É possível, ainda, que interações físico-químicas verificadas entre os componentes ocorram em intensidade suficiente para tornar imprevisível o seu comportamento mecânico.

3.1 Índices físicos do solo

As considerações sobre as propriedades físicas do solo dizem respeito às relações ponderais e volumétricas observadas na sua estrutura. Como discutido no capítulo anterior, tais propriedades são determinadas, principalmente, pelas condições em que o solo foi formado e do material de onde se originou. A figura 3.3 mostra esquematicamente a composição física de um bloco hipotético de solo.

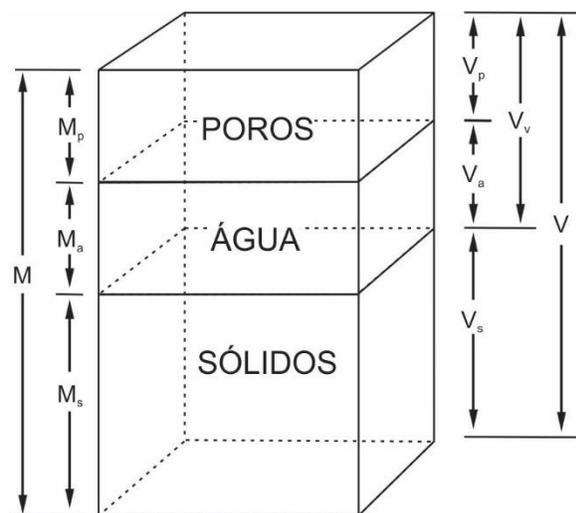


Figura 3.3. Esquema de um bloco de solo e suas respectivas proporções ponderais (M) e volumétricas (V).

Na *massa total* de solo (M) considerada, pode-se desprezar a *massa de gases* (Mp), existente nos poros que não estão ocupados pela água. Assim, para efeitos práticos:

$$M = Ma + Ms \quad (3.1)$$

em que:

Ma – massa de água;

Ms – massa dos sólidos²⁰.

Define-se *umidade* ou *teor de água* do solo (U) como a porcentagem de água encontrada num total considerado que pode ser com base em massa úmida (U_u) ou em massa seca (U_s). Assim:

$$U_u = \frac{Ma}{M} \quad (3.2)$$

$$U_s = \frac{Ma}{Ms} \quad (3.3)$$

O *volume total* (V) do bloco de solo considerado é composto pela relação:

$$V = Vs + Va + Vp \quad (3.4)$$

em que:

Vs – volume dos sólidos (incluindo os materiais minerais e orgânicos);

Va – volume de poros, ocupados pela solução do solo (água e sais minerais);

Vp – volume de poros não ocupados pela solução do solo, portanto ocupados pelos gases da atmosfera.

Evidentemente, os valores de Va e Vp são extremamente variáveis. Por isso, é comum

considerar a soma desses dois volumes como sendo o *volume de vazios* (Vv). Assim:

$$Vv = Va + Vp \quad (3.5)$$

A relação entre volume de vazios e o volume total define o conceito de *porosidade* (n), que é determinada pela equação 3.6.

$$n = \frac{Vv}{V} \quad (3.6)$$

A relação entre os volumes de poros e dos sólidos é chamada de *índice de porosidade*²¹ (e). Assim:

$$e = \frac{Vv}{Vs} \quad (3.7)$$

Combinando-se as equações 3.6 e 3.7, pode-se redefinir a porosidade (n) em função do seu índice (e).

$$n = \frac{e}{1 + e} \quad (3.8)$$

Sabendo que o conteúdo dos poros “vazios” varia em função da água disponível, é possível estabelecer uma relação chamada de *índice de saturação* (S), que indica o percentual do volume de poros ocupado pela solução do solo.

$$S = \frac{Va}{Vv} \quad (3.9)$$

A exemplo do que ocorre com a umidade do solo (e por causa dela), sua *massa específica*, também chamada de *densidade*²², pode ser medida com base em diferentes referências. Assim, as relações que descrevem a densidade *aparente seca* (Ds) e *aparente úmida – ou natural* (Du) e

²⁰ O apêndice 2 mostra o método de determinação da massa dos sólidos do solo.

²¹ Também chamado de *índice de vazios*.

²² A 20ª Conferência Geral de Pesos e Medidas (CGPM, 1995, Resolução 8) instituiu no Sistema Internacional de

Unidades a classe das unidades derivadas em substituição à classe unidades suplementares, anteriormente estabelecidas na Resolução 12 da 11ª CGPM (1960), dentre elas o peso.

a densidade real (D_r), que é uma relação exclusiva da fração sólida dos componentes do solo, são:

$$D_s = \frac{M_s}{V} \quad (3.10)$$

$$D_u = \frac{M_s + M_a}{V} = \frac{M}{V} \quad (3.11)$$

$$D_r = \frac{M_s}{V_s} \quad (3.12)$$

As densidades D_s e D_u podem ser relacionadas de acordo com a equação 3.13.

$$D_s = \frac{D_u}{1 + U_s} \quad (3.13)$$

Considerando o volume do solo (V) como valor unitário, o índice de porosidade (n) passa a ser um valor percentual de sua composição. Assim, pode-se escrever que:

$$V_s = 1 - n \quad (3.14)$$

Este fato implica em considerar, portanto, que:

$$D_s = (1 - n)D_r \quad (3.15)$$

$$n = 1 - \frac{D_s}{D_r} \quad (3.16)$$

As densidades reais (médias) para solos de diferentes texturas estão indicadas na tabela 3.1. Nota-se que, apesar da grande diferença entre elas, resultado da composição granulométrica, a variação entre o maior e o menor dos valores é inferior a 4%.

3.2 Estados de consistência do solo

A grande variação da umidade possível de ser obtida em alguns solos faz com que sua manipulação leve a um material que é conhecido

dos ceramistas como *argila*. Na Mecânica dos Solos a condição da argila dos ceramistas caracteriza um estado de consistência que recebe o nome de *estado plástico*. Tal consistência poderia ser descrita como a propriedade de um material em sofrer deformações repentinas sem que haja ruptura ou correspondente variação apreciável de volume.

Sabe-se que, nos solos com elevada porção de partículas pequenas (da classe das argilas - solos finos) este fenômeno é comum. Esta característica determina as condições de plasticidade e compressibilidade, que são regidas pela estrutura cristalina do material. É importante ressaltar que minerais como quartzo e feldspato não apresentam características de plasticidade, independentemente da quantidade de água presente e mesmo que as partículas sejam de diâmetro correspondente àquele que poderia colocá-las na categoria das argilas, de acordo com a descrição da tabela 3.2, ou seja, menores que 0,002mm. Por isso, cada composição argilo-mineral confere ao solo diferentes características físicas.

De qualquer forma, para que se manifestem os fenômenos da plasticidade e compressibilidade é necessário presença de água. Uma quantidade suficiente de água possibilita que as partículas de argila sejam lubrificadas e permite que elas deslizem umas sobre as outras, proporcionando o rearranjo do conjunto. Porém, a partir de um determinado limite, característico de cada solo, a quantidade de água presente altera o estado de consistência do material transformando-o num fluido viscoso. Por outro lado, quando a quantidade de água diminui, altera-se também a consistência, obtendo-se estágios de consistência mais sólidos.

Tabela 3.1. Densidades reais médias para diferentes texturas e intervalos para alguns índices físicos do solo. Adaptado de Cañavate (1989) e Bueno & Vilar (1984).

Textura	Densidade (g/cm ³)	Textura	Densidade (g/cm ³)
Areia e Areia Franca	2,65	Franco Siltoso	2,71
Franco Arenoso	2,66	Argilo Arenoso	2,70
Franco e Silte	2,67	Argiloso	2,72
Franco Argilo Arenoso	2,68	Argilo Siltoso	2,75
Franco Argilo Siltoso	2,68		
Limites (gerais) de Variação dos Índices Físicos	1,0 < Du < 2,5	0 < n < 100%	
	2,5 < Dr < 3,0	0 < S < 100%	
	0 < e < 20	0 < Uu < 1500%	

Então, com a variação da massa de água presente nos poros do solo ou de sua relação em função da massa total, pode-se experimentar variados estados de consistência, cuja classificação poderia ser assim descrita:

a) Estado líquido – não há resistência ao cisalhamento e as propriedades do solo, assim como sua aparência são de uma suspensão. Diz-se que, nestas condições o solo não apresenta forma própria;

b) Estado plástico – o solo admite deformações permanentes, sem apresentar fissuramento, ruptura ou variação sensível de volume, os quais podem ser associados às propriedades da plasticidade, conforme definido na mecânica;

c) Estado semissólido – o solo apresenta aparência de um sólido e possui propriedades que facilitam sua fragmentação mediante aplicação de

forças relativamente baixas. A quantidade de água presente é insuficiente para que se formem películas contínuas entre suas partículas, dificultando a lubrificação e, portanto, o comportamento plástico. Nesta fase o solo ainda apresenta variação de volume com a redução da umidade. É o estágio mais adequado para as operações de mobilização com objetivos agrônômicos;

d) Estado sólido – o solo apresenta elevada resistência mecânica (descrita como dureza) resultado da união conferida às suas partículas em função da pequena quantidade de água presente. Não se observa variação de volume pelo processo de secagem.

Na prática, estes quatro estados físicos do solo variam sequencialmente com a umidade e podem ser representados de acordo com um padrão generalizado pelo diagrama da figura 3.4.

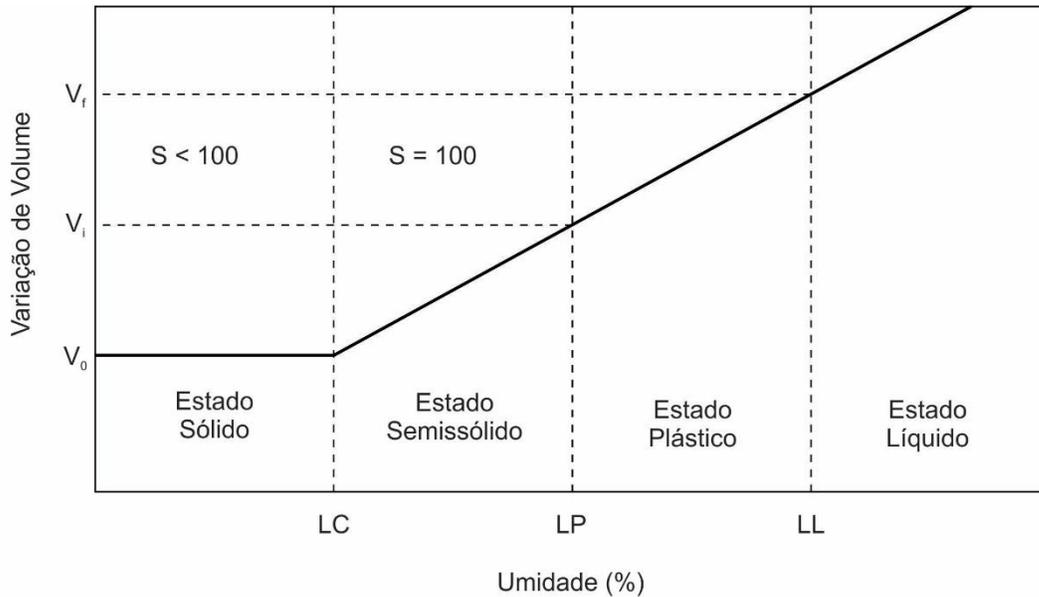


Figura 3.4. Estados de consistência do solo em função de sua umidade. LC – limite de contração; LP – limite de plasticidade; LL – limite de liquidez.

3.2.1 Limite de liquidez

Esta é a fronteira entre o estado líquido e o plástico para os solos. Representada na figura 3.4 pela linha balizada pela sigla *LL*, tem seus parâmetros de obtenção padronizados pelos estudos de *Casagrande*²³. A figura 3.5 mostra um esquema do aparelho de Casagrande, utilizado nos ensaios padronizados para determinação de limites de liquidez. Tal ensaio consiste em colocar na cuba do aparelho uma quantidade de solo (que passou na peneira 40) umedecido, com consistência pastosa e imprimir na sua superfície um sulco, com o auxílio de um cinzel. Em seguida gira-se a manivela numa frequência tão próxima quanto possível de 2Hz. Este ato permite que a cuba seja sequencialmente elevada e caia, chocando-se contra a base do aparelho.

Registra-se o número de choques necessários para fazer com que, com o escorregamento

dos taludes do sulco, a ranhura se feche em sua base numa extensão de 10mm. Encerra-se o procedimento, colhe-se amostra do solo (preferencialmente nos dois lados da amostra, na região onde ocorreu o fechamento da ranhura) e determina-se sua umidade. Desta forma serão obtidos os pares de dados (umidade x número de golpes) que alimentarão o *gráfico de fluência* (figura 3.6). O procedimento é repetido para variadas condições de umidade.

Os valores obtidos são dispostos num gráfico semilogarítmico contendo a umidade na ordenada e na abcissa, os números de golpes da cuba sobre a base do aparelho. Determina-se, então, o valor de umidade correspondente a 25 golpes, que será considerado o limite de liquidez do solo. A figura 3.6 ilustra um evento simulado do procedimento descrito. Neste caso, o limite de liquidez corresponde à umidade de 33,4%.

²³ **Arthur Casagrande** (Austrália, 1902–1981): engenheiro civil fundador da Sociedade Internacional de Mecânica do

Solo e Engenharia Geotécnica (ISSMGE) e criador do aparelho de Casagrande (Geotechnical Engineers, 2015).

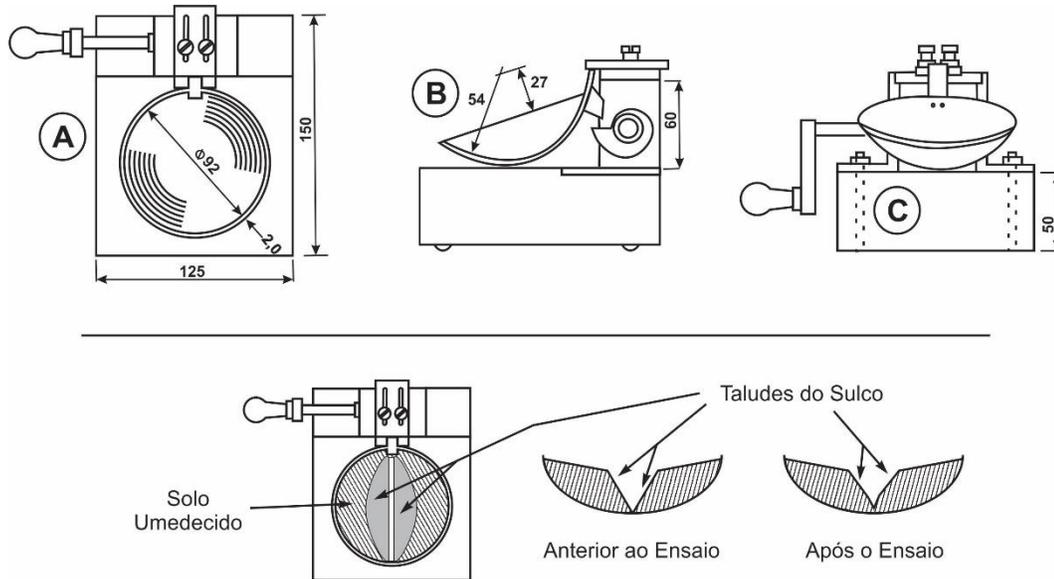


Figura 3.5. Superior: aparelho de Casagrande, utilizado na determinação do limite de liquidez e suas proporções em milímetros - vista superior (A), lateral (B) e frontal (C). Inferior: Cuba com solo umedecido – vista superior do aparelho e da cuba em corte, antes e após o ensaio.

3.2.2 Limite de plasticidade

Trata-se da umidade na qual o solo deixa o estado plástico e torna-se semissólido. Na figura 3.4 esta condição é representada pela linha identificada pela sigla *LP*. Pode-se dizer que tal situação de consistência possui uma umidade tal que a água existente no solo não mais apresenta propriedade de *água livre*. Neste estado a coesão das partículas é pequena, mas tem intensidade suficiente para manter a forma adquirida depois do evento causador da deformação do material.

O limite de plasticidade é determinado pela ação de enrolar, com a palma da mão, por uma superfície de vidro esmerilhado ou jateado,

uma quantidade de solo umedecida, buscando a formação de cilindros com diâmetro de 3mm, como representado na figura 3.7. Ao conseguir o cilindro de solo, recolhe-se o material e agrega-se novamente na palma da mão, formando um elipsoide. Em seguida procede-se novamente o ato de enrolar até chegar ao cilindro de 3mm. A operação deve ser repetida quantas vezes forem necessárias, até que não seja mais possível formar os cilindros, devido à perda de umidade por manipulação. Nesta condição, percebe-se que o solo começa a apresentar fissuras ou tendência de fragmentação, antes de atingir a espessura desejada para o cilindro. Recolhe-se, então, o solo manipulado e determina-se sua umidade, que será correspondente ao limite de plasticidade.

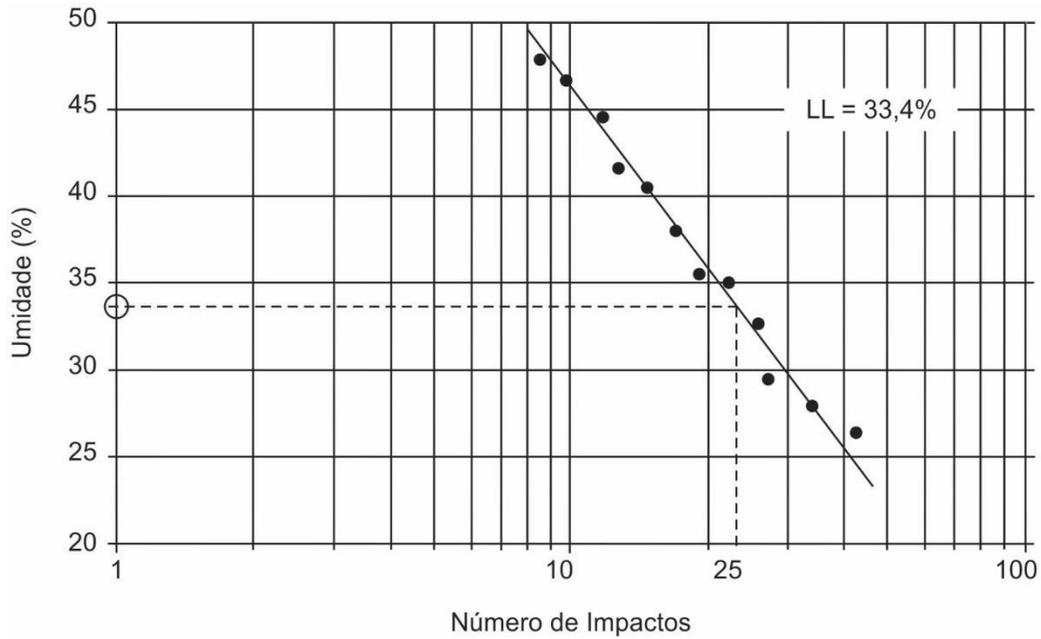


Figura 3.6. Exemplo ilustrativo da obtenção do limite de liquidez do solo através da plotagem dos valores obtidos no ensaio.

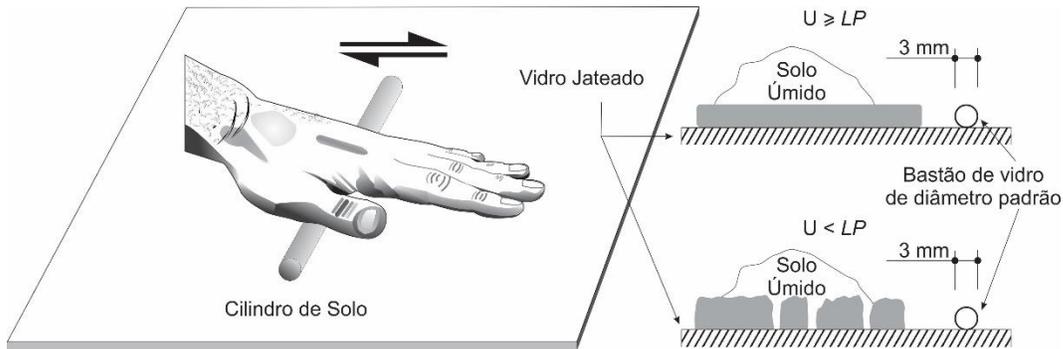


Figura 3.7. Determinação do Limite de Plasticidade: o solo umedecido é rolado entre a palma da mão numa superfície de vidro jateado, repetidas vezes, até que se torne impossível obter um cilindro uniforme com espessura de três milímetros, como representado à direita (inferior). Nesta condição o solo começa a se fraturar e a partir de então se determina sua umidade, que será considerada como aquela que indica seu limite de plasticidade.

Ao iniciar o procedimento para produzir os cilindros, é possível que o solo apresente umidade muito elevada o que tornará difícil a sua manipulação e, portanto, será necessário adicionar solo seco para diminuir a umidade. Se, por outro lado o solo estiver excessivamente seco,

serão produzidos cilindros de diâmetro maior que o padronizado ou nem sequer será possível produzi-los. Neste caso, deve-se acrescentar água ao solo. O processo deverá ser repetido até que os valores de umidade apresentem desvio máximo de 5% em relação à média.

3.2.3 Limite de contração

Quando uma amostra de solo apresenta umidade próxima do limite de liquidez e a água presente começa a evaporar, observa-se redução gradual no volume da amostra. Este comportamento prossegue até que se atinja um limite, a partir do qual o volume não mais será reduzido, embora ainda haja umidade. Esta é a condição de consistência denominada de *limite de contração*, identificada pela linha com a sigla *LC* na figura 3.4. Neste ponto, ocorre a migração do estado semissólido para o estado sólido. A figura 3.8 representa a evolução dessa migração, da esquerda para a direita. Com base nos indicadores de referência da figura 3.8, o limite de contração será correspondente à umidade do solo na condição (B), portanto:

$$LC = \frac{Ma}{Ms} \quad (3.17)$$

A dificuldade, neste caso, será a determinação da massa de água (Ma) que está contida na amostra de solo utilizada no ensaio, no momento em que se inicia a transição do estado semissólido (B) para o sólido (C).

No entanto, quando a massa específica ou densidade real (Dr) do solo é conhecida, pode-se determinar a massa de água pela relação:

$$Ma = \left(V_f - \frac{Ms}{Dr} \right) \cdot \gamma_a \quad (3.18)$$

em que:

γ_a – massa específica da água.

Substituindo a equação 3.18 em 3.17, o limite de contração será:

$$LC = \gamma_a \cdot \left(\frac{V_f}{Ms} - \frac{1}{Dr} \right) \quad (3.19)$$

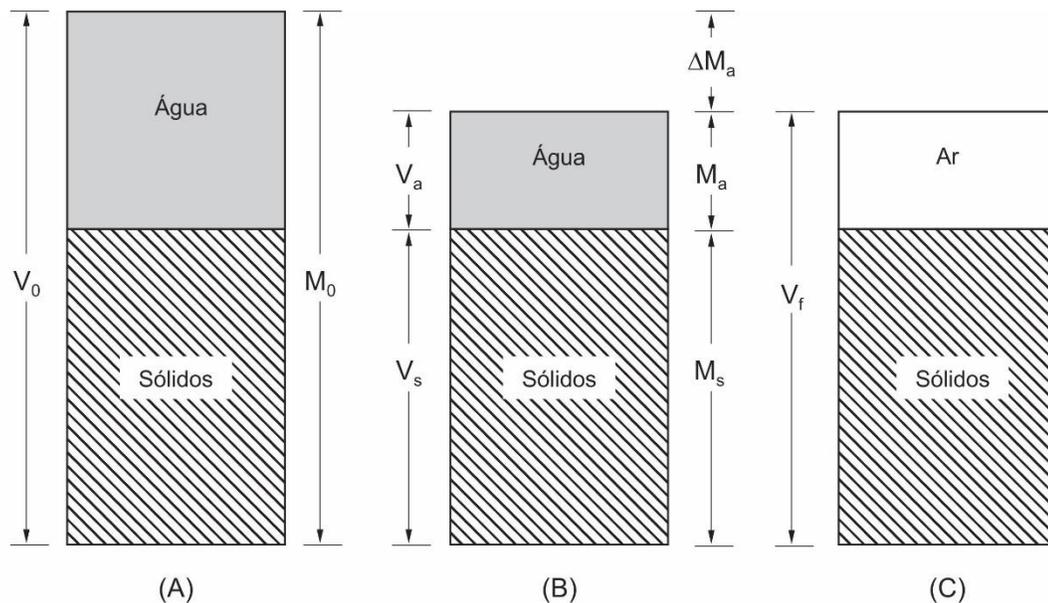


Figura 3.8. Representação esquemática da evolução das variações de volume e conteúdo de água numa amostra de solo durante o ensaio para determinação do limite de contração.

No caso de não se conhecer a densidade real do solo o procedimento para determinação do limite de contração torna necessário determinar o volume de água evaporado do corpo de prova (ΔMa) entre os estágios (A) e (B) da figura 3.8. Para tanto, uma amostra de solo úmido²⁴ é colocada num recipiente metálico de volume conhecido. Em seguida procura-se expulsar o ar contido na amostra, batendo o recipiente numa superfície rígida, com energia moderada, por diversas vezes. Toma-se sua massa e deixa-se em descanso para secar, à sombra. A seguir leva-se à estufa para secagem até que se obtenha massa constante. Como mostra o esquema da figura 3.9 (c), forma-se uma “pastilha” de solo, chamada de *corpo de prova*, que devido à perda de água, apresentará volume menor que o total do recipiente metálico (b).

O volume (representado por V_f na figura 3.8) do corpo de prova será obtido mergulhando-o num recipiente totalmente cheio com mercúrio, conforme esquematizado na figura 3.9 (d). O deslocamento do mercúrio pelo volume do corpo de prova (V_f) provocará derramamento. A massa de mercúrio transbordante permite o cálculo do volume do corpo de prova, utilizando-se a equação:

$$V_f = \frac{M_{Hg}}{13,6} \quad (3.20)$$

em que:

M_{Hg} – massa do mercúrio deslocado pelo volume do corpo de prova;

13,6 – massa específica do mercúrio.

Sendo o limite de contração a condição de umidade em que o solo continua a perder água, sem variação de volume e a massa do corpo de

prova equivalente à massa dos sólidos (M_s), a variação da massa de água (ΔMa) entre os estágios considerados será:

$$\Delta M_a = (V_0 - V_f) \cdot \gamma_a \quad (3.21)$$

A umidade inicial (U_0) relativa ao corpo de prova na condição (A) da figura 3.8 é:

$$U_0 = \frac{M_0 - M_s}{M_s} \quad (3.22)$$

Demonstra-se, portanto que, para esta forma de determinação, que o limite de contração é:

$$LC = U_0 - \frac{\Delta M_a}{M_s} \quad (3.23)$$

Embora o parâmetro *limite de contração* dos solos seja amplamente discutido por diversos autores, sua importância tem sido negligenciada na atualidade, uma vez que seus resultados são carregados de *elevada incerteza*. Credita-se tal condição de incerteza ao fato de que as magnitudes da contração estão ligadas não somente ao tamanho das partículas, como também à estrutura inicial do solo.

3.2.4 Índices de consistência

O termo *índice de consistência* é empregado na mecânica dos solos para designação das relações entre os estados de consistência. Dentre eles, o mais interessante para aplicações na agricultura é o *índice de plasticidade (IP)*, cuja

²⁴ Alguns autores recomendam umidade próxima (porém abaixo) do limite de liquidez. Outros, no entanto, recomendam umidade pouco superior ao limite de

plasticidade. Ressalte-se que umidades menores dificultam a expulsão de ar das amostras.

definição é dada como a diferença entre o limite de liquidez e o limite de plasticidade.

$$IP = LL - LP \quad (3.24)$$

O significado físico do índice de plasticidade é uma tentativa de representar a quantidade de água que seria necessária para que o solo passe

do estado plástico para o estado líquido. Ou seja, quanto maior o valor do índice de plasticidade, tanto mais plástico é o solo, o que significa que ele terá maior capacidade de armazenar água e estará sujeito a deformações causadas pelas cargas impostas por dispositivos de mobilização e de rodado numa faixa maior de umidade, se comparado com outros solos.

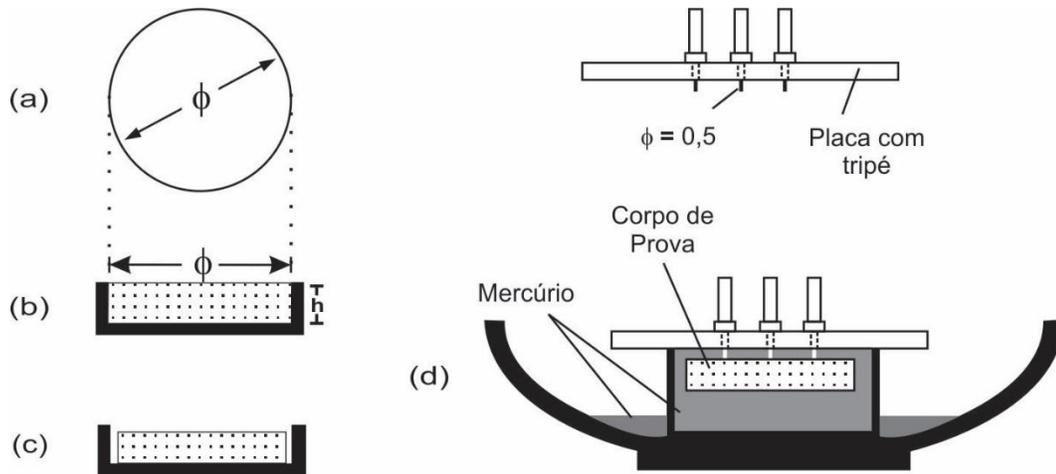


Figura 3.9. Fases da determinação laboratorial do limite de contração dos solos: vista superior (a) e lateral do recipiente metálico utilizado para produzir o corpo de prova (pastilha de solo) – com o material úmido (b) e depois de seco (c); imersão do corpo de prova em mercúrio para determinação de seu volume (d).

Os fatores que mais influenciam no índice de plasticidade de um dado solo são o tipo de argila presente, a proporção e o tamanho das suas partículas e o conteúdo de matéria orgânica.

O tipo de argila, no que se refere à estrutura molecular, determina a sua capacidade de estabelecer uniões com as moléculas de água, o que se reflete na capacidade de retenção de água. Da mesma forma, quanto maior é a proporção de argila, maior será a superfície de absorção e o índice de microporos significando, portanto, maior necessidade de água para provocar a transição do estado plástico para o estado líquido. Raciocínio equivalente pode-se efetuar em relação ao tamanho

das partículas e a sua capacidade de retenção de água. Com relação ao conteúdo de matéria orgânica, sua presença também concorre para a elevação da capacidade do solo na retenção de água, se bem que em proporções muito inferiores às observadas pela influência das argilas.

3.3 Forças que atuam no solo

Quando dois corpos sólidos estão em contato, como representado na figura 3.10 e sobre o corpo que está apoiado no plano atua uma força normal N e outra tangencial T , observa-se o fenômeno do *atrito*. No caso em que a força normal permanece constante (o peso próprio do

corpo, por exemplo), a tangencial poderia crescer até o momento em que se obtenha iminência de deslocamento do corpo em que atua. Dá-se o nome de *obliquidade* ao ângulo α , formado pela resultante entre as duas forças atuantes, N e T . O deslocamento (ou sua iminência) se dará quando a força tangencial (T_{max}) iguala-se à força de atrito F_a .

Na iminência de deslocamento, o ângulo α adquire um valor igual ao que se convencionou chamar de *ângulo de atrito*, que é usualmente representado pela letra grega ϕ . Nestas condições, $tg\phi$ recebe a designação especial de *coeficiente de atrito* sendo usualmente representado pela letra grega μ . Assim, pode-se dizer que:

$$\alpha_{max} = \phi \quad (3.25)$$

$$F_a = T_{max} = N \cdot tg\phi \quad (3.26)$$

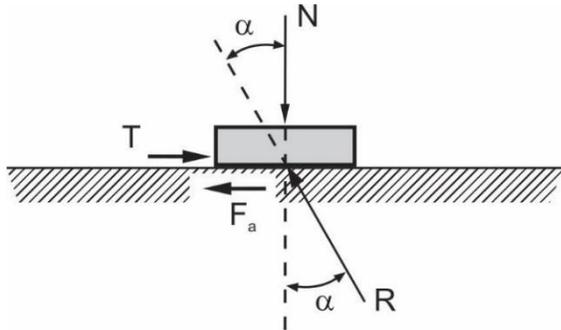


Figura 3.10. Representação esquemática do atrito entre corpos sólidos.

A relação entre as forças tangencial T e normal N , associadas à área de contato (A) do corpo com o plano de apoio definem as grandezas *tensão de cisalhamento* (τ) e *tensão normal* (σ), de acordo com as equações 3.27 e 3.28.

$$\tau = \frac{T}{A} \quad (3.27)$$

$$\sigma = \frac{N}{A} \quad (3.28)$$

Portanto, para o caso da iminência de movimento, as relações trigonométricas da figura 3.10 permitem concluir que:

$$\tau = \sigma \cdot tg\phi \quad (3.29)$$

Tais relações são, resumidamente, o que se conhece por *lei de Coulomb*²⁵ e seu estabelecimento resultou de observações empíricas.

3.3.1 Cargas normais em partículas de solo

O solo é um material granular, composto por diversos tipos de partículas das mais diferentes origens. Além disso, água e gases ocupam os poros (macro e micro) existentes no material. A dimensão destas partículas varia entre fragmentos de rocha (algumas vezes de tamanho consideravelmente grande) até partículas microscópicas. Neste contexto é importante compreender o que ocorre quando o fenômeno de interação entre partículas acontece em escala microscópica, pois é neste cenário que ocorrem fenômenos importantes para o comportamento físico do solo.

De forma altamente esquemática, a figura 3.11 representa as forças que atuam entre partículas microscópicas e adjacentes. Seriam elas:

F_m – força de contato mineral-mineral;

F_a – força de contato ar-mineral ou ar-ar;

²⁵ **Charles Augustin Coulomb** (1736-1806) – físico francês. Em 1781 apresentou à Academia Francesa de Ciências o estudo *Théorie des Machines Simples*, confirmando as leis de Da Vinci-Amontons sobre o atrito, enunciando o que hoje se conhece como a quarta lei do atrito: *a força de atrito é independente da velocidade, uma vez iniciado o*

movimento. As três primeiras seriam: o atrito provocado pelo mesmo peso terá a mesma resistência no início do movimento, embora as áreas ou comprimento de contato sejam diferentes; o atrito provoca o dobro do esforço se o peso for dobrado; o atrito depende da natureza dos materiais em contato (BASSALO, 2011).

F_w – força de contato entre água-mineral ou água-água;

R' – repulsão elétrica entre as partículas;

A' – atração elétrica entre as partículas.

σ_{dd} – carregamento superficial.

As forças elétricas (R' e A') atuam em função das superfícies das partículas existentes no solo.

Conforme descrito na tabela 2.2, no capítulo 2, as areias possuem partículas cujas dimensões são da ordem de 10^{-3} m (grossa) a 10^{-4} m (fina), enquanto que as argilas são da ordem de 10^{-6} m ou menores. A tabela 3.2 avalia a área superficial coberta por partículas de diferentes dimensões, considerando um aglutinado que possui 10^{-9} m³ de volume. Verifica-se que, quanto menor o tamanho da partícula, maior é a área total. Assim, quando a composição granulométrica do solo apresenta grande quantidade de argila, as forças de origem elétrica passam a representar valores importantes no que se refere ao seu comportamento dinâmico. O termo coloide é utilizado para descrever tal situação, ou seja, quando forças elétricas de atração e repulsão tornam-se tão importantes quanto aquelas relacionadas à massa das partículas (gravitacionais).

A importância das forças elétricas, no entanto, é restrita e o fenômeno da adsorção sugere que, em alguns casos, devido à composição granulométrica e mineralógica dos solos, o contato entre as partículas não ocorre na fase sólida, isto é, não há contato mineral-mineral, sendo que os esforços, nestes casos, seriam transmitidos pela película de água.

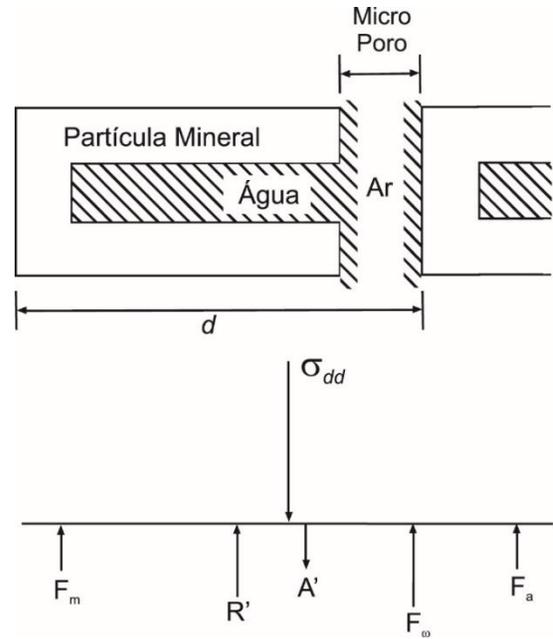


Figura 3.11. Forças que atuam nas partículas do solo em função da sua composição e do carregamento superficial – σ_{dd} . Adaptado de Lambe & Whitman (1979).

3.3.2 Atrito

A figura 3.11 ilustra a situação que investiga o fenômeno do atrito em corpos extensos. Para compreender a mesma situação no material granular dos solos, Terzaghi²⁶ desenvolveu a chamada *teoria adesiva do atrito*, que considera a real área de contato entre dois corpos extensos como sendo uma pequena parcela da superfície visível (ou considerada) dado que, no nível microscópico, as superfícies são rugosas, repletas de saliências e reentrâncias, como ilustra a figura 3.12(d). Segundo a teoria, partículas maiores (como a areia) possuem protuberâncias cuja irregularidade superficial é muito menor do que seu diâmetro e o contato é, na realidade, formado por inúmeros e microscópicos contatos. Para partículas de menores dimensões (como na

²⁶ **Karl von Terzaghi** (1883-1963): engenheiro civil austríaco, considerado o “pai da mecânica dos solos”, dedicou sua carreira para resolver problemas relacionados com fundações civis e engenharia de solos. Publicou *Erdbaumechanik*

(que pode ser traduzida como Mecânica de Solos), no início dos anos 20 do século XX. A obra é considerada o ponto de partida para a nova modalidade de ciência da engenharia (Geotechnical Engineers, 2015).

argila) e superficialmente mais uniformes, é improvável que haja contato direto face a face, devido às forças de superfície, ficando o atrito restrito a contatos através das películas de água adsorvida e de eventuais vértices existentes.

Tabela 3.2. Relação entre a área superficial existente em partículas (de forma cúbica) de tamanhos diferentes ocupando o mesmo volume ($10^{-9}m^3$).

Tipo de Material	Ordem de Grandeza (m)	Número de Partículas	Área Superficial (m^2)
Areia Grossa	10^{-3}	1	6×10^{-6}
Areia Fina	10^{-4}	10^3	6×10^{-5}
Argila	10^{-6}	10^9	6×10^{-3}

Sendo a placa representada na figura 3.10 um bloco de solo cuja área de contato aparente é A , as considerações das equações 3.25 a 3.29 explicariam o fenômeno macroscópico, desde que as superfícies em contato fossem perfeitamente lisas. No entanto, no nível microscópico a área real de contato entre as partículas seriam significativamente menores devido às imperfeições das superfícies, resultando tensões transmitidas proporcionalmente maiores, a ponto de provocar plastificação do material nos pontos de contato.

Como já discutido, a presença de água adsorvida sugere que, em muitos casos, não ocorre contato direto mineral-mineral, sendo os esforços transmitidos, portanto, pela película de água. Um exemplo dessa situação é representado na figura 3.13(a), onde se observa que placas de argila montmorilonítica sódica úmida, de mesmas dimensões, são submetidas a uma força

normal de $40,53N$ atuando numa área de contato de $4.10^{-4}m^2$, resultando numa pressão de $101,3 Mpa$ (equivalente a 1 atmosfera - *atm*). Nestas condições as placas estariam espaçadas entre si de 115Å , indicando a possibilidade de distribuição de esforços sem que haja contato direto entre os minerais, uma vez que a tensão necessária para expulsar a água adsorvida neste material seria de aproximadamente $5.420atm$. O gráfico registra o comportamento relativo ao distanciamento das placas, à medida que a tensão aumenta.

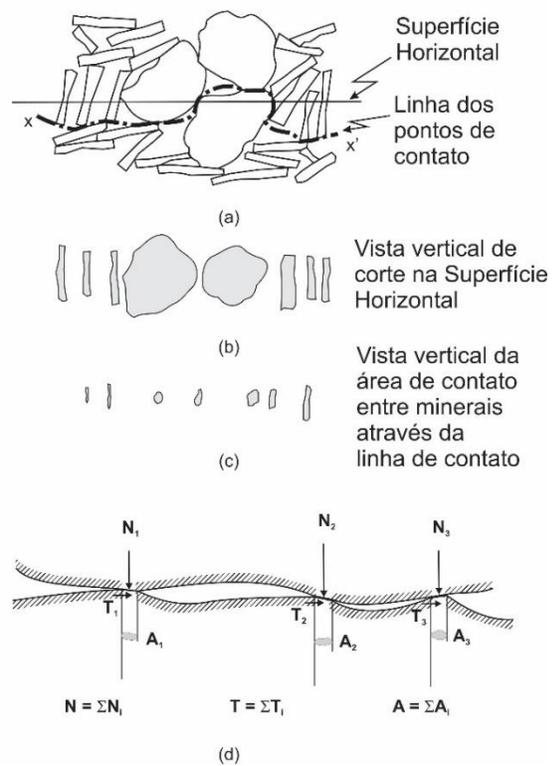
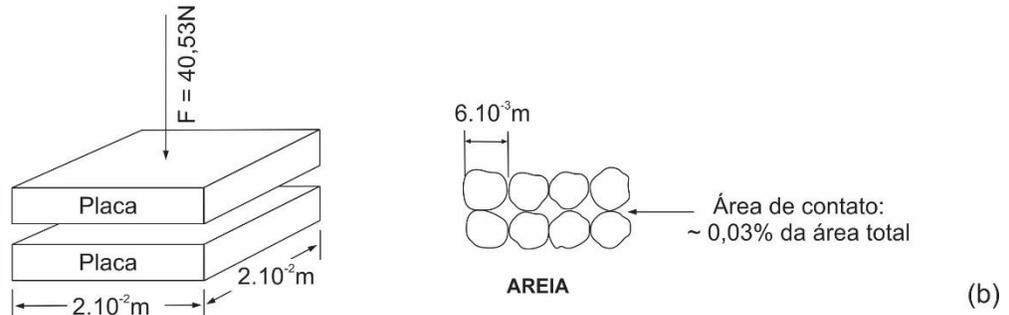
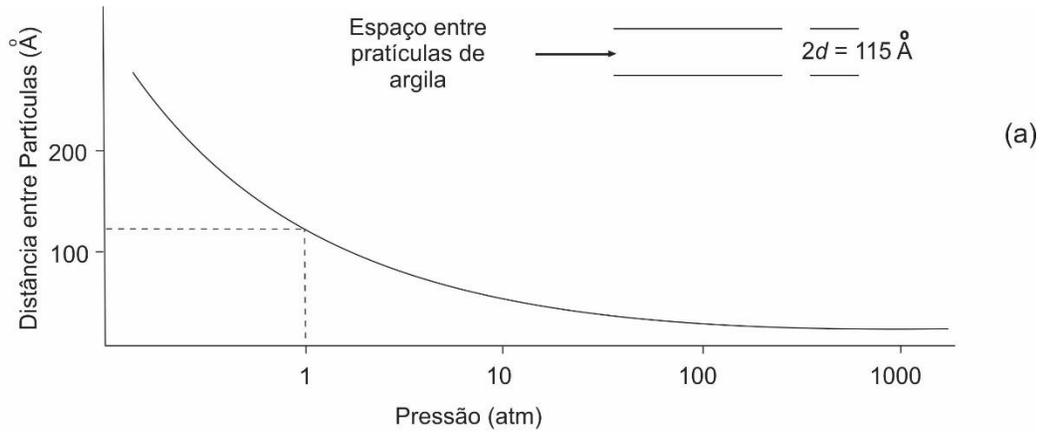


Figura 3.12. Representação da vista microscópica das áreas de contato e das forças resistentes que ocorrem entre as partículas do solo. Adaptado de Mitchell (1993) e Lambe & Whitman (1979).

A figura 3.13(b) retrata a situação em que as placas de argila são substituídas por partículas de areia equidimensionais, com diâmetro aproximado de $6.10^{-4}m$, conservando a mesma área de contato aparente ($4.10^{-4}m^2$). Medições realizadas para este caso mostram que a área real de

contato é de somente 0,03% da área de contato aparente. Nestas condições a tensão transmitida seria maior que 3.333atm, suficiente para expulsar a película de água adsorvida pela areia, proporcionando contato entre os minerais presentes.

Evidentemente que estas são situações limites e na realidade o solo é uma mistura de partículas de composição química variada, assim como dimensões e formas diversas o que resulta em distribuição de tensões que representam estados intermediários entre os estudados.



$$\sigma = \frac{F}{A} = \frac{40,53\text{N}}{4 \cdot 10^{-4}\text{m}^2} = 101.325\text{Pa} = 1\text{atm}$$

$$\sigma_{\text{areia}} = \frac{F}{A} = \frac{40,53\text{N}}{1,2 \cdot 10^{-7}\text{m}^2} = 337,75\text{MPa} \quad \text{ou} \quad 3.333,3\text{atm}$$

Figura 3.13. Transmissão de tensões entre partículas do solo. Adaptado de Lambe & Whitman (1979).

3.3.3 Coesão

O fenômeno denominado *coesão* ocorre em função da capacidade de adsorção de água pelas partículas de solo, conferindo-lhe propriedades coloidais e sua importância é muito grande no caso de partículas de dimensões reduzidas sendo, portanto, característica dos solos de textura fina.

Verifica-se que a coesão existe independente de quaisquer tensões aplicadas no solo e persiste, mesmo quando todas as tensões pré-existentes forem retiradas. Os solos ditos *coesos* possuem a propriedade de manter suas partículas agregadas na forma de torrões ou blocos, podendo ser “cortados” em novos blocos, os quais mantêm suas formas.

Dentre as várias as teorias utilizadas para explicar o comportamento coesivo dos solos finos destacam-se as da cimentação, a atração molecular-coloidal e a da pressão capilar. A cimentação seria provocada pela presença de substâncias *cimentantes* (carbonatos, silicatos, óxido de ferro, matéria orgânica e outras), de ocorrência natural. Estas são partículas extremamente pequenas que exercem função equivalente à do cimento Portland na constituição dos concretos utilizados na construção civil. Nos solos arenosos (com partículas são maiores) é possível que material argiloso funcione como substância cimentante, conferindo a eles uma maior resistência.

As forças internas resultantes das variáveis solo-água-ar-eletrólitos (onde se destacam as de atração e repulsão), são também muito importantes, pois são formadas mediante ação da água adsorvida que envolve as partículas (figuras 3.11 e 3.14). A camada de água adsorvida está sujeita a imensas pressões, aproximando-se do estado sólido²⁷, contribuindo para a união das partículas – daí a denominação de *coesão verdadeira*. Embora sua ação seja pequena, não é desprezível e depende da existência de adequado espaço entre os grãos para que as partículas de argila possam se acomodar, da natureza mineralógica desta argila e evidentemente, dos íons presentes os quais determinam as cargas elétricas que agirão no meio.

Ainda interfere decisivamente na coesão do solo, o efeito da pressão capilar na água intersticial, conforme representado esquematicamente na figura 3.15. Tal fenômeno é chamado de *coesão aparente* e ocorre devido aos meniscos capilares formados quando os grãos de solo tendem a se movimentar relativamente entre si e

são pressionados contra o filme d'água que os envolve, no ponto de contato. Exemplo deste efeito ocorre quando se tenta separar duas placas de vidro colocadas uma sobre a outra, existindo entre elas um filme líquido. Quanto menor a distância entre as placas (e, por conseguinte menos espesso o filme líquido) mais forte é a ação da força que as une. Analogamente, nos solos argilosos (de textura fina), o espaço entre as partículas é pequeno e o filme d'água é infinitamente estreito. Nestes casos, associado à pressão capilar, o fenômeno da coesão aparente torna-se particularmente importante.

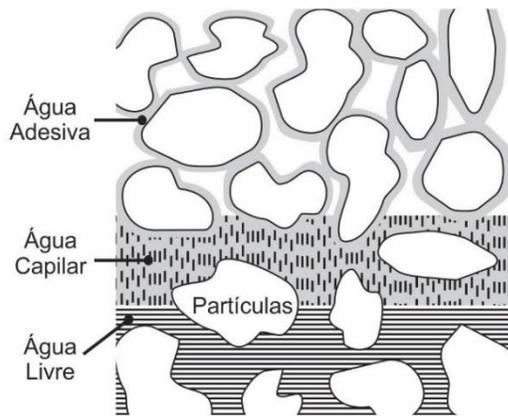


Figura 3.14. Representação esquemática dos estados físicos da água presente nos solos, quanto à sua energia potencial. Adaptado de Caputo (1973).

Nos solos arenosos (partículas de dimensões francamente maiores) as espessuras dos filmes de água são muito maiores, o que lhes confere menores propriedades coesivas.

Sendo A o valor que indica a superfície de contato entre as partículas por unidade de área, a dimensão²⁸ da pressão capilar P_C representada na figura 3.15 seria dada pela expressão:

²⁷ Conforme afirmação de Vargas (1977)

²⁸ O apêndice 2 descreve o fenômeno da capilaridade e como a equação 3.29 pode ser obtida.

$$P_c = A \cdot \frac{2T_s}{R} \quad (3.29)$$

Considerando solos saturados, à temperatura de 20°C, cujas curvaturas dos meniscos capilares apresentam ordem de grandeza equivalente ao diâmetro das partículas e que a área de contato unitária seja da mesma ordem de grandeza de sua porosidade, o valor de P_c poderia ser calculado. Como exemplo, pode-se imaginar um solo arenoso com partículas de diâmetro médio de $3 \cdot 10^{-4} \text{m}$ e porosidade de 45%; outro solo, argiloso com partículas de diâmetro de $1,5 \cdot 10^{-6} \text{m}$ e porosidade de 60%. Os valores de tensão superficial (T_s) da água podem ser obtidos na figura A12, no apêndice 2. Os valores de P_c seriam:

$$P_{\text{areia}} = 0,45 \cdot \frac{2 \cdot 6,96 \cdot 10^{-2}}{3 \cdot 10^{-4}} = 0,21 \text{ kNm}^{-1}$$

$$P_{\text{argila}} = 0,6 \cdot \frac{2 \cdot 6,96 \cdot 10^{-2}}{1,5 \cdot 10^{-6}} = 55,68 \text{ kNm}^{-1}$$

Nestas condições, a coesão apresentada pelo solo argiloso é da ordem de 265 vezes maior que a do solo arenoso.

A figura 3.16 apresenta a quantificação das forças coesivas atuantes no solo, em função do tamanho das partículas.

Na mecanização da agricultura a existência de forças internas entre as partículas é de fundamental importância, pois sua atuação interfere no resultado das operações de mobilização do solo, tanto nas relações solo-ferramenta quanto na interação solo-rodado. No caso de solos cultivados ocorre migração de partículas de argila dos horizontes superficiais para os subsuperficiais (argiluviação). Embora este seja um processo natural, ele é acelerado pelas modificações estruturais provocadas por operações agrícolas

de manejo que resultam em maior dispersão destas partículas. Por esta razão pode-se afirmar que ocorrem intensas modificações estruturais nestes solos. A presença de água adsorvida que atua na transmissão de forças de origem eletroquímica ganha relevância quando a distância entre as partículas é menor que 25 \AA . Também ocorrem relações eletromagnéticas, do tipo forças de Van der Waals²⁹, quando as partículas são de dimensões da ordem de $1 \mu\text{m}$.

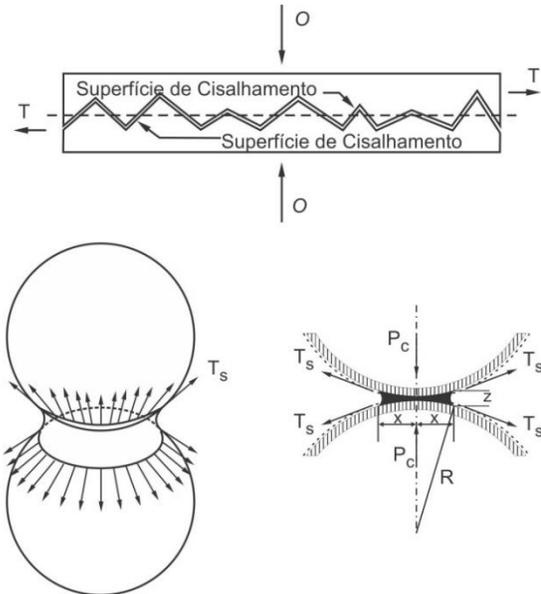


Figura 3.15. Coesão aparente devido a forças mecânicas. Adaptado de Mitchell (1993) e Vargas (1977).

No caso de solos não saturados, a água ocupa parcialmente os espaços vazios (poros) entre suas partículas, provocando uma situação na qual as tensões no fluido são negativas e recebem o nome de *sucção*. Evidentemente, tal condição apresenta grande variabilidade, em função da alteração da quantidade de água existente no meio. A figura 3.17 ilustra a situação de tensão em solos saturados e não saturados. O nome *aparente* dado a esta forma de coesão do solo

²⁹ **Johannes Diderik Van der Waals** (1837-1923): físico holandês. Seu trabalho e descoberta sobre as forças que atuam em partículas de dimensões moleculares de um gás, devido à variação de seu tamanho, conferiu a elas a

denominação de *forças de Van der Waals* e por este feito foi agraciado com o Nobel de Física de 1910 (Nobel Prize, 2015).

deve-se ao fato de que ela desaparece quando o solo se torna totalmente saturado ou seca completamente. Verifica-se, também, que sua ação aumenta inversamente com o diâmetro médio das partículas.

As forças mecânicas aparentes são causadas pela geometria associada à acomodação das partículas do solo, como ilustrado na figura 3.15. A rugosidade microscópica das superfícies de contato poderão gerar tensões de cisalhamento pela acomodação entre as superfícies, mesmo que não exista tensão normal na superfície macroscópica, durante o deslizamento relativo.

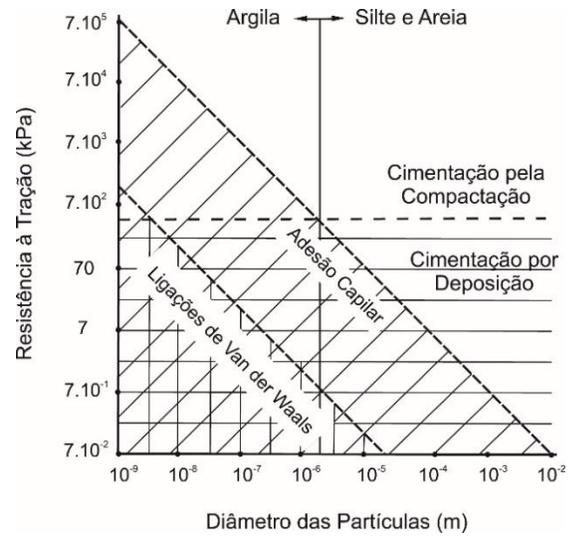


Figura 3.16. Contribuição potencial das forças de atração existentes no solo, em função das dimensões das partículas. Adaptado de Ingles (1962) citado por Mitchell (1993).

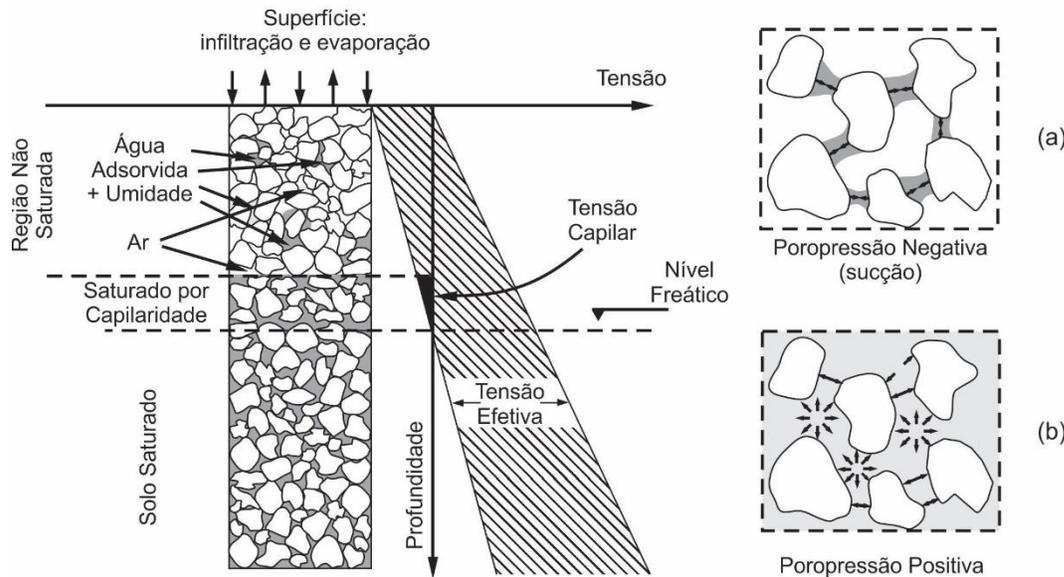


Figura 3.17. Distribuição da poropressão no solo, em função da profundidade. O fenômeno é associado à tensão superficial, adsorção de água pelas partículas do solo e capilaridade. Na região não saturada (a), a ação da água adsorvida age como uma “cola”, o que resulta em poropressão negativa causando a coesão aparente. No solo saturado (b) a tensão superficial provoca tensões positivas. Adaptado de Lambe & Withman (1979) e Gerscovich (2011).

3.4 Comportamento mecânico do solo: tensão e deformação

Os conhecimentos das teorias da plasticidade e da elasticidade são utilizados nos estudos das forças e tensões que atuam nos solos e nele provocam deformações e rupturas. Curvas características de seu comportamento nestes casos são apresentadas na figura 3.18.

A ruptura do material “solo” é um fenômeno de conceito complexo, pois pode ocorrer de forma brusca ou ter deformação excessiva. A figura 3.18(a) mostra a condição que caracteriza ruptura do tipo frágil (linha 1), quando o valor da tensão é bem definido para seu máximo (T_M). Este caso corresponde a solos quebradiços em

que, após a ruptura, a tensão decresce rapidamente tendendo a valores nulos. As outras duas linhas caracterizam as situações mais comuns observadas nos solos agrícolas. A linha 2 representa solos mais soltos, num comportamento admitido como plástico. A deformação cresce até um determinado valor, a partir do qual passa a ser praticamente constante, sem que haja variação da tensão. Neste caso considera-se que há deformação excessiva e não há um valor característico para se definir o ponto de ruptura em função das tensões atuantes. A linha 3 é característica de solos firmes e mostra que a resistência cresce até um nível máximo (T_{M1}) para, em seguida, decrescer rapidamente, até um valor constante (T_R), chamado de residual, a partir da qual as deformações ficariam constantes sem variação de tensão

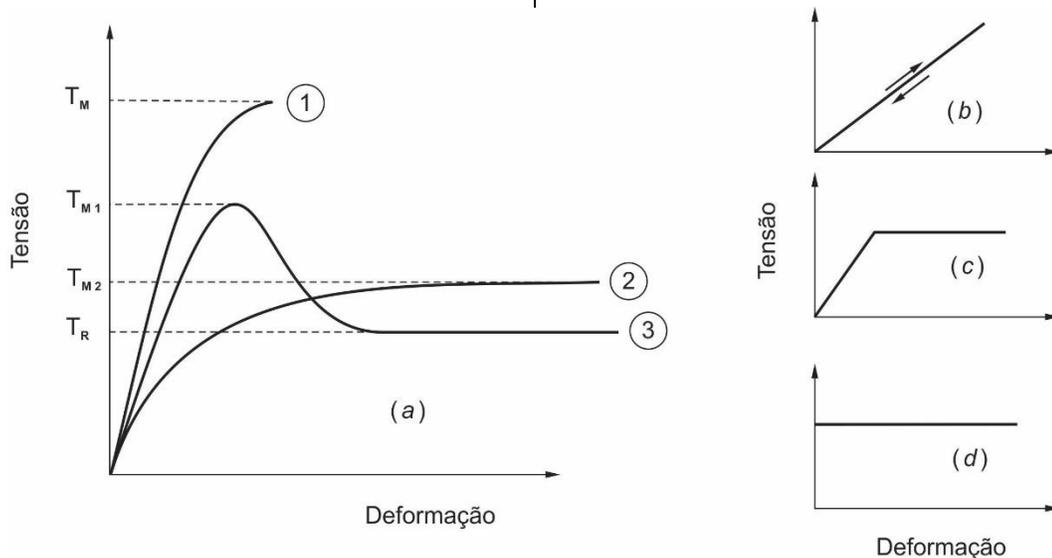


Figura 3.18. Comportamento tensão-deformação em solos. Adaptado de Mitchell (1993).

A teoria da formação de solos desenvolvida por Terzaghi denomina *estrutura do solo* a forma como as partículas se acomodam formando o arranjo da massa. Este arranjo depende fundamentalmente das dimensões das partículas e das proporções em que estão presentes, para

cada solo. Há basicamente três formas de acomodação: *granular simples*, *alveolar* (ou *favo*) e *floculenta*, descritas resumidamente nos próximos parágrafos. Estruturas mais complexas, que reúnem as formas básicas de arranjo, recebem o nome de esqueleto. Tais estruturas são mostradas nos esquemas da figura 3.19.

A formação granular simples ocorreria quando, sobre um leito já sedimentado, chega uma partícula de areia (diâmetro superior a $2 \cdot 10^{-5}$ m), suspensa em água, porém em movimento descendente. Ao tocar uma partícula já depositada no leito de sedimentação, aquela recém-chegada ficaria sujeita à resistência à penetração da primeira e ao atrito que aparece imediatamente depois do contato entre elas. Em função do peso (que é muito maior que o atrito), surge um binário que atua no centro de massa da partícula e faz com que adquira movimento rotacional, acomodando-se, então, numa depressão adjacente, atingindo o equilíbrio. A massa de solo resultante deste processo tem característica arenosa e apresenta uma estrutura “solta ou fofa”, a qual poderá ser adensada por vibrações posteriores.

No caso em que este mesmo fenômeno acontece com partículas de dimensões menores que 10^{-5} m, o atrito entre elas poderá ser superior (ou mais importante) que a força peso, impedindo a ação do binário e, portanto, impedindo a rotação que provocaria a acomodação, como descrito para a estrutura granular simples. Tal fato levaria as partículas a atingir o equilíbrio no momento do contato, permanecendo nesta posição. Desta condição resultaria a estrutura denominada de alveolar ou favo originando num sedimento “esponjoso”, de boa estabilidade, característico das argilas.

Se, no entanto, as partículas formarem uma suspensão coloidal (dimensões entre 10^{-9} m e 10^{-6} m) e têm a mesma origem, seria natural que possuíssem a mesma carga elétrica. Em função da força de repulsão elétrica, seu reduzido tamanho e peso não permitem que se toquem ou aglutinem. Assim, permaneceriam em suspensão indefinidamente, como característica de sua condição coloidal. No entanto, quando tal suspensão toma contato com um eletrólito, o que poderia se dar na foz de um curso d’água continental ao encontrar as águas salgadas do mar, por exemplo, ocorreria a neutralização das cargas pela reação entre as partículas e os sais da solução, cessando (ou diminuindo) a força de repulsão elétrica.

Existindo o movimento browniano³⁰ na suspensão coloidal, as partículas passariam a se chocar umas com as outras. O atrito entre suas superfícies seria forte o suficiente para produzir aglutinação, dando origem a “flocos” de partículas, as quais passariam a se depositar em conjunto.

Desta nova situação surgiriam estruturas parecidas com os alvéolos descritos anteriormente, porém não mais formados por partículas e sim por flóculos, originando material ainda mais poroso, chamado de floculento. Com a dinâmica da sedimentação as estruturas decorrentes desse processo seriam gradativamente carregadas pelo peso das camadas depositadas, umas sobre as outras e, por isso, tenderiam a “desabar”, transformando-se em alveolares, o que as tornaria raras na natureza.

³⁰ **Robert Brown** (1773-1858): físico e botânico escocês foi o primeiro a observar o movimento aleatório de partículas macroscópicas (pólen) imersas num fluido, por isso denominado “movimento browniano”. Brown,

equivocadamente atribuiu o movimento a uma nova forma de vida. A real explicação para o fenômeno foi dada pelo físico Albert Einstein, no início do século XX. (Hänggi, 2015 e Famous Biologists, 2015).

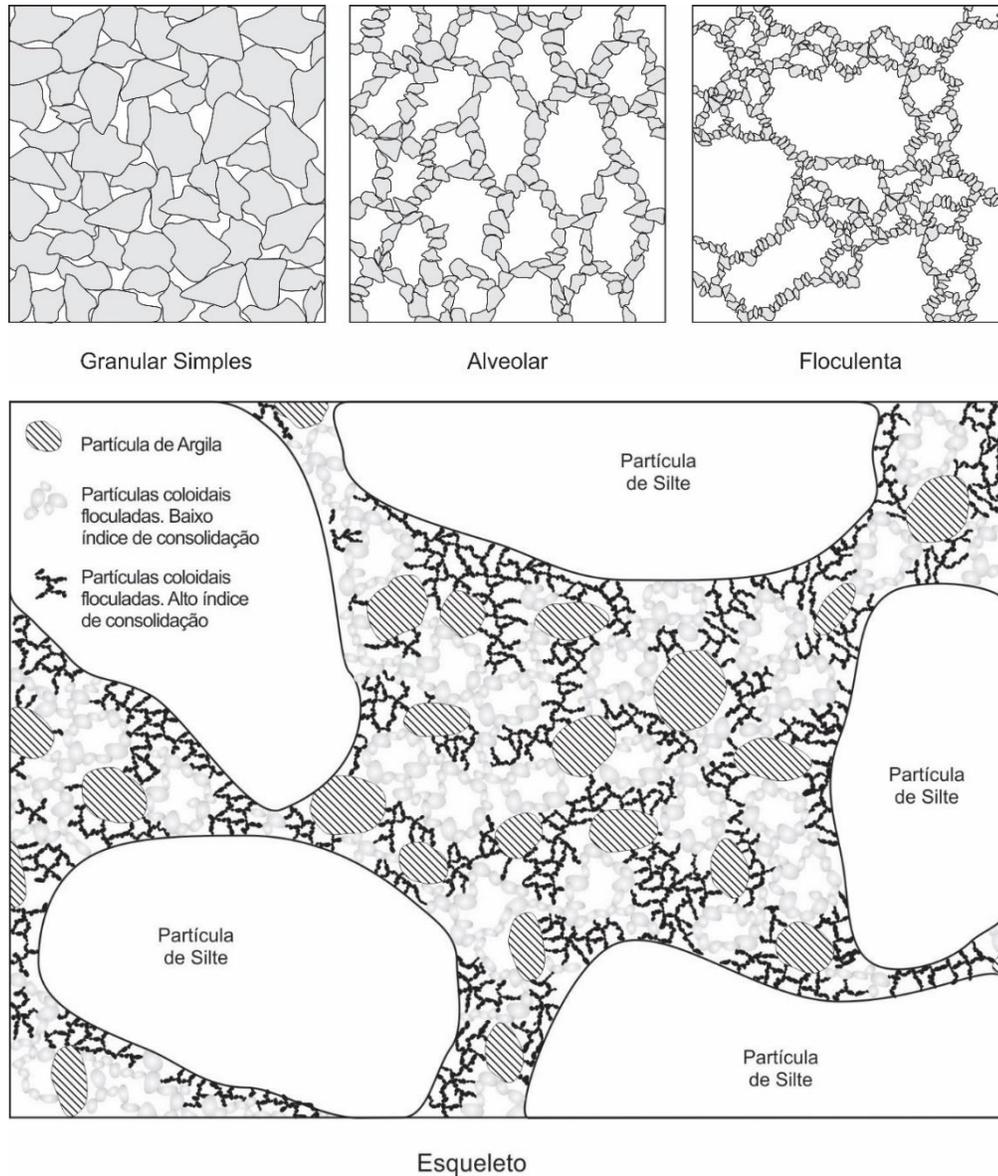


Figura 3.19. Estruturas de formação dos solos. Adaptado de Terzaghi (1967) e Mitchell (1993).

Na composição dos solos é frequente a presença de partículas maiores, da categoria de silte e areia, associadas às menores (fração argila). As primeiras oferecem resistência formando o esqueleto que suporta a maior parte da carga, concentrando as tensões.

No caso específico do desenvolvimento da atividade agrícola e pecuária com as ações de lavra (mobilização com diversos objetivos), as

estruturas originais do solo são destruídas. Uma vez desfeitas, tais estruturas não serão recompostas, restando um material cuja composição granulométrica e química é idêntica à original, porém com estrutura física desfeita e irreversível. Este processo recebe o nome de *amolçamento* e interfere decisivamente na capacidade do solo suportar tensões e, portanto, na sua deformação, favorecendo o processo de compactação.

Portanto, observa-se que para um mesmo índice de umidade, solos amolgados perdem resistência em relação ao seu estado natural, fenômeno denominado *sensitividade*, cujo efeito será a desagregação das partículas, tornando a massa de solo um material disperso, interferindo nas relações eletroquímicas (devido ao aumento da distância entre as partículas), donde decorre redução da coesão aparente.

O índice de sensibilidade (I_s) procura quantificar a perda de resistência das argilas, devido ao amolgamento, por meio de ensaios padronizados.

$$I_s = \frac{R_s}{R_a} \quad (3.30)$$

em que:

R_s – resistência obtida para ensaios de amostras indeformadas;

R_a – resistência obtida para ensaios de amostras amolgadas.

Os valores obtidos para o índice de sensibilidade determinam as capacidades das argilas em suportar o amolgamento. Quanto maior for o resultado numérico da equação 3.30, menor será a resistência do material perturbado, quando comparada com a resistência da estrutura original.

3.4.1 Conceito de tensão efetiva e pressão neutra

A figura 3.20 mostra a situação em que uma coluna de solo, em posição horizontal é representada pelo paralelepípedo cuja base tem área A . O plano que forma a secção transversal pode situar-se à profundidade z_1 acima do nível freático z_a ou abaixo dele, em z_2 , dependendo das considerações teóricas.

Na posição z_1 , admitida seca, a tensão no plano que corta o prisma seria relativa ao peso do solo dividida pela área A . Portanto:

$$\sigma_v = \frac{D_s \cdot V}{A} = D_s \cdot z_1 \quad (3.31)$$

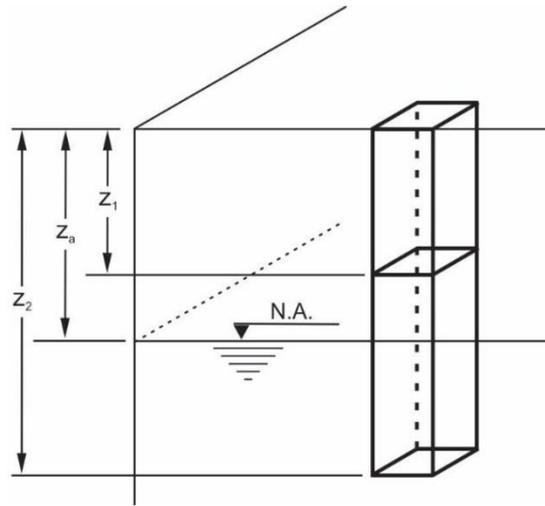


Figura 3.20. Esquema de prisma de solo para definição de tensões efetiva e neutra. Adaptado de Pinto (2006).

Diz-se que esta seria a tensão transmitida pelo efetivo contato entre as partículas do solo, evidentemente associadas ao peso de sua massa. Assim, ela recebe o nome de *tensão efetiva*, frequentemente representada por σ' .

À profundidade z_2 , no plano que secciona o prisma, a tensão será correspondente ao efeito de todas as camadas acima dela. Como a partir da profundidade do nível freático o solo estaria saturado, deve-se levar em conta a massa de água existente acima desta cota. Neste caso, admite-se que a água estará sujeita à uma pressão que independe da porosidade do solo, ou seja, dependente somente da profundidade em relação ao lençol freático. A pressão da água (u), chamada de *pressão neutra* ou *poropressão* seria:

$$u = (z_2 - z_a) \cdot \gamma_a \quad (3.32)$$

em que:

γ_a – massa específica da água.

A somatória dessas duas tensões resulta na chamada *tensão normal total*, designada por σ . Desta forma, pode-se concluir que a tensão efetiva é dada por:

$$\sigma' = \sigma - u \quad (3.33)$$

3.4.2 Resistência ao cisalhamento

O fenômeno *cisalhamento* é observado, por exemplo, devido à aplicação de esforços opostos ao longo do eixo longitudinal de um corpo material. Neste caso, verifica-se ruptura (segundo um plano), como representado na figura 3.21.

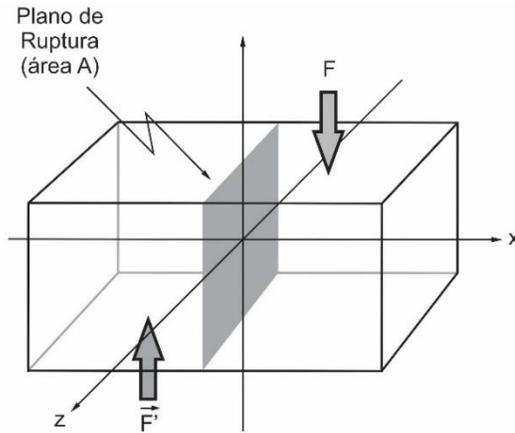


Figura 3.21. Representação esquemática do plano de ruptura por cisalhamento, num corpo rígido.

As forças F e F' que têm mesma direção e sentidos opostos, atuariam perpendicularmente ao plano xz , o que provocaria uma falha, segundo o plano (yz) de ruptura. É intuitivo que forças atu-

ando segundo o eixo x no corpo rígido representado na figura 3.21, alterariam o valor modular de F e F' , que seria necessário para causar a falha.

A distribuição da força necessária para causar a ruptura do material em relação à área da secção cisalhada dá origem à grandeza denominada *tensão de cisalhamento* (τ). De acordo com a representação da figura 3.21, a relação seria:

$$\tau = \frac{F}{A} \quad (3.34)$$

Nas atividades agrícolas relacionadas com a mobilização e desagregação do solo ocorrem situações em que o conceito de tensão de cisalhamento colabora para a compreensão do fenômeno. O fenômeno do cisalhamento também é importante quando se observa o desempenho dos dispositivos de tração atuando na condição “fora de estrada”. A figura 3.22 ilustra esquematicamente as duas condições.

A determinação dos limites do solo em resistir às tensões cisalhantes é experimental e muitos são os critérios utilizados para tal. Assim, os valores obtidos variam não somente com as condições de solo como também de acordo com estes critérios (ou métodos). O critério mais utilizado, devido à sua simplicidade e por ser aquele que (teoricamente) melhor retrataria o comportamento dos solos, é o das envoltórias de *Mohr*³¹. Consiste na utilização de um plano cartesiano ortogonal no qual são representadas as tensões normais (σ) na abcissa e as tensões e cisalhamento (τ) na ordenada. A figura 3.23 mostra graficamente resultados hipotéticos das determinações utilizando tal técnica. A faixa de interesse de tensões delimitada na figura 3.23 pode ser tratada como uma reta, cuja equação seria:

³¹ **Christian Otto Mohr** (1835-1918): engenheiro alemão, professor da Universidade Politécnica de Stuttgart, entusiasta de ferrametas gráficas para solução de

problemas. Desenvolveu o método para representação gráfica das tensões o qual ficou conhecido como *círculo de Mohr*.

$$\tau = c + \sigma_n \operatorname{tg} \phi \quad (3.35)$$

em que:

τ – tensão de cisalhamento;

c – coesão;

σ_n – carga normal;

ϕ – inclinação da reta, denominada de *ângulo de atrito interno* (do solo).

Esta é a equação mais utilizada, na atualidade, para representar tensões a que o solo é submetido e ficou conhecida como a relação de *Mohr-Coulomb*. Na realidade a resistência ao cisalhamento do solo (R) depende de muitos outros fatores e uma equação completa para representar o fenômeno integralmente deveria

ser colocada numa função como a representada na equação 3.36.

$$R = f(e, C, s', U, H, \phi, T, S, c', \varepsilon, \dots) \quad (3.36)$$

em que:

e – índice de porosidade

ϕ – ângulo de atrito interno

C – composição granulométrica

T – temperatura

σ' – tensão efetiva

S – estrutura

U – umidade

c' – coesão efetiva

H – histórico de tensões

ε – deformação

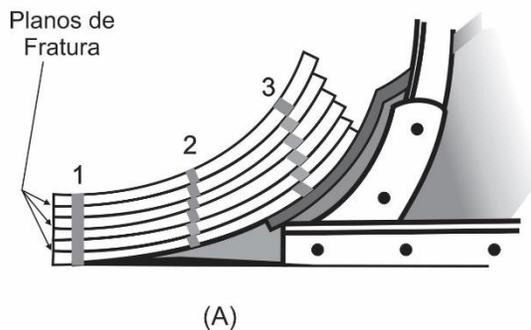


Figura 3.22. Cisalhamento do solo: (A) na mobilização e desagregação, representada pela ação de uma aiveca; camadas do solo deslizam umas sobre as outras devido à ação da ferramenta (adaptado de MIALHE, 1967). A tração sobre um solo (B): a força exercida pelo pneu provoca o deslizamento relativo de uma placa de solo, sob a área de contato.

Determinar, na prática, a contribuição de cada uma destas grandezas para a resistência ao cisalhamento do solo (e de muitas outras, como sugere o uso de reticências na função modelo) torna-se impossível.

Afortunadamente a equação 3.35 satisfaz as necessidades de representação do fenômeno agindo nos solos e torna-se, assim, um grande atrativo pela sua eficiência e confiabilidade.

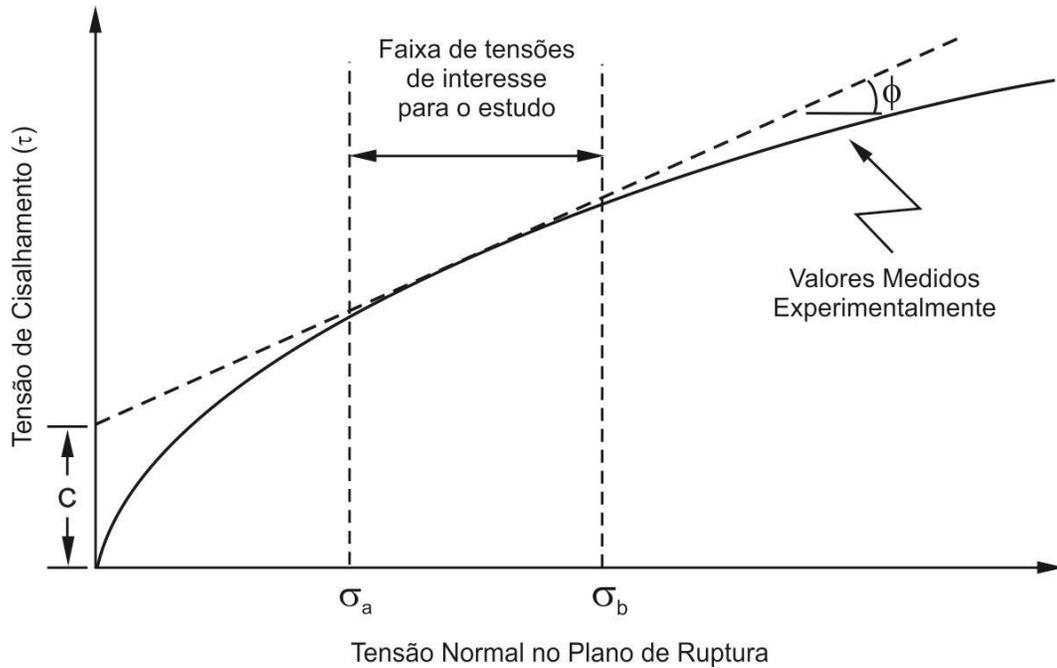


Figura 3.23. Envoltória de Mohr para a resistência ao cisalhamento de um solo. Adaptado de Mitchell (1993).

O fenômeno cisalhante observado na figura 3.22(B) poderia ser simplificado assumindo-se uma placa ideal de área A (representando o contato entre o pneu e o solo), carregada com uma força normal N (peso apoiado na área A entre pneu e solo), como ilustra a figura 3.24. Uma força tangencial T (torque transmitido pelo pneu) estaria atuando na placa e provocando o seu deslocamento - d . A relação entre T e A (como definido na equação 3.26) é chamada de *tensão de cisalhamento*.

Determinar a resistência do solo ao cisalhamento poderia ser entendida como *o exercício de avaliar a dimensão dos parâmetros coesão (C) e atrito interno (ϕ)*, componentes da equação 3.35 e representados no gráfico da figura 3.23.

A faixa de tensões de interesse do estudo em destaque representa a condição limite de instabilidade. Tensões inferiores a σ_a produzem

condição de estabilidade e superiores a σ_b são impossíveis de ocorrer, por questões de controle.

De maneira geral, a ciência *mecânica do solo* utiliza-se de análise de amostras indeformadas para determinação dos parâmetros da equação 3.35. Após coletadas, tais amostras são submetidas a ensaios de tensão e deformação, cujos resultados possibilitam a determinação das condições de resistência do solo quando apreciados pelas teorias aplicáveis. Não é difícil de imaginar que, para um assunto complexo como este, existam várias correntes de pensamento e inúmeras proposições para obter conclusões sobre tais determinações experimentais. No entanto, parece haver consenso sobre o método da *envoltória de ruptura* como ferramenta de análise, independentemente de critério ou técnica utilizados para determinação dos valores de C e de ϕ .

Os resultados, no entanto, podem variar entre uma determinação e outra, uma vez que os valores obtidos estão subordinados a condições de

drenagem do solo, da velocidade e direção empregada na aplicação das forças, além do histórico de tensões sofridas pelo solo, o que poderia ser representado pela compactidade da amostra

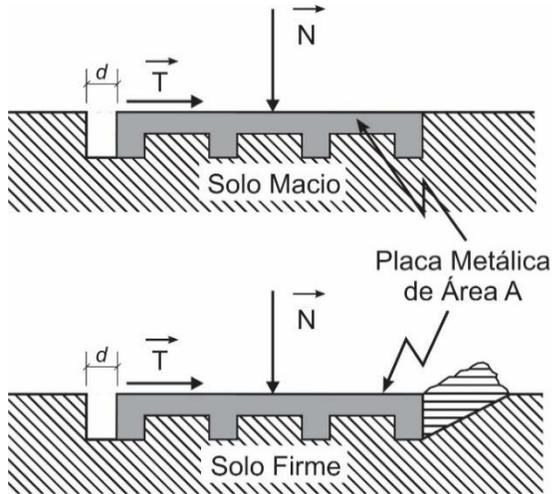


Figura 3.24. Representação esquemática do fenômeno do cisalhamento. Adaptado de Gill & Vanden Berg (1968).

3.4.3 Tensões principais e o círculo de Mohr

Quando um bloco de solo é submetido a tensões em todas as direções, o mais comum é que ele sofra diminuição de volume, como representado nos três planos ortogonais da figura 3.25. As tensões normais σ_n são chamadas de *tensões principais*. A maior e a menor delas são denominadas *maior tensão principal* e *menor tensão principal* cujas representações convencionais são σ_1 e σ_3 , respectivamente. Uma terceira tensão seria a *tensão intermediária* (σ_2) cuja importância para o comportamento do solo ainda não é completamente entendida. Por isso, até que seus efeitos sejam esclarecidos, especialistas preferem trabalhar com os parâmetros σ_1 e σ_3 .

As tensões observadas numa região onde o solo sofre uma determinada carga se propagam

em todas as direções. Quando a propagação ocorre em profundidade, ela recebe o nome de *tensão geostática vertical* (σ_v). Em caso de propagação lateral, denomina-se *tensão geostática horizontal* (σ_h). A relação entre estas duas grandezas é chamada de *coeficiente de tensão lateral* ou *razão de tensão lateral* e é definida pela equação 3.37.

$$K = \frac{\sigma_h}{\sigma_v} \quad (3.37)$$

Nas fundações das obras da engenharia civil a grandes profundidades, além da carga provocada pelas edificações deve-se considerar o peso do solo acima do ponto de interesse. Na agricultura tal fenômeno restringe-se às cargas provocadas pelos sistemas de rodado das máquinas que transitam na superfície e pela ação dos gumes cortantes das ferramentas que agem dentro do solo quando se realizam operações de cultivo. Nesta situação, frequentemente o valor de K é inferior à unidade e nestas para tais condições considera-se $\sigma_v = \sigma_1$ e $\sigma_h = \sigma_2 = \sigma_3$. Levando em conta estas considerações conclui-se que os eventos poderão ser estudados em somente dois planos.

Conhecendo-se a direção e a magnitude das tensões normais σ_1 e σ_3 é possível determinar todas as outras tensões (normais e de cisalhamento) em qualquer outra direção, utilizando o exemplo da figura 3.26. O *círculo de Mohr* é a representação gráfica das tensões e o ponto A (como todos os outros pontos de coordenadas σ_n e τ_n pertencentes ao círculo) representa a tensão num plano cuja perpendicular é orientada pelo ângulo θ , na direção da maior tensão principal.

Também é possível encontrar a magnitude e a direção da tensão principal quando são conhecidos os valores de σ_θ e τ_θ que agem em dois planos. Pode-se demonstrar que:

$$\sigma_\theta = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} + \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \cos 2\theta \quad (3.38)$$

$$\tau_\theta = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \sin 2\theta \quad (3.39)$$

Como representado na figura 3.26, o centro do círculo de Mohr está localizado no plano de tensões normais, na dimensão correspondente à média aritmética das magnitudes das tensões principais σ_1 e σ_3 . O raio do círculo é a metade

da diferença entre σ_1 e σ_3 . Este vetor ($\sigma_1 - \sigma_3$) recebe o nome de *tensor divergente* e o ponto na periferia do círculo que contém o maior valor de τ_θ ($2\theta = 90^\circ$) é denominado de *máxima tensão de cisalhamento* ou τ_{max} .

Assume-se que a condição de máxima tensão ocorre quando o ângulo entre o plano de cisalhamento e a maior tensão principal se aproxima de 45° .

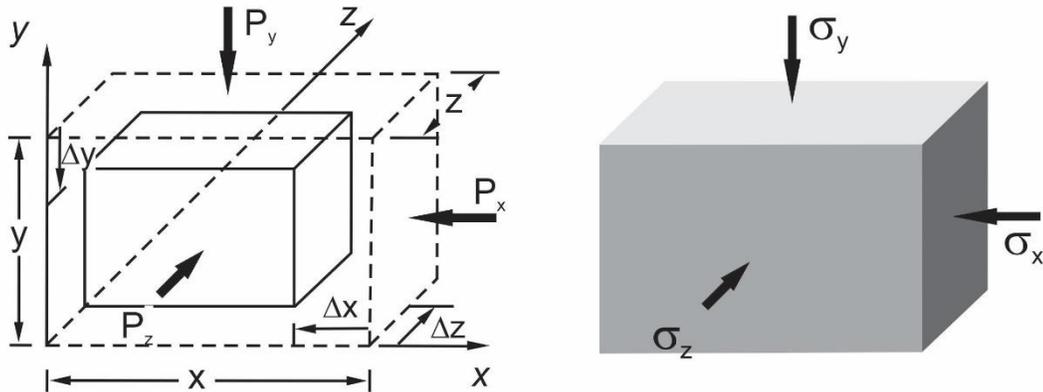


Figura 3.25. Deformação observada num bloco de solo representado na condição inicial pelas linhas tracejadas e na condição final com o volume reduzido. As forças (P_n) nas faces do bloco dão origem às tensões (σ_n), cuja resultante é nula.

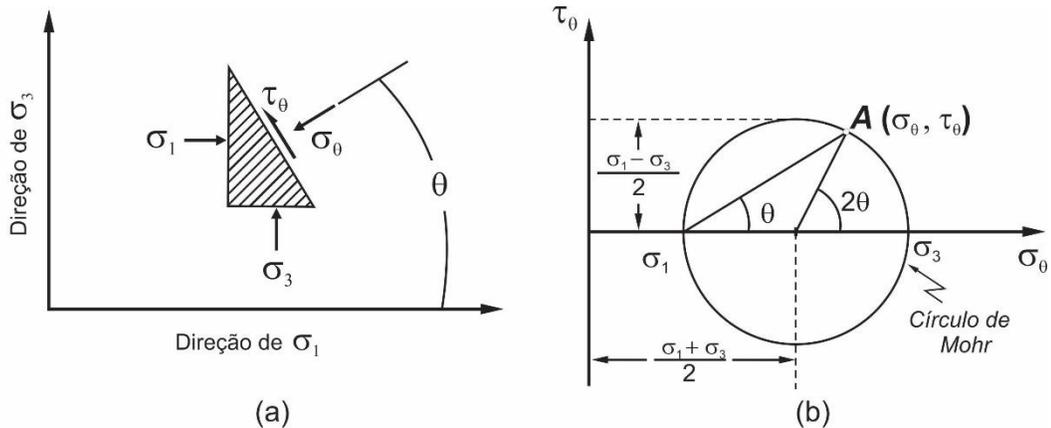


Figura 3.26. Representação dos estados de tensão e correspondente círculo de Mohr. Adaptado de Lambe & Withman (1979).

3.4.4 Ensaios para determinação de c e ϕ

A determinação da coesão (c) e do ângulo de atrito interno (ϕ) é realizada de forma indireta e

seus valores são obtidos de ensaios que procuram quantificar o comportamento dos solos quando submetidos a diferentes estados de tensão e deformação.

Dentre os vários métodos utilizados para ensaio e determinação das tensões principais e de cisalhamento, destacam-se o teste triaxial e o de cisalhamento direto.

O ensaio (ou teste) triaxial consiste em submeter um corpo de prova de solo indeformado,

esculpido em forma cilíndrica (geralmente a relação entre a altura e o diâmetro do corpo de prova aproxima-se de 2), a partir de um bloco indeformado por tensões axiais e de confinamento. A figura 3.27 mostra um esquema do dispositivo onde se desenvolve tal ensaio.

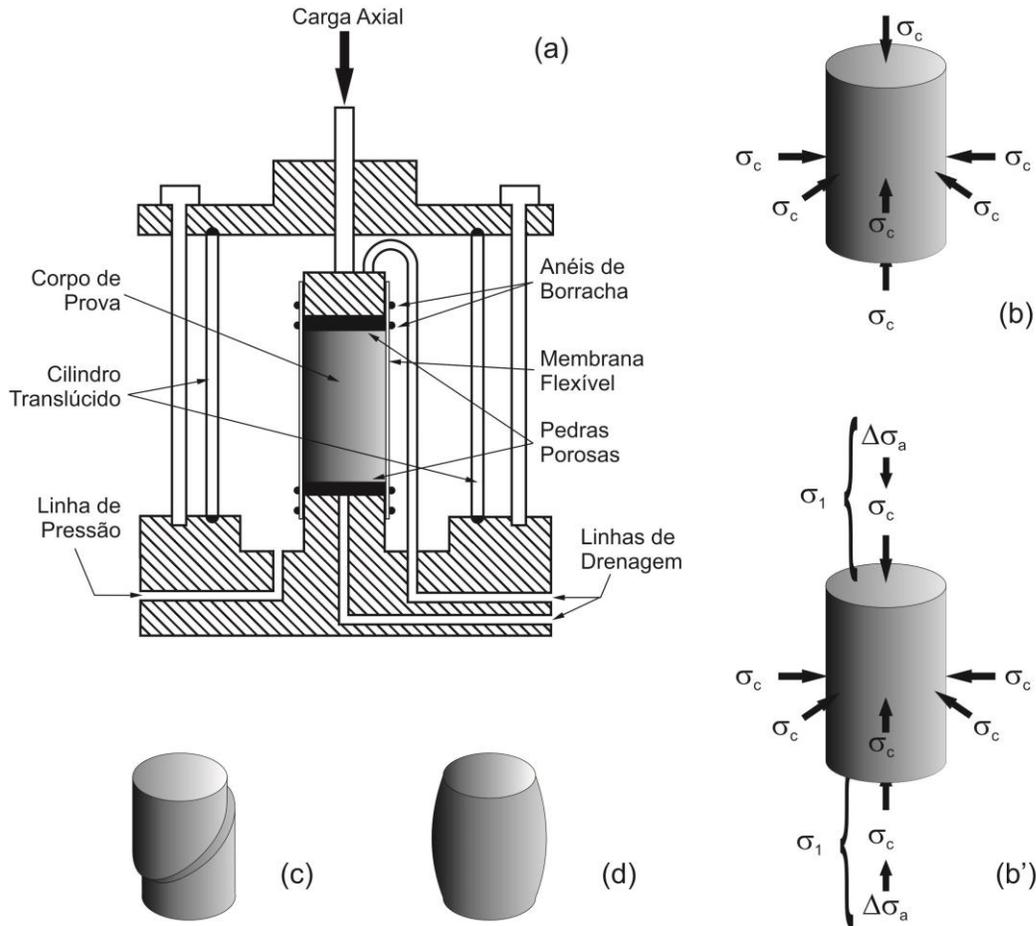


Figura 3.27. Corte transversal de célula de ensaio triaxial típica (a); corpo de prova na fase inicial do ensaio (b) e ao ser carregado com a tensão desviadora $\Delta\sigma_a$ (b'); condições finais dos corpos de prova: cisalhado (c) e deformado (d).

Trata-se de uma câmara pressurizada em que o corpo de prova fica confinado a pressão constante (σ_c), protegido por uma membrana flexível e é gradativamente submetido à carga axial ($\Delta\sigma_a$) até que se observe o cisalhamento ou deformação.

Não havendo tensões cisalhantes nas laterais do corpo de prova, a tensão axial $\sigma_c + \Delta\sigma_a$ e a tensão confinante σ_c , assumem valores das tensões principais maior (σ_1) e menor (σ_3). O incremento da tensão axial $\Delta\sigma_a = \sigma_1 - \sigma_3$ é chamada de *tensão desviadora*.

O ensaio de cisalhamento direto, no entanto, é mais utilizado que o triaxial em função de sua praticidade. Consiste no ato de impor um plano de ruptura a uma amostra prismática (paralelepípedo) de solo como forma de medir sua resistência.

No aparelho destinado a esta modalidade de ensaio, representado da figura 3.28, aplica-se uma carga normal (N - constante) sobre um cabeçote metálico instalado acima do corpo de prova. A seguir traciona-se a parte móvel do aparelho com velocidade constante (da ordem de $10^{-5}ms^{-1}$ ou menor) e estabelecida de acordo com o material a ser ensaiado. O deslocamento gera a força tangencial (T), resultando na falha (fratura), definindo assim o plano de cisalhamento. Conhecendo-se a área (A_c) da seção transversal que contém o plano de fratura (equivalente à área do dispositivo de ensaio) determinam-se os valores das tensões normal (σ) e de cisalhamento (τ). Extensômetros determinam as variações de carga durante o ensaio e tais valores ficam registrados para que se possa descrever graficamente o resultado. Pode ocorrer a deformação do corpo de prova e seu consequente deslocamento horizontal. Em alguns casos (principalmente em solos densos), pode acontecer deslocamento vertical.

Esta forma de determinação da resistência ao cisalhamento foi primeiramente utilizada por *Coulomb* em 1776. O plano de cisalhamento pode ter seção circular ou quadrada, sendo esta última mais comum. Sua área varia entre 2 e $2,5 \cdot 10^{-3}m^2$ e a espessura do corpo de prova tem entre 2 e $3 \cdot 10^{-2}m$. A carga normal típica para ensaios com solos fica entre zero e $1000kNm^{-2}$.

O deslocamento vertical do bloco de solo (ou deformação) ocorre em função de um fenômeno conhecido por *embricamento*, que é causado pela acomodação das partículas do solo. Como mostrado no esquema da figura 3.29(a) e

já discutido, para que haja deslocamento do bloco é necessário que sejam vencidas as forças que se opõe ao movimento: o atrito (T) e a coesão (c), caso exista uma substância ou situação eletroquímica que provoque atração entre as superfícies em contato. Quando a coesão é desprezível, o atrito máximo (T_{max}) provocaria a máxima tensão cisalhante (τ) que seria igual à tensão de atrito (τ_a), como mostrado na equação 3.40.

$$T_{max} = N \cdot tg\phi \rightarrow \tau = \tau_a = \sigma \cdot tg\phi \quad (3.40)$$

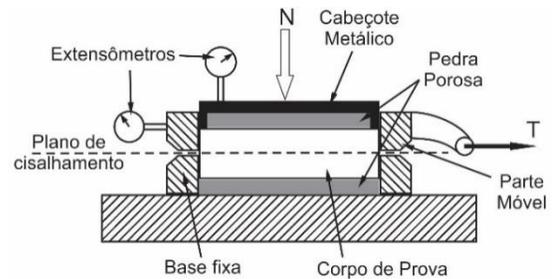


Figura 3.28. Esquema de corte transversal do aparelho utilizado para determinação do cisalhamento direto em solo.

Quando a coesão superficial contribui efetivamente para o impedimento do deslocamento (ou deformação), como nos solos argilosos, a componente de atrito e a tensão cisalhante serão acrescidas do valor da coesão (c). A tensão cisalhante seria descrita, então, pela equação 3.41.

$$\tau = c + \sigma \cdot tg\phi \quad (3.41)$$

Na figura 3.29(b), procura-se representar o fenômeno do embricamento. Solos fofos ou leves teriam deslocamento de partículas no sentido horizontal, uma sobre as outras como representado pelas esferas na figura 3.29(c). Solos densos ou duros representados na figura 3.29(d), apresentariam maior dificuldade para o desloca-

mento das partículas, em função de sua acomodação mais adensada. A ruptura dessa estrutura provocaria movimento ascendente das partículas

(esferas), apresentando uma expansão volumétrica durante o cisalhamento, o que é conhecido por *dilatância*.

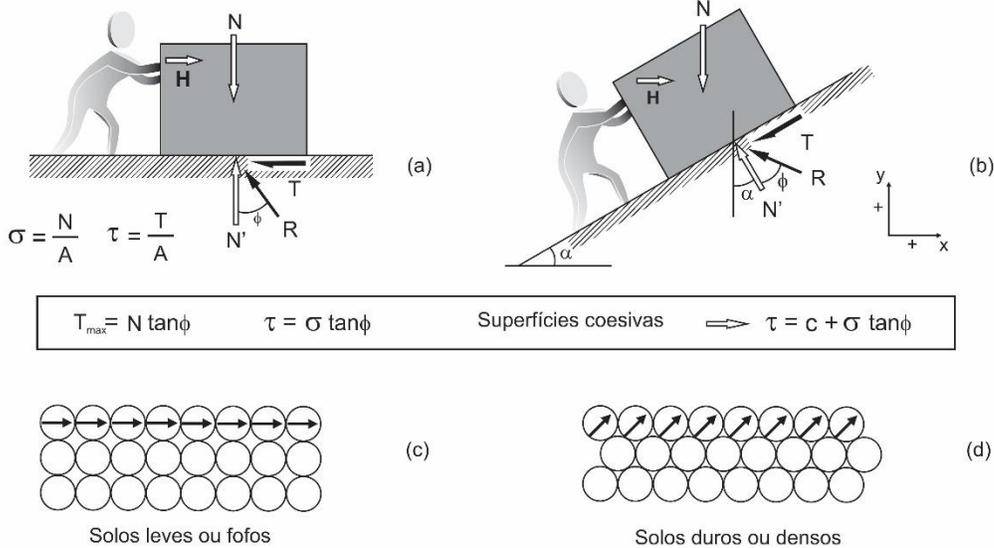


Figura 3.29. Representação esquemática do fenômeno do atrito entre um bloco e o plano horizontal (a) e inclinado (b), como simulação do efeito do embricamento para solos fofos (c) e densos (d).

Conclui-se que, quanto mais denso for o solo, maior será sua resistência ao cisalhamento, devido à contribuição do fenômeno do embricamento. Neste caso, uma componente de esforço horizontal H poderia ser considerada equivalente a T_a e tal condição de equilíbrio é representada nas equações 3.42 e 3.43.

$$\Sigma_{F_x} = T_a - N' \text{sen} \alpha - T \text{cos} \alpha = 0 \quad (3.42)$$

$$\Sigma_{F_y} = N' \text{cos} \alpha - T \text{sen} \alpha - N = 0 \quad (3.43)$$

Considerando o valor de T na equação 3.40 e resolvendo as equações em função de T_a e N , tem-se:

$$\begin{aligned} T_a &= N' \text{sen} \alpha + T \text{cos} \alpha \text{ ou} \\ T_a &= N' (\text{sen} \alpha + \text{tg} \phi \cdot \text{cos} \alpha) \end{aligned} \quad (3.44)$$

$$\begin{aligned} N &= N' \text{cos} \alpha - T \text{sen} \alpha \text{ ou} \\ N &= N' (\text{cos} \alpha - \text{tg} \phi \cdot \text{sen} \alpha) \end{aligned} \quad (3.45)$$

Substituindo 3.45 em 3.44, tem-se:

$$\begin{aligned} T_a &= N \frac{\text{sen} \alpha + \text{tg} \phi \cdot \text{cos} \alpha}{\text{cos} \alpha - \text{tg} \phi \cdot \text{sen} \alpha} = \\ &= N \frac{\text{tg} \alpha + \text{tg} \phi}{1 - \text{tg} \phi \cdot \text{tg} \alpha} = \\ &= N \cdot \text{tg}(\phi + \alpha) \end{aligned} \quad (3.46)$$

Neste caso, α é conhecido como *ângulo de dilatância* e a componente de tensão devido ao embricamento será:

$$\tau_a = \sigma \cdot \text{tg}(\phi + \alpha) \quad (3.47)$$

Como se pode concluir, o efeito do embridamento interfere decisivamente na resistência ao cisalhamento dos solos. Quando a tensão normal (σ) cresce, ocorre maior dificuldade das partículas do solo movimentarem-se verticalmente, como esquematizado na figura 3.29(d), o que reduziria o efeito de dilatância. Portanto, o ângulo de dilatância (α) varia em proporção inversa à tensão normal. De qualquer maneira, ocorreria uma condição de “pico” para a força

cisalhante provocar a ruptura e fazer com que houvesse a movimentação da massa de solo. A partir de então, a tensão diminuiria e atingiria a condição de *tensão residual*, passando a um comportamento equivalente aos dos solos fofos ou leves. A representação desta condição está na figura 3.30(a) onde se verifica a diferença entre a tensão de pico e a residual, o que poderia ser creditado ao fenômeno do embridamento.

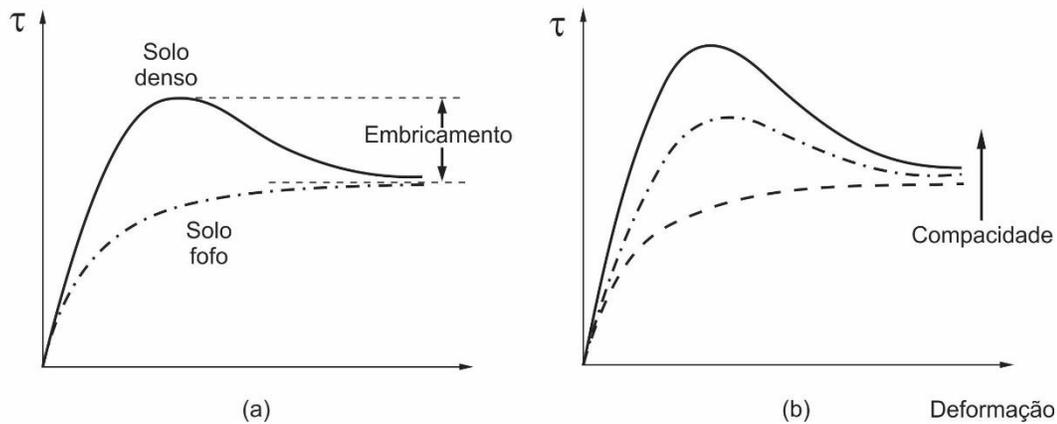


Figura 3.30. Efeito do embridamento e da tensão normal sobre a resistência dos solos. Adaptado de Gerscovich (2010).

É intuitivo que, com o aumento da tensão normal, ocorra diminuição na porosidade (n) e no índice de vazios (e), definidos nas equações 3.6 e 3.7. Então, para solos mais densos (com menor porosidade) ocorrem maiores tensões de cisalhamento devido ao maior efeito do embridamento (como mostrado na figura 3.30(b)), porém menor tendência à dilatância, podendo resultar em maior dificuldade de desagregação em se tratando de atividades agrícolas. É o que se observa em solos compactados por tráfego ou pela ação de ferramentas de cultivo.

Conclui-se, em função das discussões possibilitadas pelas equações de 3.38 até 3.45, que a tensão de cisalhamento será dada por:

$$\tau = c + \sigma \cdot tg(\phi + \alpha) \quad (3.48)$$

Portanto, a equação 3.48 define a envoltória de Mohr-Coulomb e o termo relativo à coesão (c) seria considerado para solos argilosos, cimentados e os granulares que possuem coesão aparente, enquanto que seria desprezado nos granulares, onde o efeito do embridamento torna-se especialmente importante.

A determinação da envoltória de Mohr-Coulomb, no entanto, depende do critério de ruptura adotado. Sua obtenção está associada à realização de ensaios cujas condições iniciais são alteradas para provocar variações que permitam obter resultados que definam os vários estados de

ruptura. Tais resultados dependem dos critérios definidos pelos executores, os quais são baseados nas técnicas conhecidas e adotadas, o que pode fazer com que sejam observadas variações entre eles.

A figura 3.31 ilustra a condição de adoção de critérios diferentes, e mostra como as envoltórias obtidas para 3 resultados de ensaio *tensão x deformação*, pode variar. Pode-se notar que as duas envoltórias apresentam uma inclinação característica. O ângulo de atrito (ϕ) é maior quando considerada a tensão de pico e menor se for considerada a tensão residual

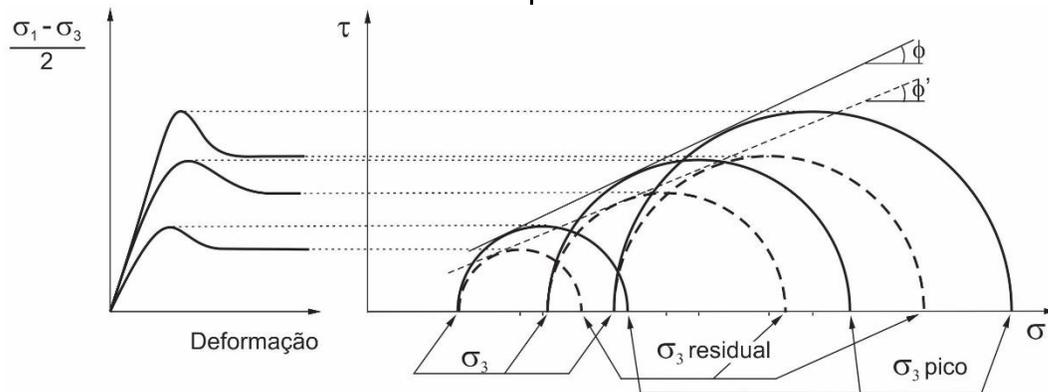


Figura 3.31. Envoltória de Mohr obtida para ensaio de cisalhamento, considerando os critérios de tensão de ruptura, resultando em atrito interno ϕ e em tensão residual, quando se obteve atrito interno ϕ .

BIBLIOGRAFIA CONSULTADA

- ALMEIDA, G.C.P. **Caracterização física e classificação dos solos.** Juiz de Fora, Universidade Federal de Juiz de Fora, 2005. 145p. Apostilado.
- BALASTREIRE, L.A. **Máquinas agrícolas.** São Paulo: Manole, 1987. 307p.
- BASSALO, J.M. **Curiosidades da ciência: o atrito.** Disponível em: <http://www.searadaciencia.ufc.br/folclore/folclore109.htm>. Acesso em 25 mar. 2011.
- BUENO, B.S., VILAR, O.M. **Mecânica dos solos, Volume I.** São Carlos: Universidade de São Paulo/EESC, 1984. Publicação 062/94. 131p.
- CAMARGO, O.A., ALLEONI, L.R.F. **Compactação do solo e o desenvolvimento das plantas.** Piracicaba: Degaspari, 1997. 132p.
- CANAVALATE, J.O., HERNANZ, J.L. **Técnica de la mecanización agraria.** Madrid: Mundi Prensa, 1989. 641p.
- CAPUTO, H.P. **Mecânica dos solos e suas aplicações.** Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora, 1973, v1. 242p.
- FAMOUS BIOLOGISTS. **Robert Brown.** 2015. Disponível em: <http://famousbiologists.org/robert-brown/>. Acesso em 20 fev. 2015.
- HÄNGGI P. **Robert Brown and the pollen stuff.** Disponível em: http://www.physik.uni-augsburg.de/theo1/hanggi/History/Robert_Brown_Vortrag.pdf. Acesso em 20 fev. 2015.
- JODI D. J., MONCRIEF, J., VOORHEES, W.B., SWAN. J.B. **Soil compaction: causes, effects and control.** Saint Paul: University of Minnesota Extension Service, 2001. Disponível em <http://www.extension.umn.edu/distribution/cropsystems/DC3115.html>. Acesso em 16 ago. 2011.
- GEOTECHNICAL ENGINEERS. **World Wide Web Geotechnical Engineers – Hall of Fame.** Disponível em <http://www.ejge.com/People/Casagrande/Casagrande.htm>; <http://www.ejge.com/People/Terzaghi/Terzaghi.htm>. Acesso em 06 fev. 2015.
- GERSCOVICH, D.M.S. **Resistência ao cisalhamento.** Rio de Janeiro, Faculdade de Engenharia UERJ, 2010. Disponível em <http://www.eng.uerj.br/~denise/pdf/resistenciacisalhamento.pdf>. Acesso em 12 fev. 2011. 102p.
- GERSCOVICH, D.M.S. **Resistência ao cisalhamento de solos não saturados.** Rio de Janeiro, Faculdade de Engenharia UERJ, 2010. Disponível em: http://www.eng.uerj.br/~denise/pdf/resistenciacisalhamento_nsat.pdf. Acesso em 04/042011. 80p.
- GILL, W.R., VANDEN BERG, G.E. **Soil dynamics in tillage and traction.** Agriculture Handbook 316. USDA, 1968. 511p.
- HORN, R. **Stress-strain effects in structured unsaturated soils on coupled mechanical and hydraulic processes.** Amsterdam, Geoderma, n.116, p.77-88, 2003.
- INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, NORMALIZAÇÃO E QUALIDADE INDUSTRIAL (INMETRO). **Sistema internacional de unidades.** Rio de Janeiro, INMETRO, 8ed., 2007. 114p.
- LAMBE, T.W., WITHMAN, R.V. **Soil mechanics, SI version.** Singapore, John Wiley & Sons, 1979. 553p.
- LEMOS, R. C., SANTOS, R. D. dos. **Manual de descrição e coleta de solo no campo.** Sociedade Brasileira de Ciência do Solo – Centro Nacional de Pesquisa de Solos. 3ed., p. 83, Campinas-SP, 1996.

- MIALHE, L.G. **Máquinas agrícolas**. Piracicaba, USP/ESALQ, Vol.1, 1967. 262p.
- MITCHELL, J.K. **Fundamentals of soil behavior**. New York, John Wiley & Sons, 2ed., 1993. 437p.
- MITCHELL, J.K., SOGA, K. **Fundamentals of soil behavior**. New York, John Wiley & Sons, 3ed., 2005. 565p.
- MOURA, D.S.S., SEVERO, R.N.F., CARVALHO JUNIOR, H.G., MACEDO NETO, O.C. **Escoamento plástico e comportamento tensão-deformação de solos cimentados**. Revista Holos, Ano 23, v.3, p.61-70, 2007.
- NICOLODI, M; GIANELLO, C; ANGHINONI, I. **Repensando o conceito de fertilidade do solo no sistema de plantio direto**. Revista Plantio Direto, ed.101, set./out. 2007. Aldeia Norte Editora Ltda., Passo Fundo, RS.
- NOBEL PRIZE. **Johannes Diderik van der Waals – Biographical**. Disponível em: http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1910/waals-bio.html. 2015. Acesso em 19 fev. 2015.
- REICHERT, J.M.; SUZUKI, L.E.A.S.; REINERT, D.J. Compactação do solo em sistemas agropecuários e florestais: identificação, efeitos, limites críticos e mitigação. In: CERETTA, C. A.; SILVA, L. S.; REICHERT, J. M. **Tópicos em Ciência do Solo**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, n.5, p.49-134, 2007.
- SRIVASTAVA, A.K., GOERING, C.E., ROHRBACH, R.P., BUCKMASTER, D.R. **Engineering principles of agricultural machines**. St. Joseph: ASABE, 2006. 2ed. 588p.
- SUZUKI, L. E. A. S; REICHERT, J. M.; REINERT, D. J; LIMA, C. L. R. **Grau de compactação, propriedades físicas e rendimento de culturas em Latossolo e Argissolo**. Pesquisa agropecuária brasileira, Brasília, v.42, n.8, p.1159-1167, ago. 2007.
- TERZAGHI, K. **Soil mechanics in engineering practice**. New York, John Wiley & Sons, 1967. 729p.
- UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE. **Guide to texture by feel**. 2011. Disponível em <http://www.soils.usda.gov/education/resources/lessons/texture/>. Acesso em 15 fev. 2011.
- VARGAS, M. **Introdução à mecânica dos solos**. São Paulo: EDUSP/MCgraw-Hill, 1977. 509p.
- VILAR, O.M., BUENO, B.S. **Mecânica dos solos, Volume II**. São Carlos: Universidade de São Paulo/EESC, 1985. Publicação 080/94. 219p.
- WHITING, D., WILSON, C., CARD, A. Estimating Soil Texture. Colorado State University, 2003. CMG #214, 5p. Disponível em: <http://www.ext.colostate.edu/mg/gardennotes/214.html>. Acesso em 12 jul. 2011.

COMPACTAÇÃO DO SOLO E SUAS CAUSAS

A compactação reduz a capacidade do solo em reter água e fornecer oxigênio às raízes das plantas. Como viver com sede e sem ar?

A compactação do solo como assunto técnico pode ser considerada como uma atividade de interesse da engenharia civil e das ciências agrárias. Enquanto que para a primeira significa melhoria das condições de suporte para obras de construção em geral, para as demais implica na deterioração das condições de suporte biológico do solo, podendo resultar em declínio da produtividade ou até mesmo inviabilizar a produção agrícola, pecuária e florestal além de provocar danos ambientais importantes, relacionados com a erosão e com o ciclo das águas.

Do ponto de vista das atividades de produção do agronegócio, o que justifica a elaboração deste texto, a compactação dos solos é um fenômeno que compromete fundamentalmente sua *qualidade física*. Embora seja difícil definir

tecnicamente o que significa exatamente *qualidade física*³² de um solo, de forma prática poderia ser entendido que tal condição está relacionada com a sua capacidade de promover o adequado desenvolvimento radicular e conseqüente desenvolvimento vegetal para produção de alimentos, fibras e demais *commodities*, sem que seja afetada a sustentabilidade do meio. A sustentabilidade do processo é, no entanto, relativa, pois com a instalação da atividade agropecuária inicia-se a degradação física do solo. Assim, o conceito fundamental da sustentabilidade fica comprometido, pois na grande maioria das vezes é impossível recompor os solos na mesma velocidade com que eles veem sendo degradados. Torna-se, pois, imperioso conhecer seu comportamento para implementar ações de manejo que reduzam o ritmo da degradação, proporcionando tempo de reação ao meio no sentido de reverter o dano, se é que isto seja possível. Além disso, a redução

³² Qualidade física do solo é a integração das propriedades biológicas, físicas e químicas do solo, que o habilita a

exercer suas funções na plenitude (VEZZANI & MIELNICZUK, 2009).

do processo de compactação contribuiria positivamente com o ciclo da água, pois melhoraria a infiltração e diminuiria o escoamento superficial.

A compactação dos solos resulta de fenômenos que têm causas naturais ou artificiais. Dentre as mais importantes pode-se citar as alterações químicas, de umidade, temperatura e na aplicação de cargas sobre os solos, sendo que esta última é a causa mais importante e mais estudada. As teorias atuais preconizam que o fenômeno da compactação é causado principalmente pela retirada do ar e da água dos espaços porosos do solo, pelo rearranjo das partículas sólidas existentes no material, por sua compressão e deformação assim como por compressão dos fluidos (gases e líquidos) presentes no meio.

Para a ciência *mecânica de solos*, a ação de compactar o solo tem o objetivo de torna-lo estável e resistente, principalmente no caso de obras civis. A engenharia especializada explica muito bem como proceder neste sentido. Descrição detalhada de técnicas e equipamentos para tal finalidade é fartamente encontrada em textos direcionados ao assunto.

Em algumas situações a retração do volume de vazios do solo ocorre naturalmente, sendo esta condição conhecida como *fator interno* de compactação e é creditada aos fenômenos decorrentes da variação da umidade (umedecimento e ressecamento) e da temperatura (congelamento e descongelamento) os quais provocam correspondentes aumento de volume e posterior retração das argilas. A alternância deste processo, ao longo do tempo, induz à reorientação e conseqüente acomodação das partículas, reduzindo os espaços porosos. No entanto, outros fatores que originam compactação, chamados de *externos*, são creditados à ação

humana e podem ser subdivididos em duas modalidades: *naturais* e *mecânicos*.

4.1 Compactação natural

As causas naturais da compactação dos solos, embora decorrentes da ação humana, devem-se a fatores não diretamente relacionados com as máquinas ou com sua mobilização propriamente dita. Nesta classificação incluem-se o pisoteio provocado pelo gado no seu deslocamento em busca de alimentos e a ação das gotas de chuva transferindo sua energia cinética ao solo sem cobertura vegetal adequada, o que é particularmente importante nas regiões tropicais.

No caso da compactação provocada pelo pisoteio dos animais sobre as pastagens é de consenso dos especialistas que ela fique restrita às camadas superiores do solo. A tabela 4.1 mostra alguns valores relacionados com este fenômeno.

Tabela 4.1 Valores médios relacionados à pegada de algumas espécies animais e sua ação sobre o solo. Adaptado de Cañavate & Hernanz (1989).

Espécie	Pressão Exercida (10 ² kPa)	Menor Dimensão da Pegada (m)	Profundidade da Pegada: Solo Úmido (m)
Equinos	33	0,127	0,16
Bovinos	33	0,106	0,11
Ovinos	12	0,050	0,04
Humanos	20	0,076	0,08

Como seria de se esperar, o tipo de manejo da exploração pecuária (espécie animal) interfere no efeito resultante no solo, uma vez que a intensidade do pisoteio dos animais é variável entre cada modalidade. A tabela 4.2 mostra algumas relações deste fato.

Os efeitos do pisoteio sobre o solo também são observados pelas alterações na densidade aparente. A tabela 4.3 mostra alguns valores relacionados ao fato. Surpreendentemente nota-se que até mesmo o ser humano pode transformar a qualidade física do solo, através de atividades insuspeitas como o simples fato de passear em áreas de preservação ambiental.

Tabela 4.2. Efeito da atividade agropecuária na resistência à penetração de cone até 0,1m de profundidade. Adaptado de Sadeghian et al (1999).

Atividade		Resistência à Penetração (kPa)	
Pecuária	Corte - Pastejo Intensivo	325,6	
	Leite - Pastejo Intensivo	263,8	
	Cafeicultura		127,4

A tabela 4.4 mostra valores relacionados com a energia cinética das chuvas. É importante ressaltar que no manejo convencional, que revolve camadas de solo anualmente, ocorre mineralização de material orgânico, contribuindo para a desestabilização dos agregados. O impacto de gotas, nestas condições, maximiza a ação de desagregação.

4.2 Compactação mecânica

As atividades de produção agrícola, pecuária e florestal, necessitam que o solo ofereça pequena resistência à penetração do sistema radicular das plantas cultivadas, com o objetivo de explorar um volume adequado e assim suprir as necessidades de água e nutrientes, cumprindo os requisitos de fertilidade discutidos no capítulo 2. Além disso, é

necessário que nesta região de crescimento radicular haja poros suficientes para promover adequada movimentação de ar que suportará a respiração. Curiosamente, os equipamentos utilizados na mobilização e no cultivo, cujos objetivos principais seriam os de promover a desagregação do solo (aumentando o volume de vazios), são acusados de *protagonistas da compactação*.

Tabela 4.3. Efeito da atividade humana na densidade aparente e redução de porosidade do solo até 0,1m de profundidade. Adaptado de Sadeghian et al. (1999) e Lull (1959).

Atividade		Densidade (kN.m ⁻³)	Porosidade (%)	
Pecuária	Corte - Pastejo Intensivo	10,8	56,3	
	Leite - Pastejo Intensivo	10,3	57,6	
	Cafeicultura		8,0	70,7

Solo de Floresta		P	N	P	N
Pisoteio	Arenoso	13,4	9,9	48	60
	Franco Arenoso 1	12,7	10,4	50	59
	Franco Arenoso 2	10,4	8,9	59	65

Solo de floresta nos EUA: arenoso em Merrimac, franco arenoso 1 em Cheshire e franco arenoso 2 em Hlyoke, usados pela população como área de lazer (P) e em estado natural (N).

Defendem os especialistas que, com a frequente mobilização do solo pelos equipamentos agrícolas, a compactação seria desencadeada pela ação das bordas cortantes das ferramentas, devido à pressão que exercem no fundo do sulco de aração. Pode ocorrer, também, compactação da própria leiva, pela pressão exercida pelas aivecas e discos na ação de corte e movimentação, o que seria potencializado em solos de alto índice de plasti-

cidade e elevada umidade. Alguns dispositivos destorroadores (principalmente os de rolo operando em solos úmidos) potencializam o efeito compactador, pois produzem uma camada superficial que, ao secar, resulta em solo endurecido com baixa porosidade. A carga aplicada pelo rodado dos

tratores no sulco de aração também é um fator que promove o adensamento subsuperficial, levando a compactação a profundidades ainda maiores. Incluem-se, ainda, nas *causas mecânicas de compactação* o tráfego superficial de equipamentos de toda ordem.

Tabela 4.4 Energia transferida ao solo por impacto de gota de chuva. Adaptado de Cañavate & Hernanz (1989).

Tipo de Precipitação	Intensidade (mm.h ⁻¹)	Diâmetro Medio	Velocidade de Queda (m.s ⁻¹)	Número de Gotas (m ⁻² .s ⁻¹)	Energia Específica (W.m ⁻²)
Nevoeiro	0,12	0,09	0,03	6,2.10 ⁵	1,6.10 ¹⁰
Garoa	0,25	1	4,0	140	6.10 ⁻⁴
Chuva leve	1	1,25	4,7	260	3,2.10 ⁻³
Chuva média	4	1,60	5,6	460	1,7.10 ⁻²
Chuva forte	15	2	6,6	600	2,5.10 ⁻²
Tempestade	100	4	8,7	1000	1,2

Com o desenvolvimento do sistema de manejo denominado *semeadura direta*, que precociza o não revolvimento do solo fora da linha de semeadura, diferente do que ocorre com técnicas convencionais, observa-se que a compactação aparece em camadas menos profundas, confinando as raízes a uma região mais superficial (explorando menor volume de solo). Tal condição predispõe a cultura a adversidades climáticas relacionadas à umidade. Este fato é creditado à reduzida intensidade de mobilização associada ao tráfego superficial e à intensidade de exploração. A figura 4.1 ilustra os efeitos da compactação nos solos agrícolas, em diversas fases. Sequencialmente seriam afetados os macroporos com redução de suas dimensões, em seguida o fluxo de água e a movimentação dos gases, para que finalmente, em condições extremas, haja total rearranjo das par-

tículas comprometendo inteiramente o fluxo fluido. Tal fenômeno torna-se particularmente importante, não somente devido à interferência no volume do meio, mas também por que afeta as reações químicas na solução do solo, tornando tóxicas algumas substâncias essenciais ao desenvolvimento das plantas.

Mesmo sabendo destas implicações, o aumento da área cultivada em função da demanda por alimentos, muitas vezes exige que os solos sejam trabalhados com umidade inadequada, desobedecendo à recomendação técnica, por ser a atividade agrícola refém do clima. Pelo mesmo motivo, os equipamentos utilizados aumentam de tamanho e conseqüentemente de peso, com objetivo de reduzir custo e tempo de trabalho por unidade de área.

Embora exaustivas pesquisas sobre compactação do solo e seus efeitos sobre a produtividade das culturas continuem sendo realizadas, é difícil estimar seu impacto econômico, uma vez que as condições de campo são extremamente variáveis: tipos de solo, rotação de culturas e condições climáticas (principalmente quanto à umidade) podem assumir número de combinações inimagináveis. Muitos resultados destas investigações são inconclusivos ou controversos. Estas constatações podem significar que, apesar de todos os esforços, remediar o fenômeno da compactação seria um ato inócuo. Ou seja, ações como cultivos mais profundos com arados de aivecas, subsolagens ou escarificações, adição de produtos químicos e todas as demais tentativas podem ter causado modificações tão intensas na estrutura original dos solos, que elas seriam irreversíveis e por isso, não são mais limitantes para a produtividade.

4.3 Propagação de tensões no solo e o fenômeno de compactação

O solo é considerado um material granular e tal característica será assumida como contínua para que se possa estabelecer metodologia de estudo da propagação das tensões provocadas pelos equipamentos utilizados no manejo agrícola e pelos dispositivos de rodados dos veículos que transitam na superfície³³. É também necessário estabelecer que nos espaços porosos as tensões sejam nulas (ou equivalentes à pressão atmosférica), quando o solo está seco. Quando estes

espaços estiverem ocupados pela solução do solo o efeito do seu peso desencadeará o fenômeno da poropressão. Tal ação resulta na existência de uma tensão que é denominada *hidrostática*.

Assumindo tais condições, a propagação das forças aplicadas ao solo ocorreria através dos contatos entre as partículas, conforme descrito anteriormente no capítulo 3. A figura 4.2(a) representa um elemento cúbico hipotético imerso numa massa de solo. As forças que atuam em suas faces (com arestas de dimensão a) nos planos verticais e horizontais seriam respectivamente as normais N_v e N_h e os cisalhamentos T_v e T_h . Estas forças decorrem do fato de que a massa de solo contígua exerce um determinado peso sobre tal elemento (cubo de solo) e provoca o fenômeno que se convencionou chamar de *tensão geostática*.

Por consequência destas abstrações e em função de definições anteriores, para o solo seco, as tensões em cada uma das faces do elemento hipotético seriam:

$$\sigma_v = \frac{N_v}{a^2} \quad (4.1)$$

$$\tau_v = \frac{T_v}{a^2} \quad (4.2)$$

$$\sigma_h = \frac{N_h}{a^2} \quad (4.3)$$

$$\tau_h = \frac{T_h}{a^2} \quad (4.4)$$

³³ O texto e as considerações do item 4.4 são baseados em Lambe e Witman (1979). De acordo com os autores o conceito de tensões no solo não é mais

abstrato do que aquele que se aplica aos metais, que são compostos de minúsculos cristais e, em condições submicroscópicas, a magnitude das forças entre eles varia aleatoriamente de cristal para cristal.

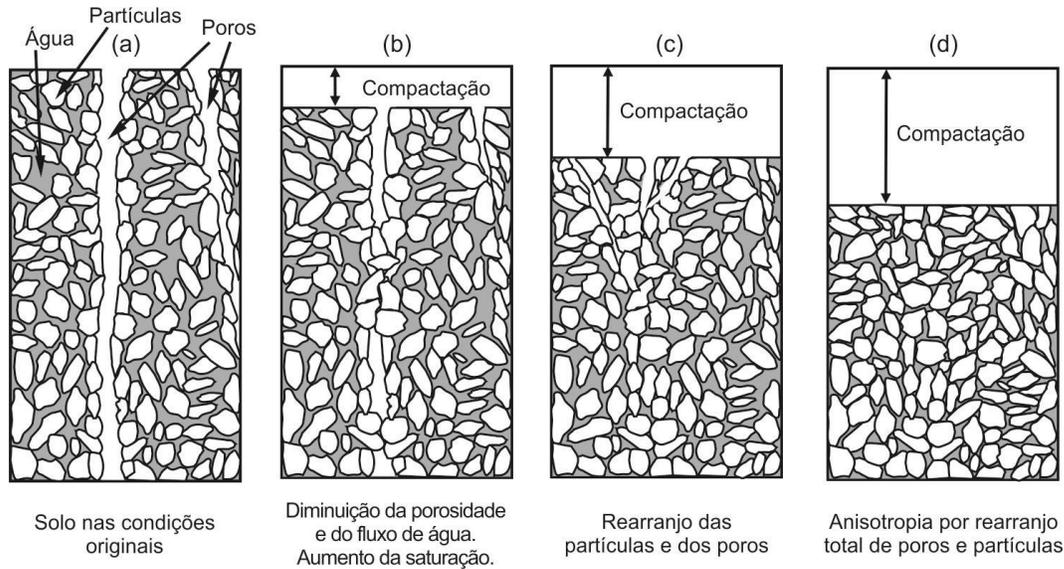


Figura 4.1. Representação esquemática do solo sob diversas condições de compactação. Adaptado de Horn (2003).

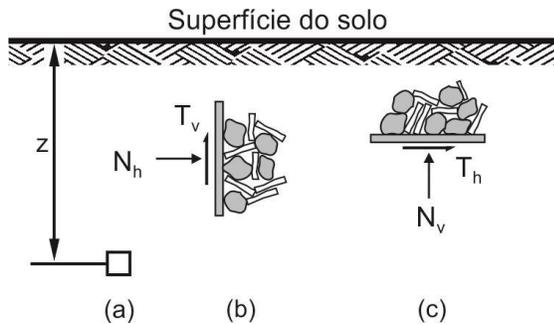


Figura 4.2. Esquema de um elemento do solo (a) e das forças que atuam em suas superfícies. Adaptado de Lambe & Withman (1979).

Considerando um plano em corte passando pelo solo, como representado na figura 4.3, verifica-se que ele atravessa tanto os espaços porosos como as partículas que compõe o material. Em cada um dos pontos em que as forças são transmitidas entre as partículas, pode-se representar suas componentes em relação a um par de eixos ortogonais. Macroscopicamente, as tensões

normais (σ) e de cisalhamento (τ) seriam determinadas pela razão entre a somatória das forças normais e tangenciais, e a área total da secção do plano em questão.

Para os interesses da agricultura, a ação das tensões a que se submete o solo provocam alterações em profundidades muito menores do que aquelas com as quais se trabalha nas obras da construção civil (geralmente inferiores a 1 metro). Deste ponto de vista, as tensões sobre as quais recaem as atenções são aquelas provocadas pelas cargas externas (ou carregamento) aplicadas na superfície e que modificariam o estado de porosidade dos solos. Portanto, as tensões geostáticas serão desconsideradas no que se refere aos seus efeitos, embora o comportamento do solo, mesmo a pequenas profundidades, continue apresentando as mesmas respostas físicas.

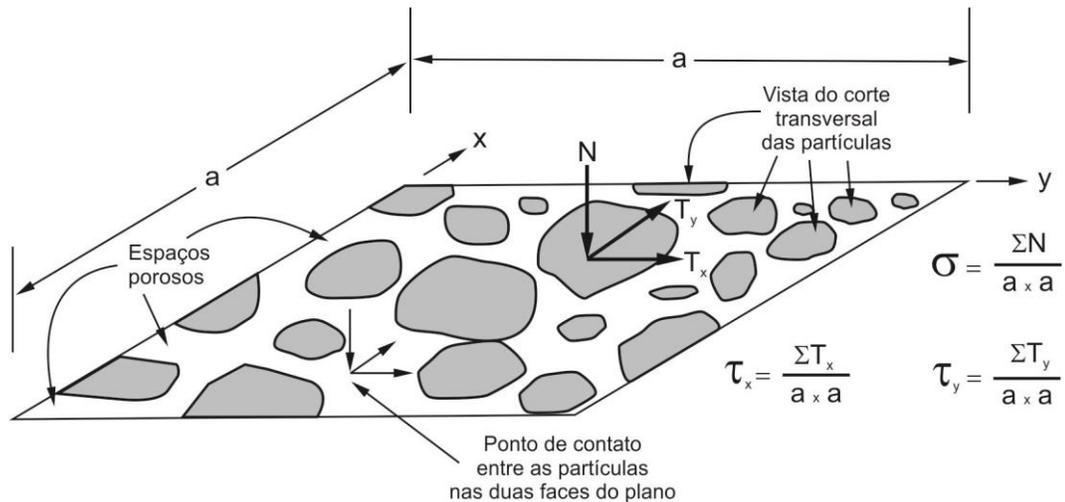


Figura 4.3. Representação de um plano em corte, passando pelo solo, como um sistema granular. Adaptado de Lambe & Withman (1979).

Para estudar e determinar as modificações das cargas externas na subsuperfície utilizam-se os conhecimentos desenvolvidos na teoria da elasticidade. Para tanto, considera-se que o solo, hipoteticamente, possua as seguintes propriedades:

- **Homogeneidade:** possui propriedades iguais em todas as direções;
- **Isotropia:** as propriedades não variam com a direção;
- É material perfeitamente elástico e contínuo;
- Permite deformações infinitesimais devido ao carregamento (que é flexível) e a distribuição das tensões geradas é uniforme;
- Trata-se de um semi-espaço infinito.

Com base nestas suposições e uso da teoria, seria possível determinar as tensões normais (σ_v e σ_h descritas no conjunto de equações de 4.1 a 4.4) causadas pelo carregamento, em qualquer ponto abaixo da superfície. A figura 4.4 mostra, teoricamente, a distribuição de tensões num meio hipotético. Observa-se que a partir do carregamento pontual P (unitário), as

tensões propagam-se no meio (cujas partículas infinitesimais são representadas pelas esferas) de forma homogênea, mas sua intensidade é amortecida com o aumento da profundidade. Além disso, os valores proporcionais são distribuídos em ambos os sentidos. Teoricamente a propagação das tensões é infinita, mas, na prática, considera-se que valores menores que 10% da carga original de carregamento não causam efeitos importantes.

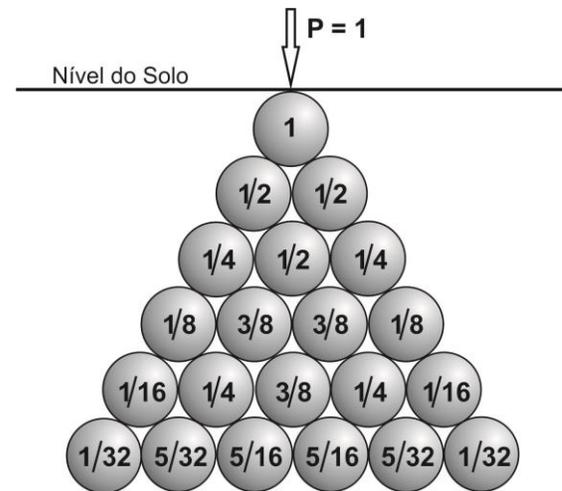


Figura 4.4. Distribuição proporcional das tensões num meio ideal com carregamento pontual.

Vários métodos são propostos para determinar as tensões resultantes de carregamentos superficiais. Dentre eles, aquele que mais se adapta às necessidades da agricultura parece ser a solução analítica proposta por *Boussinesq*³⁴, que trata de semi-espaço infinito. A figura 4.5 mostra esquematicamente os parâmetros utilizados por ele nos seus estudos. As equações 4.5 a 4.11 descrevem as três dimensões das tensões vertical (σ_z), horizontal-radial (σ_r) e transversal (σ_t).

$$\sigma_z = \frac{3P}{2\pi z^2} \cos^5 \theta \quad (4.5)$$

A equação 4.5 pode ser transformada em função das cotas do ponto considerado (figura 4.5) e escrita na forma da equação 4.6.

$$\sigma_z = \frac{P}{z^2} \cdot \frac{0,48}{\left[1 + \left(\frac{r}{z}\right)^2\right]^{5/2}} \quad (4.6)$$

$$\sigma_r = \frac{P}{2\pi z^2} \left[3\cos^3 \theta \cdot \operatorname{sen} \theta - (1 - 2\nu) \frac{\cos^2 \theta}{1 + \cos \theta} \right] \quad (4.7)$$

em que:

ν – módulo de Poisson, e

$$\sigma_t = -(1 - 2\nu) \frac{P}{2\pi z^2} \left[\cos^3 \theta - \frac{\cos^2 \theta}{1 + \cos \theta} \right] \quad (4.8)$$

Se o ponto em que se deseja determinar o acréscimo de tensão está posicionado diretamente abaixo do ponto de aplicação do carregamento,

isto é, quando $r = 0$ e, portanto, $\theta = 0$, as equações de 4.6 a 4.8 ficam reduzidas a:

$$\sigma_z = \frac{0,48P}{z^2} \quad (4.9)$$

$$\sigma_r = \frac{1}{2} \left(\frac{P}{\pi z^2} + 2\nu - 1 \right) \quad (4.10)$$

$$\sigma_t = -\frac{P(1 - 2\nu)}{4\pi z^2} \quad (4.11)$$

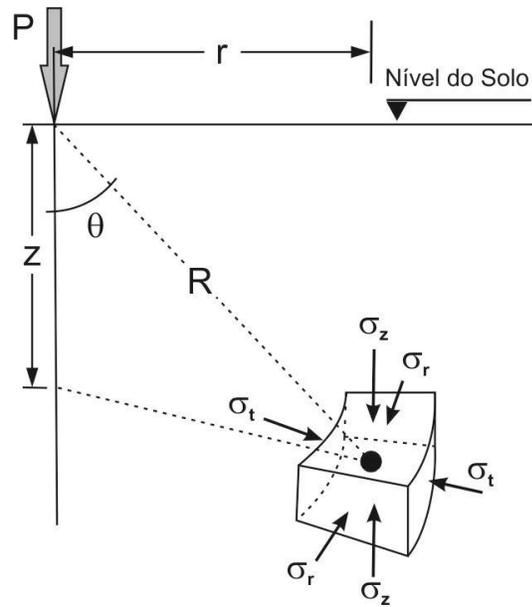


Figura 4.5. Representação esquemática das tensões num ponto do solo, devido ao carregamento pontual.

Esta condição (carga pontual) poderia ser obtida na prática para as operações de mobilização do solo, em que a borda cortante dos discos e aivecas atuam exercendo carregamento praticamente pontual, pois sua forma caracteriza-se por tocar o solo em dimensões muito reduzidas no que se refere à projeção da área. A figura 4.6 ilustra a situação, mostrando o acréscimo de tensões provocado por equipamento agrícola (grade aradora,

³⁴ **Valentin Joseph Boussinesq** (1842-1929): matemático e físico francês que dedicou seus estudos a diversas áreas do

conhecimento, principalmente ao calor, à óptica, capilaridade, elasticidade e resistência dos materiais.

por exemplo) cujas especificações técnicas indicam que suas ferramentas (discos) poderiam ser carregadas com peso da ordem de 2kN.

A figura 4.7 considera³⁵ que a área de contato disco/solo seja da ordem de $10^{-3}m^2$. Assim, a pressão exercida pelo equipamento ao longo da borda dos discos em contato com o solo seria de 2MPa. Como cada disco penetra cerca

de $\frac{1}{3}$ de seu diâmetro (0,28m), as linhas de pressão mostradas na figura 4.7 terão seu ponto inicial de atividade partindo dessa profundidade.

Quando o carregamento for provocado pelos rodados de tratores e demais equipamentos usados nas atividades rurais, transitando na superfície, a área de contato deve ser considerada e, neste caso, não se trataria de carregamento pontual.

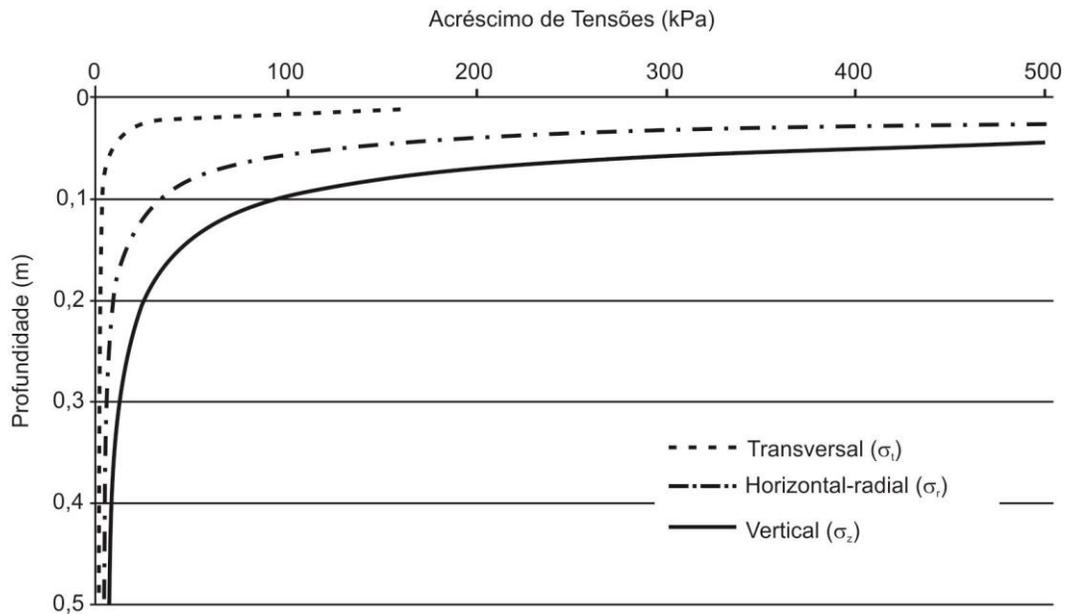


Figura 4.6. Linhas de acréscimo de tensão provocada pela ação dos discos de uma grade aradora, de acordo com as equações para tensões pontuais de Boussinesq.

Estudando as equações propostas por Boussinesq, o matemático A. E. H. Love³⁶ desenvolveu uma solução destinada a carregamentos provocados por dispositivos circulares.

Os tratores agrícolas equipados com rodados pneumáticos deixam uma impressão no solo, cuja forma se aproxima de uma elipse, como representado pela linha tracejada na figura 4.7.

No entanto, como se observa na imagem, a parte mais escura delimitada pelo círculo indica o maior afundamento do pneu, o que sugere ser esta a região em que a carga fica concentrada. Desta forma, considerando as devidas aproximações, pode-se assumir a área de contato resultante como um círculo e aplicar a solução de Boussinesq-Love.

³⁵ Suposições: equipamento com discos recortados, de diâmetro aproximado de 0,85m e espessura $9 \times 10^{-3}m$. A penetração do disco no solo é de $\frac{1}{3}$ do seu diâmetro; a borda afiada tem uma espessura de 20% da espessura

do disco. Com os recortes na periferia dos discos, apenas metade da borda tocava o solo.

³⁶ **Augustus Edward Hough Love** (1863-1940), matemático britânico que ganhou notoriedade por seus estudos sobre a teoria da elasticidade.

A figura 4.8 mostra o esquema de uma placa circular e os parâmetros utilizados nas equações 4.12 e 4.13, que descrevem o acréscimo de tensão vertical ao longo de uma linha imaginária que atravessa o centro da placa, ou seja, para a situação de $X = 0$.

A tensão q , aplicada na placa mostrada na figura 4.8 é:

$$q = \frac{P}{\pi R^2} \quad (4.12)$$

$$\sigma_z = q \left\{ 1 - \frac{1}{\left[1 + \left(\frac{R}{z} \right)^2 \right]^{3/2}} \right\} \quad (4.13)$$

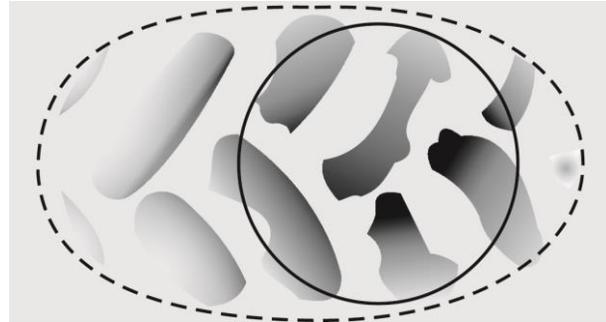


Figura 4.7. Representação da “pegada” de um rodado pneumático agrícola carregado sobre um tanque de solo por uma prensa hidráulica. As áreas mais escuras mostram a região de maior afundamento. Adaptado de Mazetto et al. (2004).

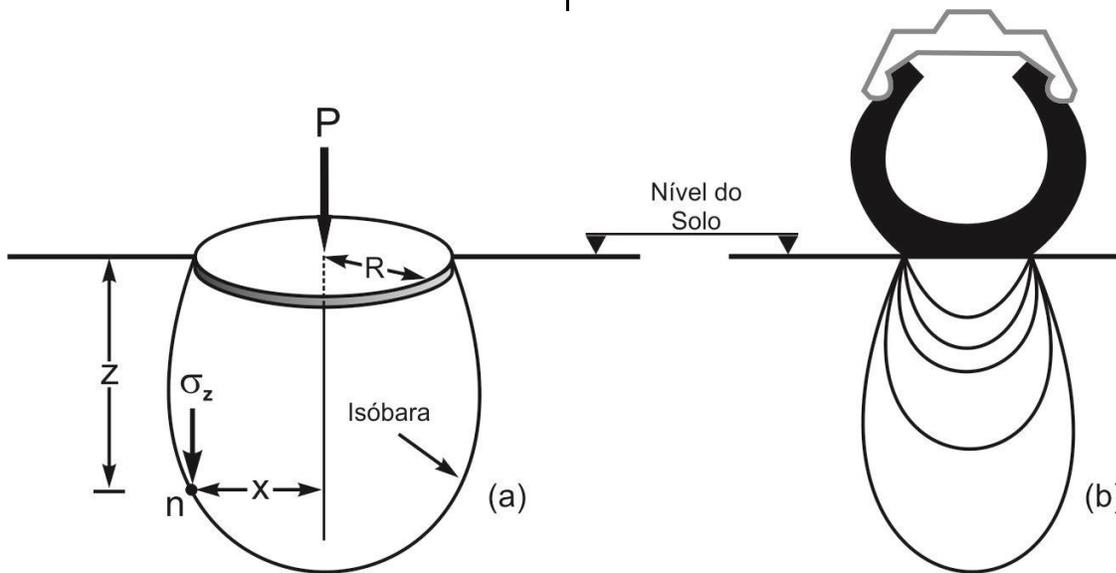


Figura 4.8. Carregamento circular: (a) provocado por uma placa ideal de raio R , no ponto n , em função da aplicação da força P , uniformemente distribuída pela sua superfície e (b) a representação teórica da distribuição das isóbaras, constituindo o bulbo de tensões, sob o rodado pneumático de um trator, em corte radial.

Para as demais condições, onde $X > 0$, a solução mais adequada seria gráfica, utilizando os ábacos da figura 4.9. Neste caso, quando o ponto para o qual se deseja determinar o incremento de tensão (vertical ou horizontal) está

afastado da linha central da placa circular, utiliza-se o chamado *fator de influência* (I) de acordo com a equação 4.14.

$$\sigma = q \cdot I \quad (4.14)$$

A determinação do fator de influência é feita por interpolação de valores nos ábacos da figura 4.9. No ábaco da esquerda, relativo às tensões verticais, nota-se o ponto indicado pelo valor 0,36, que foi obtido para a situação hipotética em que a placa que recebe o carregamento tem 0,6m de diâmetro. Deseja-se obter o valor do incremento de tensão vertical num ponto situado à profundidade de 0,4m e distante 0,25m do centro da placa.

Concordando com o que se mostra na figura 4.4, a linha contínua que envolve a placa circular representada na figura 4.8(a) é denominada *isóbara* e contém todos os pontos nos quais se verifica incremento de tensões verticais de mesma magnitude. A representação em corte radial do rodado pneumático de um trator na figura 4.8(b) mostra o conjunto de isóbaras formado sob a área de contato com o solo, o qual recebe o nome de *bulbo de tensão*.

O acúmulo de tensões na região abaixo da superfície do solo agrícola, evidentemente, provocará rearranjo de suas partículas e consequente diminuição dos espaços vazios. Como mostrado na figura 4.1, este processo resulta em compactação e consequente aumento de peso específico do solo.

4.4 Ensaios e determinação da compactação

O comportamento do solo e sua resposta aos métodos de compactação, assim como os resultados apresentados na figura 4.10 concordam com a conhecida e clássica *curva de compactação de solos*, mostrada na sua concepção generalizada na figura 4.11. A abscissa do grá-

fico é relativa à umidade ($U\%$) do solo no momento do ensaio, enquanto que a ordenada representa sua massa específica (γ).

O ponto de inflexão de cada curva determina a *umidade ótima* (U_{ot}), ou seja, a umidade em que será possível obter compactação máxima com o mínimo de energia. Portanto, nesta condição será também obtida a maior massa específica para cada solo sob ensaio.

A figura 4.10 mostra o comportamento de um solo que foi submetido a operações de compactação em laboratório e no campo e as consequências no seu peso específico, em função da variação da umidade.

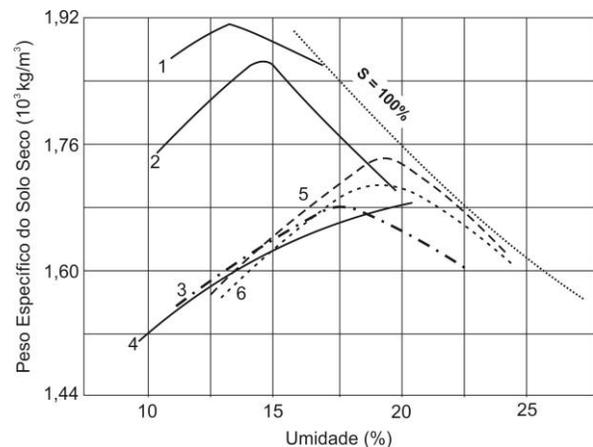


Figura 4.10. Comportamento do solo em função da compactação provocada em laboratório e medida no campo. (1) Compactação estática em laboratório, 13.790 kPa; (2) AASHO³⁷ modificado; (3) ASSHO padrão; (4) Compactação estática em laboratório, 1.379 kPa; (5) Compactação de campo, causada por compactadores de rodado pneumático, em 6 passadas; (6) Compactação de campo, causada por compactadores “pé de carneiro”, em 6 passadas. Adaptado de Lambe & Withman (1979).

³⁷ Sigla para *American Association of State Highway and Transportation Officials*, responsável pela criação da metodologia de testes para determinar a influência do

tráfego na deterioração do pavimento das estradas nos Estados Unidos da América do Norte (EUA).

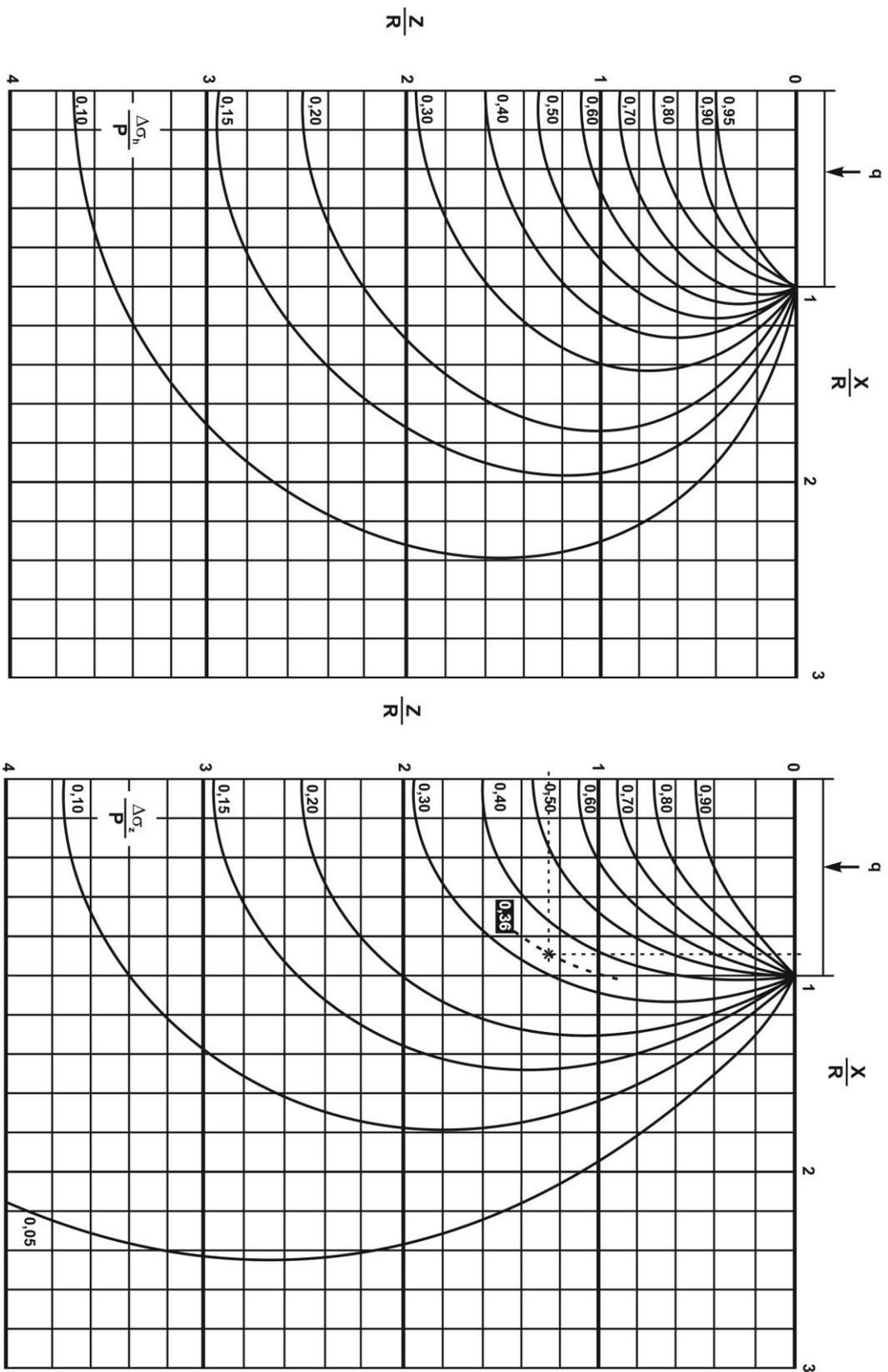


Figura 4.9. Tensões induzidas por carregamento uniforme em áreas circulares: tensões verticais à esquerda e horizontais à direita (neste caso para $\nu = 0,45$). Adaptado de Lambe & Whitman (1979)

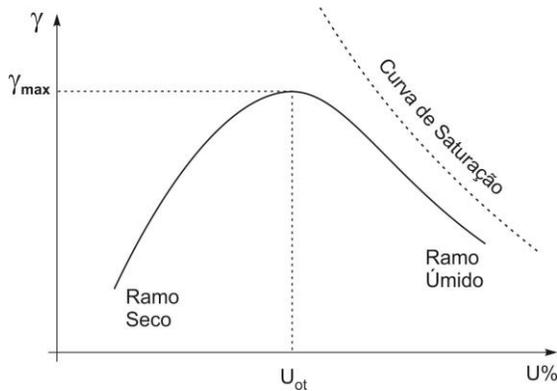


Figura 4.11. Comportamento típico de um solo aos esforços mecânicos de compactação em função da umidade e da energia utilizada no ensaio.

A explicação para este comportamento ainda é controversa, embora sua discussão tenha se iniciado nos anos 1930, com estudos de Proctor³⁸. Os fenômenos determinantes à suscetibilidade de um solo à compactação e a forma da curva observada na figura 4.11 envolvem um grande número de variáveis, que estão teoricamente relacionadas com as tensões entre as partículas, capilaridade, pressão das fases líquida e gasosa, permeabilidade, relações físico-químicas das cargas elétricas entre as partículas e a solução do solo, dentre as mais importantes.

Com base nas propostas de diversos autores e suas suposições teóricas a forma da curva de compactação pode ser resumidamente explicada desta forma: no chamado *ramo seco* (ascendente) a presença de água primeiramente provoca uma hidratação das partículas envolvendo-as com uma fina película que em seguida lubrifica o contato entre elas permitindo rearranjo da estrutura e diminuindo o espaço vazio ali existente. No ponto de umidade ótima e máxima massa específica (na inflexão da curva), o estado físico do material é *não saturado* e os capilares são interrompidos, dificultando a expulsão do ar existente nos espaços vazios, para uma dada energia

de compactação. Com o incremento da umidade e mantendo-se a quantidade de energia, a curva passa para o *ramo úmido* (descendente) e a ação da água afastaria as partículas entre si, diminuindo a tensão capilar, além de amortecer a energia de compactação uma vez que existiria proporcionalmente mais líquido do que sólido na massa de solo. Como resultado obtém-se menores massas específicas e solos mais plásticos.

Assim, em solos saturados (ver *ramo úmido* mostrado na figura 4.11, cuja tendência é um estado próximo da curva de saturação – $S = 100\%$) admite-se que a sua compressibilidade está relacionada muito mais com a expulsão de líquido de seus espaços intersticiais e consequente diminuição de volume, do que com a compressão das outras fases (sólida ou gasosa). Este fenômeno também é conhecido como *adensamento*. A analogia mecânica deste processo é mostrada na figura 4.12. A mola representa a estrutura do solo (seu esqueleto sólido) responsável pelo suporte das tensões efetivas. O recipiente que contém a mola é hermético e preenchido com água (admitida incompressível) que representará o líquido componente da solução do solo, ocupando os vazios. A torneira existente na tampa do recipiente será o correspondente da permeabilidade. Na situação (a), existe equilíbrio no sistema, ao qual é imposta uma tensão de magnitude σ'_0 . A pressão neutra existente no líquido é u_0 e a tensão efetiva é σ' .

Ao crescer a tensão de $\Delta\sigma'$, mantendo a torneira fechada, como representado em (b), verifica-se que toda a tensão será suportada pela água. Porém se a torneira for levemente aberta, como em (c), a água começa gradativamente a escoar (drenar) e uma parte do acréscimo de tensão passará a ser suportado pela mola. Assim, observa-se proporcional diminuição de volume. Mantendo esta condição, ao longo do tempo o acréscimo de

³⁸ **Ralph Roscoe Proctor** (1894-1962) engenheiro civil que atuou nos EUA em construção de barragens e

desenvolveu o ensaio de compactação conhecido como Teste de Proctor.

tensão será dissipado na água (d), expulsando um volume tal, que dará condição de novo equilíbrio ao sistema. Nesta situação caberá à mola suportar

integralmente a tensão atuante ($\sigma'_0 + \Delta\sigma'$). Daí em diante será estabelecido um novo volume, menor que o inicial.

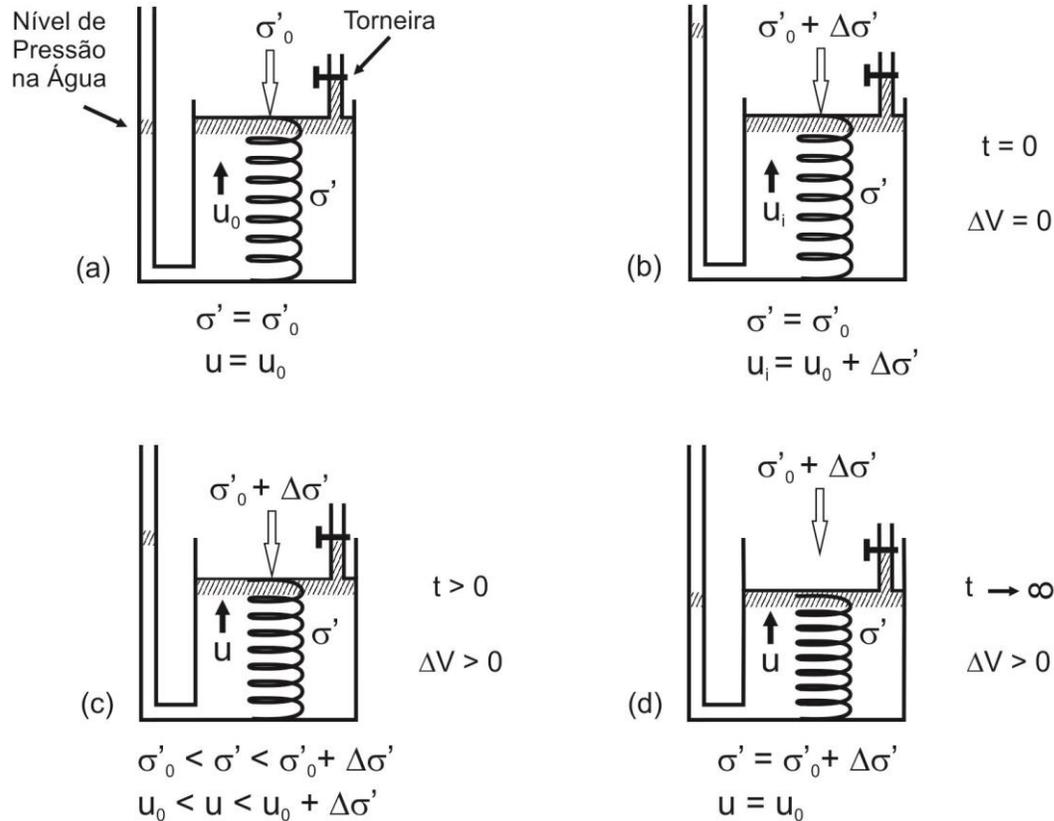


Figura 4.12. Analogia mecânica do processo de adensamento do solo saturado. Adaptado de Bueno & Vilar (1984)

A *susceptibilidade* de compactação de um solo é função de sua composição granulométrica que será a responsável pela forma como as partículas se acomodarão e como se processará a drenagem da água dos seus espaços vazios. A figura 4.13 procura representar de maneira genérica o comportamento esperado para materiais de diferentes composições, considerando as proporções de areia, silte ou argila, de acordo com o triângulo textural (figura 3.1).

O comportamento mostrado na figura 4.13 pode ser explicado pela composição granulométrica do material. Nos solos arenosos (grossos) a

água e os gases fluem livres pelos macroporos (vazios predominantes) enquanto que as forças externas exercem sua ação sem que haja resistência importante, devido à alta permeabilidade. Ocorre deformação do esqueleto sólido e em casos extremos (que não são comuns nas atividades agrícolas) pode ocorrer quebra dos grãos proporcionando deslocamento relativo entre eles. No caso de solos argilosos a compressibilidade é alta, pois além de seu esqueleto sólido apresentar maior complexidade em relação às areias, os grãos são “escamosos” ou alongados. Quando submetidos a pressões externas eles

podem fletir ou dobrar. Associado a isto, a baixa permeabilidade dificulta o trânsito de fluidos nos espaços vazios o que transfere, pelo menos por instantes, as tensões aos líquidos.

4.4.1 Ensaio de compactação

Como mostrado pelas figuras 4.11 e 4.13, existe uma relação entre a massa específica do solo seco e sua umidade, assim como com a energia utilizada para se obter variação de tal parâmetro. Uma série de artigos relativos à compactação de aterros publicados em 1933 pelo engenheiro Ralph

Proctor, definiu as constatações da frase anterior, que é considerada um dos mais importantes princípios da Mecânica dos Solos. Assim, o comportamento do solo com relação aos valores obtidos para a densidade específica seca (M_s , também chamada de massa específica - γ), definida pela equação 3.10, quando ele é compactado em diferentes condições de umidade pode ser representado pela figura 4.14. Diz-se que o ponto A define o estado de compactidade de um solo pelas coordenadas cartesianas M_A e U_A , em relação às suas curvas de saturação - S.

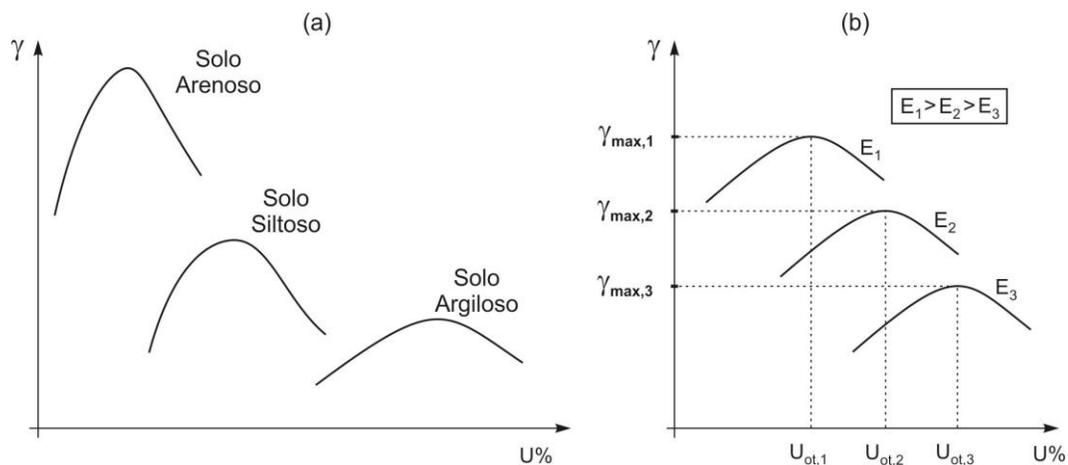


Figura 4.13. Diferentes comportamentos quanto à susceptibilidade à compactação, apresentada por solos de diferentes granulometrias, em função da umidade ótima média (a); a influência da energia E_n aplicada ao trabalho de compactar um solo e as alterações no seu comportamento quanto à umidade ótima (b). Adaptado de Vargas (1977) e Bueno & Vilar (1984).

O procedimento para a determinação experimental destas condições (massa e umidade), no Brasil, é normalizado pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) de acordo com a norma NBR 7182:1986, denominado *Ensaio de Compactação*.

O ensaio de compactação deriva da proposta inicial de Proctor, que ficou conhecida inicialmente por *Ensaio de Proctor* e posteriormente padronizada pela AASHO como *Proctor Standard*. A figura 4.15 mostra uma representação artística

do equipamento utilizado para realização das determinações, assim como esquemas em corte do *molde* e do *soquete* com dimensões padronizadas pela ABNT. Necessidades impostas pelo uso do método alteraram as medidas do molde e a massa do soquete, em valores que praticamente dobram seus volume e massa. Assim, o equipamento menor é composto por um molde chamado de *Proctor* e soquete pequeno e o maior, respectivamente chamados de CBR e soquete grande.

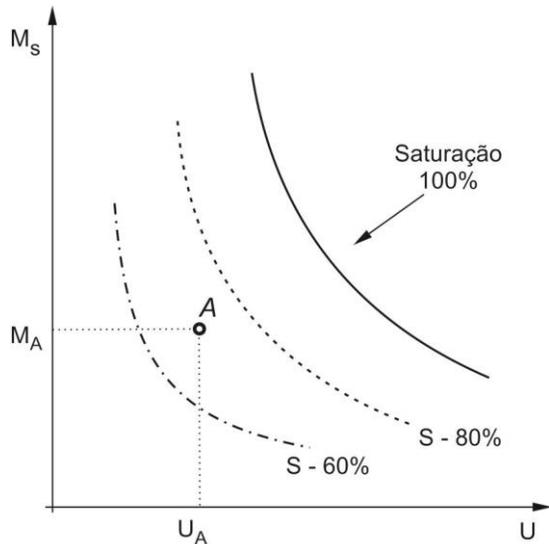


Figura 4.14. Densidade (ou massa) específica de um solo seco em relação à umidade em que foi compactado. Adaptado de Vargas (1977).

O ensaio consiste em adequar uma massa de solo, de acordo com as instruções, e provocar a sua compactação em etapas (divididas por partes do volume a ser compactado), mediante golpes do soquete caindo de uma altura conhecida. Ao final determina-se a massa do bloco de solo formado dentro do molde e sua umidade. Sendo conhecidos o volume do molde e a umidade do solo para cada ensaio, determina-se a densidade específica seca do solo. Em seguida os resultados são apresentados em gráficos cartesianos, contendo as curvas de compactação e de saturação do solo que se mostram semelhantes ao apresentado na figura 4.16. As linhas e os valores nela apresentados são indicativos da ordem de grandeza para cada material uma vez que, frequentemente, há sensíveis diferenças para amostras da mesma procedência.

Como mostra a figura 4.16, cada tipo de solo, quanto à origem e composição granulométrica, apresenta uma característica própria quando

o objetivo é determinar a umidade ótima de compactação e sua densidade específica máxima, para uma dada energia utilizada no processo. Assim, é impossível generalizar algo sobre a densidade específica quando se tenta caracterizar compactação, principalmente se o meio for utilizado para produção agropecuária. Sabe-se que diferentes espécies vegetais apresentam sensibilidades distintas às condições oferecidas pelo solo, relativas à resistência à penetração de suas raízes, exigência à umidade, porosidade, etc.

No entanto, conhecer o comportamento do solo e sua reação à imposição de tensões na superfície em relação à quantidade de água presente no meio poderia indicar maneiras de minimizar a compactação, principalmente aquela causada pela utilização de máquinas agrícolas e pelo tráfego de equipamentos na superfície do terreno.

4.4.2 Pré-adensamento ou consolidação

O conceito de *pré-adensamento* ou *pré-consolidação* restringe-se a situações onde o solo conserva suas características originais, ou seja, os ensaios que definem tal grandeza são realizados em amostras indeformadas que conservam não somente sua umidade e massa específica aparente, mas também sua estrutura e procuram determinar as tensões a que tal meio esteve submetido em ocasiões anteriores. O significado da determinação está relacionado com a *máxima pressão a que o solo já esteve submetido na natureza*. Seria o caso de, por exemplo, ter havido sobre ele, num período geológico anterior, uma camada de material cujo peso houvesse provocado tensão de compressão e no presente, não mais exista, pois tal camada teria sido, de alguma maneira, erodida.

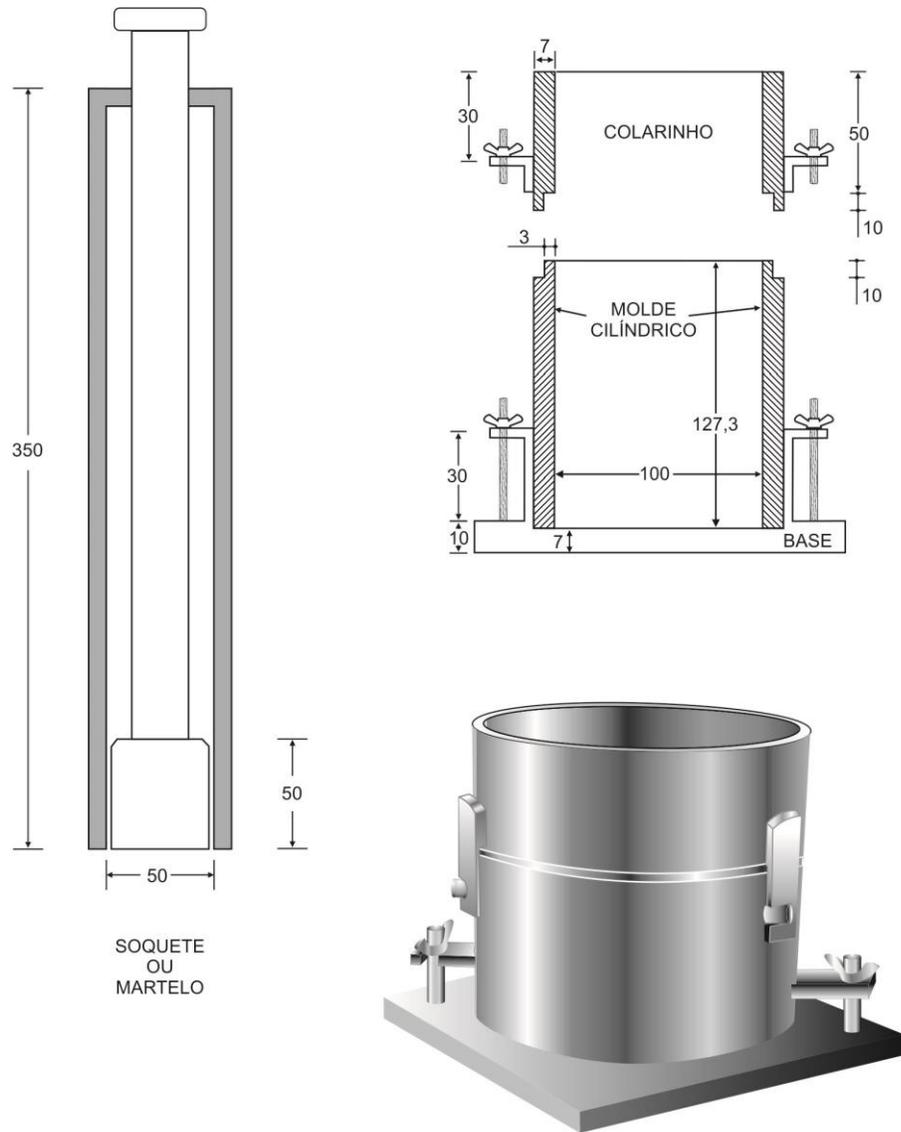


Figura 4.15. Equipamento utilizado para realização do ensaio de compactação de acordo com a norma NBR 7182:1986. Massa do soquete (pequeno) – 2,5 kg; Altura da queda do soquete – 0,305m; Volume do molde cilíndrico (Proctor) - 1,0 L. Adaptado de ABNT (1986). Dimensões em milímetros.

Há casos em que tais ensaios são realizados em material amolgado e procuram simular o comportamento do solo quando ele for comprimido pela ação do peso provocado pela sobreposição de camadas sucessivas como ocorre na construção de grandes aterros. O ensaio que procura simular tal situação poderia ser chamado de *ensaio de compressão confinada*.

No entanto, a Mecânica dos Solos generalizou seu nome, para as duas situações, como *ensaio de compressão edométrica*.

Sua importância é primordial nas argilas e permite calcular recalques ao longo do tempo. Os solos argilosos submetidos a cargas compressivas apresentam o comportamento representado na parte superior da figura 4.17. Ela

mostra de forma genérica o comportamento de uma amostra indeformada submetida a carregamentos crescentes. Neste caso, a resposta seria semelhante à linha *ABC*. Em seguida o carregamento é retirado e observa-se um discreto aumento de volume, como descreve a linha *CD*.

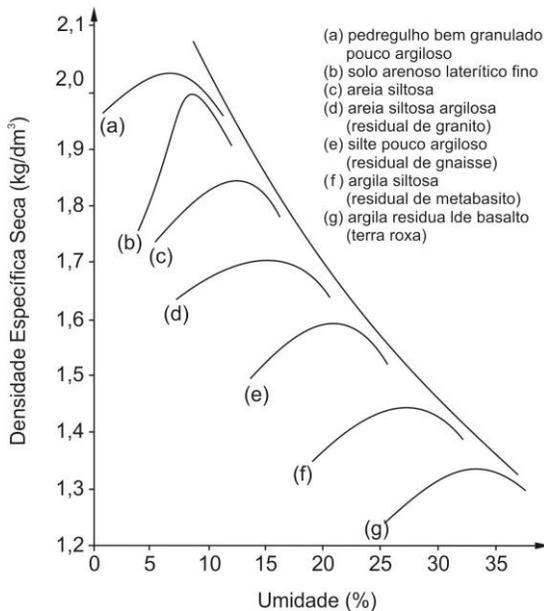


Figura 4.16. Curvas obtidas da realização de ensaio de compactação com alguns solos do Brasil. Adaptado de Pinto (2006).

Novamente carregado, o solo volta a diminuir de volume, agora de acordo com a linha *DE* e ao atingir o ponto *E*, continua a contrair-se numa razão semelhante à observada na primeira sessão de compressão resultando na linha *EF*. Como pode ser observado, a segunda parte da curva (*DEF*) assemelha-se à primeira (*ABC*) e tornará a se repetir caso o procedimento seja novamente imposto por outras vezes ao solo, mediante aplicação de cargas maiores. Tal comportamento sugere que o material, desde o primeiro carregamento, comporta-se de maneira semelhante à anterior, quando se trata de redução de volume, retornando à mesma condição de carregamento antes de começar o novo processo de adensamento. Esta constatação dá origem ao

método de determinação do valor da tensão de pré-adensamento mostrada na parte inferior da figura 4.17. Após ciclos sucessivos de descompressão e recompressão observa-se que a redução do índice de vazios varia linearmente com o logaritmo da carga aplicada ao solo. Este trecho da curva recebe o nome de *reta virgem* e é representado pela linha tracejada.

A estimativa do valor da tensão de pré-adensamento (ou pré-consolidação) foi proposto por Casagrande (ver página 57) e o procedimento para tal deriva do ensaio de compressão edométrica que consiste na compressão de um solo, confinado em um molde cujo objetivo é impedir qualquer deformação lateral, como mostra o esquema da figura 4.18. Quando ele é utilizado para amostras de solo indeformadas recebe o nome de *ensaio de adensamento*.

O corpo de prova é colocado dentro do anel rígido, confinado na parte superior e inferior por duas pedras porosas que têm a função de permitir a drenagem da água nele existente. O anel tem altura aproximadamente três vezes maior que o corpo de prova para minimizar o efeito do atrito do cabeçote que receberá a carga *P*. O carregamento ocorre em etapas, sendo que para cada carga observa-se a deformação até que ela torne-se praticamente nula. O tempo que o material permanece em ensaio será dependente de sua composição granulométrica, podendo variar de alguns minutos (para as areias) a dezenas de horas para as argilas.

Os resultados obtidos para as deformações provocadas por acréscimo de carga darão origem a um gráfico semilogarítmico. Como mostrado na parte inferior da figura 4.17, identifica-se a região da curva em que se encontra o maior raio de curvatura e por este ponto são traçadas uma reta horizontal *h* e outra tangente *t*. A seguir determina-se a bissetriz *b* do ângulo α formado entre as duas primeiras retas. Prolongando-se a reta virgem

do gráfico (linha pontilhada) obtém-se a intersecção P com a bissetriz. A tensão correspondente à abscissa deste ponto é considerada a tensão de pré-adensamento (σ'_p) deste solo.

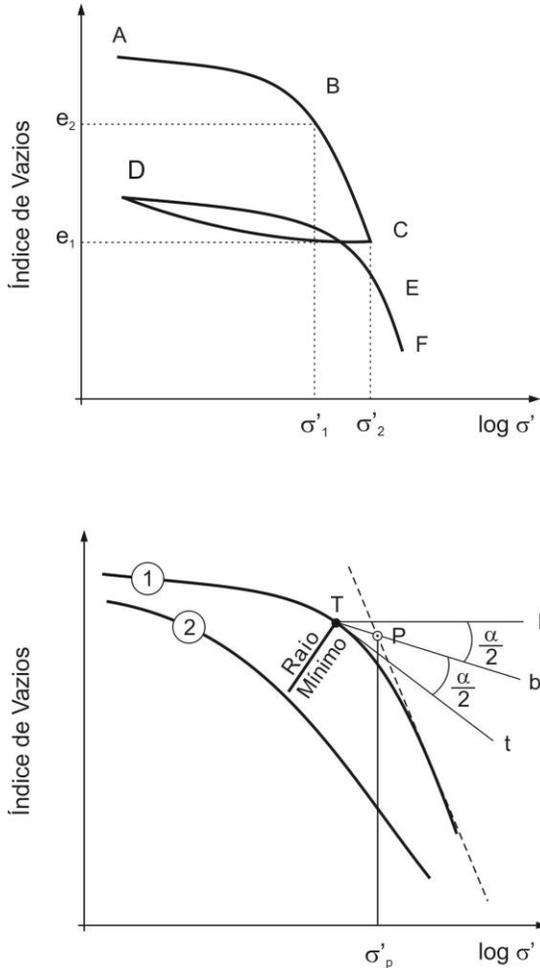


Figura 4.17 Efeito do carregamento e do recarregamento sobre amostra de solo indeformada (superior) e método de determinação da tensão de pré-adensamento (inferior). Adaptado de Vargas (1977) e Pinto (2006).

A reta virgem obtida nas condições do ensaio tem um coeficiente angular que é denominado de *índice de compressão* (C_c) e é obtido por:

$$C_c = \frac{e_1 - e_2}{\log \sigma'_2 - \log \sigma'_1} \quad (4.15)$$

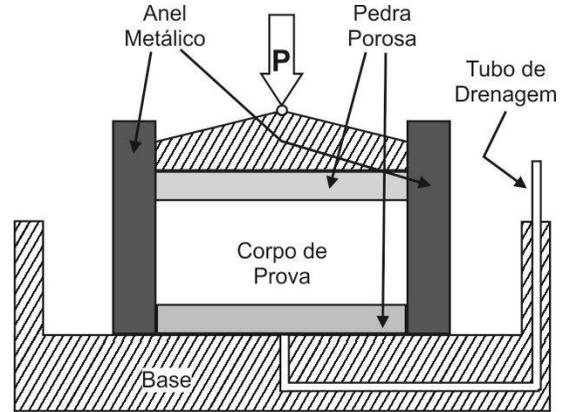


Figura 4.18. Esquema de uma câmara de ensaio de compressão edométrica.

A variação da altura do corpo de prova é conhecida como *recalque* (ρ) e pode ser calculada por:

$$\rho = \frac{e_1 - e_2}{1 + e_i} \cdot H_1 \quad (4.16)$$

em que:

H_1 – altura inicial do corpo de prova.

Substituindo a equação 4.15 em 4.16, pode-se calcular o recalque.

$$\rho = \frac{C_c \cdot H_1}{1 + e_i} \cdot \log \frac{\sigma'_2}{\sigma'_1} \quad (4.17)$$

Do ponto de vista prático, pode-se considerar que menores valores absolutos para o índice de compressão (C_c) serão encontrados em solos mais resistentes à variação de volume, portanto menos sujeitos a compactação quando submetidos a cargas estáticas.

Na parte inferior da figura 4.17 a linha marcada com o número 2 representa o comportamento de uma amostra totalmente amolgada (o que significa que sua estrutura original foi totalmente destruída), semelhante ao que acontece na camada de aradura dos solos agrícolas.

No caso de serem mantidas as mesmas condições de umidade natural e quando as amostras (amolgada e indeformada) são saturadas, o índice de vazios encontrado em cada uma delas é o mesmo. No entanto, como mostra a figura, a compressibilidade da amostra amolgada é maior e a tensão de pré-adensamento deixa de existir.

Na agricultura, a observação do fenômeno do pré-adensamento pode ser utilizado para verificar os efeitos do preparo de solo e do tráfego sobre ele. Como mostra a tabela 4.5 e a figura 4.18 pode-se detectar a alteração dos valores e, portanto, das condições físicas do solo, tanto na superfície como em profundidade e, segundo os pesquisadores, suas causas estão relacionadas tanto com o método de mobilização como com a intensidade do tráfego.

4.6 Consequências ambientais e econômicas da compactação na atividade agropecuária

Como já foi discutido no início deste capítulo, são inerentes à atividade agropecuária ações de mobilização dos solos e o tráfego superficial que contribuem para a mudança da estrutura física e incrementam o processo de compactação.

Embora o objetivo deste texto não seja discutir as consequências da compactação do solo é oportuno apresentar argumentos que justifiquem ações no sentido de minimizar o efeito provocado neste sentido pela aplicação dos equipamentos agrícolas.

Tabela 4.5. Valores médios de pressão de pré-consolidação e da densidade do solo, coletadas em diferentes fases do ciclo de uma cultura agrícola. Adaptado de Silva et al. (2003).

Tipo de Equipamento Utilizado no Preparo do Solo	Pré-consolidação (kPa) Épocas de amostragem				Densidade (kN.m ³) Profundidade			
	DPR		DC		SP		PMT	
	SP	PMT	SP	PMT	DPR	DC	DPR	DC
Arado de Aivecas	315,00	222,70	282,40	277,59	11,47	13,04	10,98	12,26
Arado de Discos	343,06	246,86	355,90	372,00	11,67	11,87	11,18	11,47
Grade Aradora	281,79	250,19	254,6	317,50	11,67	12,45	11,08	11,77
Semeadora/Adubadora	240,90	211,66	242,09	298,49	10,98	12,16	10,20	10,59

DPR – no momento do preparo do solo, imediatamente após a passagem do rodado do trator; DC – Após a colheita; SP – superficial (de 0 a 0,05m) e PMT – profundidade média da ação da borda cortante das ferramentas de preparo do solo (0,24 a 0,27m).

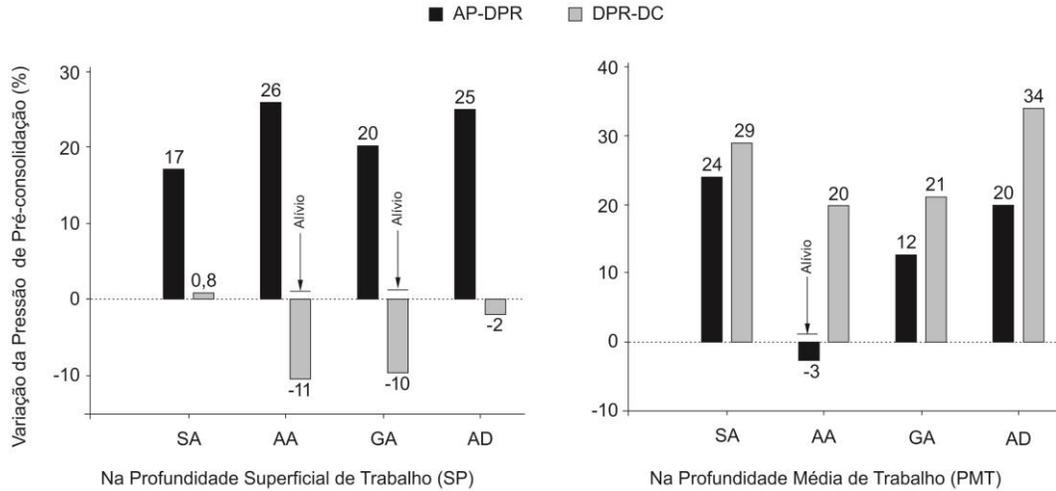


Figura 4.18. Variação percentual da tensão de pré-consolidação observada nas diferentes profundidades pesquisadas e nas diferentes épocas do ciclo cultural, em função do tráfego imposto ao solo e do sistema de preparo utilizado: SA – semeadora/adubadora; AA – arado de aiveca; GA – grade aradora; AD – arado de discos; AP – antes do preparo; DC – após a colheita; DPR - no momento do preparo do solo, imediatamente após a passagem do rodado do trator. Adaptado de Silva et al. (2003).

Além disso, na agricultura convencional, durante um período relativamente longo, no início da estação chuvosa, o solo está totalmente descoberto, devido ao apregoado combate às plantas daninhas como prática cultural em favor das plantas cultivadas. Some-se a isso a inclinação das áreas em que se desenvolve a atividade. Tal conjunto de situações constrói um ambiente predisposto a causar enorme dano ambiental, principalmente se o local estiver numa região tropical ou subtropical do planeta. Tais latitudes apresentam características de precipitações pluviométricas intensas em período de tempo extremamente curtos. A tabela 4.6 mostra valores esperados para máximas precipitações e expectativa de reincidência ao longo do tempo, no município de Piracicaba- SP. Nesta região, a média mensal de precipitação pluviométrica³⁹ no auge da primavera (nos meses de outubro e novembro), quando estão se instalando as culturas de verão são, respectivamente, de 109,8mm e

130,6mm e no verão (janeiro) este valor é de 229,8mm.

Tabela 4.6. Previsão de máximas precipitações (mm.h⁻¹) e período de retorno. Adaptado de Martinez & Magni (1999).

Duração (minutos)	Período de Retorno (anos)				
	2	5	10	15	20
10	94,3	134,2	160,6	175,4	185,9
20	77,0	109,4	130,9	143,0	151,5
30	65,2	92,6	110,7	121,0	128,1
60	45,1	63,9	76,4	83,4	92,1
120	28,3	40,1	52,2	55,3	57,6
180	20,9	29,5	35,1	38,3	40,6

³⁹ Médias obtidas entre 1917 e 2010, fornecidas pelo Laboratório de Processamento de Dados Meteorológicos – LEB/ESALQ/USP (2011).

O valor demarcado na tabela (94,3) significa ser provável ao menos 10 minutos de chuva com intensidade de 94,3mm.h⁻¹ a cada 2 anos.

Considerando as informações da tabela 4.6 conclui-se que pode ocorrer, num período de apenas uma hora, a cada 2 anos precipitação que representa 34,5% (45,1mm) de toda a precipitação esperada para o mês inteiro, no auge da primavera e 19,6% e se considerado o auge do verão. Num período de 5 anos estes valores seriam de 48,9% (63,9mm) e 27,8%, respectivamente.

Nesta época do ano, geralmente, a umidade do solo é elevada, uma vez que a frequência das chuvas aumenta. Além disso, sua variabilidade é extremamente alta quando comparada a regiões de clima temperado, como mostra a tabela 4.7, o que se torna uma condição de instabilidade no que se refere a ações preventivas quanto à proteção do solo ou prevenção a possíveis danos por excesso de chuva. Como se observa pelos valores médios apresentados, a variação da intensidade de chuvas no verão dos climas subtropicais (53% em fevereiro, por exemplo), significa que pode haver, no climas temperados, um acréscimo de precipitação da mesma ordem de grandeza de toda precipitação esperada para o mesmo período climático (ou seja, variação de precipitação da ordem de 95 mm, o que equivale ao observado nos meses de verão no hemisfério norte). A figura 4.19 ilustra a variabilidade pluviométrica observada entre 1917 e 1987, nas localidades citadas em ambos os hemisférios terrestres.

Não é difícil de imaginar que, durante boa parte do tempo o solo terá saturação relativa elevada e, por causa disso, necessita-se de pouca água para que ela atinja seu máximo, ou seja, ocorra encharcamento. Com, o uso agrícola do solo, a subsuperfície teve sua porosidade reduzida pela ação das atividades do trânsito e da mobilização

(dificultando a absorção e a drenagem) e a camada superficial estaria relativamente solta (em função da mobilização). O encharcamento combinado com uma área declivosa seria a situação perfeita para que o eventual excesso de água inicie o movimento em direção às áreas mais baixas, provocando escorrimento e carregando consigo o solo solto.

Tabela 4.7. Comparação da pluviosidade média de locais de clima temperado e subtropical, no período de pré-plantio (PS) e interface primavera-verão, entre 1917 e 1987. Adaptado de Paterniani (2001).

Ames, Iowa - EUA			Piracicaba, S. Paulo - BR		
Período (meses)	Média (mm)	CV (%)	Período (meses)	Média (mm)	CV (%)
PS set/jun	618	19	PS fev/nov	822	25
julho	93	38	janeiro	223	40
agosto	98	42	fevereiro	180	53

Ames: 42°N, 93°O; Piracicaba: 22°S, 47°O; CV – Coeficiente de Variação; PS – Pré-plantio.

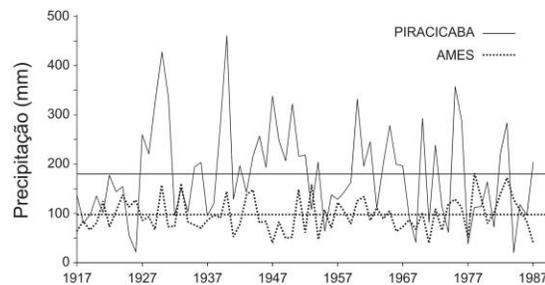


Figura 4.19. Índice pluviométrico observado em períodos climáticos equivalentes: fevereiro em Piracicaba (Brasil) e agosto em Ames (EUA) e respectivas médias. Adaptado de Paterniani (2001).

Instala-se, assim, o processo de erosão e tem início a degradação física do solo destinado à produção agrícola, pecuária e florestal, resultado

da perda gradativa de sua parte superficial que é a região mais fértil.

A erosão superficial é apenas o ponto de partida para uma série infindável de eventos ambientais de grande impacto. O solo erodido que é carregado pela água deposita-se nas partes mais baixas do terreno, que quase sempre é o leito de um curso d'água, um lago ou açude. Com o tempo, principalmente as calhas destes cursos d'água não mais suportam a descarga natural das chuvas e passam a transbordar, provocando alagamentos.

Além disso, como o solo está compactado na subsuperfície ocorre diminuição da sua capacidade de absorver a água, fazendo com que o escoamento superficial aumente a cada ano. Desta forma, com o passar do tempo, tal perda de água comprometeria o lençol freático, uma vez que não seria absorvida. Portanto, o ritmo de percolação e drenagem será reduzido. A consequência direta desta situação seria a intensificação da falta de água em nascentes que abastecem córregos e rios, magnificando o efeito de estiagens.

Quando se trata da produtividade da atividade rural, muitas outras interferências podem ser notadas. O solo compactado dificulta a emergência das plântulas por diversos motivos. Também se observa mudança na formação das raízes, que tendem a se distribuir superficialmente e se espalhar lateralmente, diminuindo a resistência das plantas aos veranicos, pois elas não conseguem obter água de regiões mais profundas do solo. Tal situação predispõe a cultura a acamamentos devido a ventos de intensidade menor

que aqueles que seriam causadores de tombamento das plantas em caso de raízes mais profundas.

A diminuição da porosidade diminui o fluxo gasoso e muitos processos metabólicos, tanto dos vegetais como de toda biota do solo, ficam comprometidos, principalmente alguns relacionados com a absorção de nutrientes. Também há relatos de que pode haver perdas de nitrogênio por desnitrificação.

Por fim, solos mais densos tornam-se mais *resistentes*, o que significa que exigem mais energia para serem mobilizados. Assim, o produtor rural poderia ficar motivado a aumentar o tamanho de seus tratores (mais potentes) que poderiam tracionar equipamentos de mobilização de solo cada vez maiores.

Todos estes efeitos, evidentemente, concorrem para a diminuição da produtividade das culturas e pastagens e retroalimentam o processo, tornando cada vez mais oneroso o trabalho de produção.

Portanto, entender o mecanismo pelo qual ocorre a compactação dos solos é fundamental para que se estabeleçam critérios e metodologias de manejo, tanto no que se refere ao tráfego superficial como na utilização de equipamentos que, em qualquer grau, causem mobilização do solo.

BIBLIOGRAFIA CONSULTADA

- ASSIS, F.N., VILLA NOVA, N. A. **Modelagem da ocorrência e da quantidade de chuva em Piracicaba**. Sci. Agr., Piracicaba, v.51, n.3, p.172-182, 1994.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7182. **Solo – Ensaio de compactação**. 1986. 10p.
- BUENO, B.S., VILAR, O.M. **Mecânica dos solos, Volume I**. São Carlos: Universidade de São Paulo/ EESC, 1984. Publicação 062/94. 131p.
- CAÑAVATE, J.O., HERNANZ, J.L. **Técnica de la mecanización agraria**. Madrid: Mundi Prensa, 1989. 641p.
- CAMARGO, O.A., ALLEONI, L.R.F. **Compactação do solo e o desenvolvimento das plantas**. Piracicaba: Degaspari, 1997. 132p.
- CAMARGO O. A.; ALLEONI, L.R.F. **Considerações para manejo do solo**. 2006. Disponível em: http://www.infobibos.com/Artigos/2006_3/C7/Index.htm. Acesso em: 02 mar. 2012
- CAPUTO, H.P. **Mecânica dos solos e suas aplicações**. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 1973. 456p.
- FIGUEIREDO, L. H. A., DIAS JUNIOR, M.S., FERREIRA, M.M. **Umidade crítica de compactação e densidade do solo máxima em resposta a sistemas de manejo num latossolo roxo**. Viçosa, Revista Brasileira de Ciência do Solo, v.24, n.3, p.487-493, 2000.
- JODI D. J., MONCRIEF, J., VOORHEES, W.B., SWAN. J.B. **Soil compaction: causes, effects and control**. Saint Paul: University of Minnesota Extension Service, 2001. Disponível em <http://www.extension.umn.edu/distribution/cropsystems/DC3115.html>. Acesso em 16 ago. 2011.
- GILL, W.R., VANDEN BERG, G.E. **Soil dynamics in tillage and traction**. Agriculture Handbook 316. USDA, 1968. 511p.
- HORN, R. **Stress-strain effects in structured unsaturated soils on coupled mechanical and hydraulic processes**. Amsterdam, Geoderma, n.116, p.77-88, 2003.
- LABORATÓRIO DE PROCESSAMENTO DE DADOS METEOROLÓGICOS. Base de dados meteorológicos. Departamento de Engenharia de Biosistemas/ ESALQ-USP, Piracicaba, 2011. Disponível em: <http://www.leb.esalq.usp.br/postocon.html>. Acesso em: 17 dez. 2011.
- LAMBE, T.W., WITHMAN, R.V. **Soil mechanics, SI version**. Singapore, John Wiley & Sons, 1979. 553p.
- LIMA, C.L.R. **Compressibilidade de solos versus intensidade de tráfego em um pomar de laranja e pisoteio animal em pastagem irrigada**. Piracicaba, ESALQ/USP, 60p. Tese de Doutorado. 2004.
- LULL, H.W. **Soil compaction on forest and range lands**. Washington DC: U.S. Government Printing Office, n.768, 1959. 33p.
- MARTINEZ, F., MAGNI, N.L.G. **Equações de chuvas intensas no estado de São Paulo**. Departamento de Águas e Energia Elétrica (DAEE)/ Escola Politécnica – USP, São Paulo, 1999. 125p.
- MAZETTO, F.R., LANÇAS, K.P., NAGAOKA, A.K., CASTRO NETO, P., GUERRA, S.P.S. **Avaliação do contato pneu-solo em três modelos de pneus agrícolas**. Eng. Agríc., Jaboticabal, v.24, n.3, p.750-757, 2004.
- MITCHELL, J.K. **Fundamentals of soil behavior**. New York, John Wiley & Sons, 2ed., 1993. 437p.
- MITCHELL, J.K., SOGA, K. **Fundamentals of soil behavior**. New York, John Wiley & Sons, 3ed., 2005. 565p.

- PATERNIANI, E. **Agricultura sustentável nos trópicos**. Estudos Avançados, São Paulo: IEA, v.15, n.43, p.303-326, 2001.
- PORTUGAL, A.F., COSTA, O.V., COSTA, L.M., SANTOS, B.C.M. **Características químicas e físicas de um argissolo submetido a diferentes usos agrícolas**. Revista Ceres, Viçosa, v.54, n.315, p.412-421, 2007.
- REICHERT, J.M.; SUZUKI, L.E.A.S.; REINERT, D.J. Compactação do solo em sistemas agropecuários e florestais: identificação, efeitos, limites críticos e mitigação. In: CERETTA, C.A.; SILVA, L.S.; REICHERT, J. M. **Tópicos em Ciência do Solo**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, n.5, p.49-134, 2007.
- SADEGHIAN, S., RIVERA, J.M., GÓMEZ, M.E. Impacto de sistemas de ganadería sobre las características físicas, químicas y biológicas de suelos en los Andes de Colombia. In: **Conferencia electrónica de la FAO sobre "Agroforestería para la producción animal en Latinoamérica"**. Organización das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação – FAO, AGROFOR I, p.77-95, 1999. Disponível em: <http://www.fao.org/ag/aga/agap/FRG/AGROFOR1/Agrofor1.htm>. Acesso em 02 dez. 2011.
- SILVA, R.B., DIAS JR, M.S., SILVA, F.A.M., FOLE, S.M. **O tráfego de máquinas agrícolas e as propriedades físicas, hídricas e mecânicas de um Latossolo dos Cerrados**. Rev. Bras. Ciênc. Solo, Viçosa, v. 27, n. 6, 2003. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-06832003000600002&lng=en&nrm=iso. Acesso em: 19 jan. 2012. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832003000600002>.
- SILVA, A. P.; LIBARDI, P. L. & CAMARGO, O. A. **Influência da compactação nas propriedades físicas de dois latossolos**. Viçosa, Revista Brasileira de Ciência do Solo, n.10, p.91-95, 1986.
- SUZUKI, L.E.A.S; REICHERT, J.M.; REINERT, D.J; LIMA, C.L.R. **Grau de compactação, propriedades físicas e rendimento de culturas em Latossolo e Argissolo**. Pesquisa agropecuária brasileira, Brasília, v.42, n.8, p.1159-1167, ago. 2007.
- TAKEDA, M. C. **Influência da variação de umidade pós-compactação no comportamento mecânica de solos de rodovias do interior paulista**. São Carlos, EESC/USP. 241p. Tese de Doutorado. 2005.
- VEZZANI, F. M.; MIELNICZUK, J. Uma visão sobre qualidade do solo. **Rev. Bras. Ciênc. Solo**, Viçosa, v. 33, n. 4, p. 743-755, Aug. 2009. Disponível em http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-06832009000400001&lng=en&nrm=iso. Acesso em 04 ago. 2016. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832009000400001>.
- VILAR, O.M., BUENO, B.S. **Mecânica dos solos, Volume II**. São Carlos: Universidade de São Paulo/EESC, 1985. Publicação 080/94. 219p.
- WHITING, D., WILSON, C., CARD, A. **Estimating Soil Texture**. Colorado State University, 2003. CMG #214, 5p. Disponível em: <http://www.ext.colostate.edu/mg/gardennotes/214.html>. Acesso em 12 jul. 2011.
- WHITING, D., CARD A., WILSON, C., REEDER, J. **Soil Compaction**. Colorado State University, 2003. CMG GardenNotes #215, 6p. Disponível em: <http://cmg.colostate.edu/gardennotes/215.pdf>. Acesso em 07 set. 2011.
- WOLKOWSKI, R., LOWERY, B. **Soil compaction: causes, concerns and cures**. Madison: Cooperative Extension of the University of Wisconsin – Extension (A3367), 2008. Disponível em <http://learningstore.uwex.edu/Soil-Compaction-Causes-Concerns-and-Cures-P1419.aspx>. Acesso em 17 dez. 2011.

CAPÍTULO 5

RESISTÊNCIA DO SOLO À PENETRAÇÃO DO CONE

Os problemas de engenharia não podem ser solucionados sem que cálculos e considerações necessárias sejam baseados em conhecimentos sólidos sobre as propriedades mecânicas dos materiais envolvidos. O mesmo ocorre na mecânica dos solos.

Karl Terzagh

A resistência à penetração de um cone no solo é uma prática utilizada com frequência nas prospecções geotécnicas em grande parte das atividades da construção civil. Muito antes da utilização de instrumentos de medição mais complexos, era prática comum aos engenheiros e arquitetos verificarem a resistência do solo introduzindo nele estacas de madeira ou hastes de metal com o intuito de, subjetivamente, comparar locais para a construção de obras civis.

A evolução destas ações resultou em aparelhos que medem a *resistência mecânica à penetração* de sondas no solo cujo objetivo seria o de reconhecimento das suas características

físicas. Tal procedimento teve início em 1902⁴⁰. Em 1932 foi utilizado pela primeira vez⁴¹ um dispositivo provido de um cone cujo vértice teria ângulo de 60° e a área da base seria 10cm². Tal equipamento foi desenvolvido na Holanda e está representado esquematicamente na figura 5.1. Data desta mesma época a criação de outro tipo de equipamento, para uso manual (que foi denominado *penetrômetro*), desenvolvido pelo holandês Berentsen⁴², o qual teria sido patenteado em 1938.

Penetrômetros são, portanto, equipamentos constituídos de uma ponteira cônica que é introduzida no solo através de hastes metálicas, (que podem

⁴⁰ Segundo Nogueira (1988).

⁴¹ Robertson e Cabal (2010)

⁴² Aoki (1973) apud Tshua (2003)

ser também um tubo, ou um conjunto deles, acoplados uns aos outros) cuja energia usada para provocar a penetração seria a ele fornecida continuamente, provocando deslocamento constante ou então proviria de golpes desferidos por uma massa (sob ação da gravidade) conhecida como *peso de cravação* ou simplesmente *martelo*.

A utilização de tais equipamentos pode ter como objetivo estudos de em zonas relativamente superficiais ou atingir grandes profundidades⁴³, com dezenas de metros.

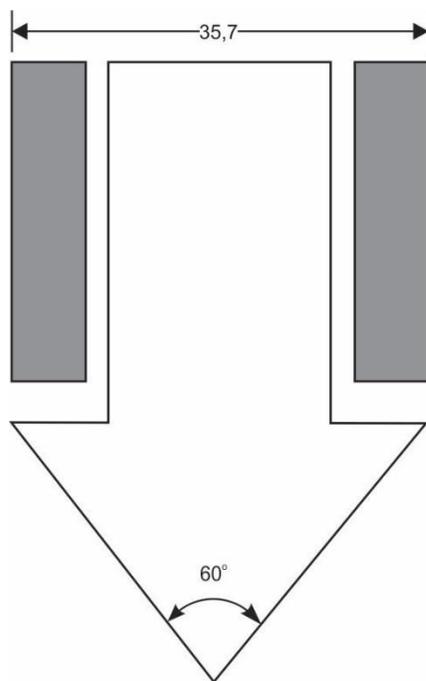


Figura 5.1. Esquema dos penetrômetros mecânicos primitivos, desenvolvidos pelos holandeses no início do século XX. Dimensões em milímetros. Adaptado de Robertson e Cabal (2010).

5.1 Aplicações geotécnicas dos penetrômetros de cone

Na atualidade os penetrômetros incorporam as evoluções da tecnologia eletrônica e de

materiais, podendo medir mais que a carga necessária para a penetração da ponteira, o que seria suficiente para medir a resistência do solo à ruptura. Pode-se medir também a poro pressão (associada à água presente no solo) e o atrito lateral de uma luva (ou fuste que protege a haste principal). Em aparelhos mais sofisticados são introduzidos sensores como termômetros, detectores de radioisótopos para medição de densidade de água, vibradores, goniômetros que indicam inclinação⁴⁴ (ou flambagem) das hastes durante a operação, dentre os mais comuns.

Os instrumentos utilizados nestas prospecções (conforme esquema da figura 5.2) são compostos de hastes metálicas com ponteiros cônicas e podem atingir profundidades maiores que 30 metros em apenas uma hora ou pouco mais. Em alguns casos permitem além de informações obtidas através da penetração do cone, retirada de amostras (indeformadas ou não) do solo à profundidade desejada.

Os penetrômetros podem ser divididos em dois tipos de acordo com o processo de cravação: *dinâmicos* e *estáticos*. Se a penetração do cone no solo ocorre em velocidade constante o equipamento é conhecido como penetrômetro estático. A haste pode ser movida por dispositivos que variam de acordo com o projeto do equipamento: macacos hidráulicos ancorados na superfície, pinhão e cremalheira ou correntes, dentre outros métodos. A medida de resistência à penetração, tradicionalmente, é representada por q_c e têm dimensões de tensão (kgf.cm^{-2} ou Pascal), cuja origem resulta da distribuição da força axial F_a utilizada para introduzir o cone no solo, distribuída pela área A_c da sua base. Portanto:

⁴³ Algumas vezes excedendo 100m de profundidade em solos moles ou até operando em águas profundas, abaixo de 3000m do nível da água. Robertson & Cabal (2010).

⁴⁴ Como orientação operacional preconiza-se que as inclinações máximas das hastes não devem ultrapassar 2 graus. Robertson & Cabal (2010).

$$q_c = \frac{F_a}{A_c} \quad (5.1)$$

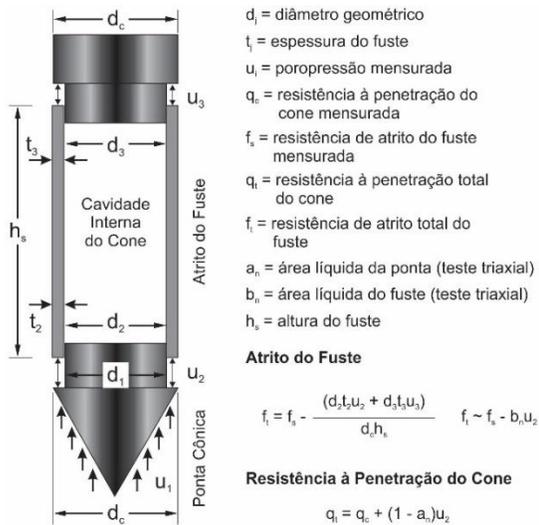


Figura 5.2. Esquema da ponta de um penetrômetro utilizado para prospecções geotécnicas e referências utilizadas para correções de leituras de atrito do fuste e resistência à penetração do cone. Adaptado de Mayne (2007).

Nos aparelhos estáticos utilizados nas prospecções geotécnicas e de construção civil, é comum que o ângulo do vértice do cone seja de 60°, podendo o diâmetro da base ser de 35,7mm ou 43,7mm, o que lhes confere área da secção transversal de 10cm² e 15cm² respectivamente. A velocidade de penetração deverá ser mantida constante e como regra geral não deve ultrapassar 0,02ms⁻¹. No caso dos equipamentos de alta tecnologia (onde se utilizam sensores eletrônicos de alta precisão) as leituras para aquisição de dados podem ser realizadas a cada 0,025m. O nome dado a este tipo de determinação é *ensaio de penetração contínua*, normalmente representado pela sigla *CPT* (da denominação em inglês *cone penetration test*). Os resultados são apresentados em gráficos como os da figura 5.3.

No entanto, as tensões obtidas destas medições necessitam de correção uma vez que,

para grandes profundidades, a poropressão age de forma desigual em posições diferentes da ponta do cone. Para isto, necessita-se de calibração do penetrômetro em câmara triaxial para determinar a área líquida da ponta do cone (a_n). A resistência total à penetração do cone q_t será então obtida de acordo com a equação 5.2.

$$q_t = q_c + (1 - a_n) u_2 \quad (5.2)$$

em que:

u_2 – poropressão mensurada na posição indicada na figura 5.2

A influência da poropressão torna-se significativa para operações em argilas e siltes, de macios para firmes, onde o valor da correção pode chegar próximo de 70% do valor de q_c . No entanto, para o caso de solos classificados como arenosos ou granulares, os valores se equivalem ($q_t \approx q_c$).

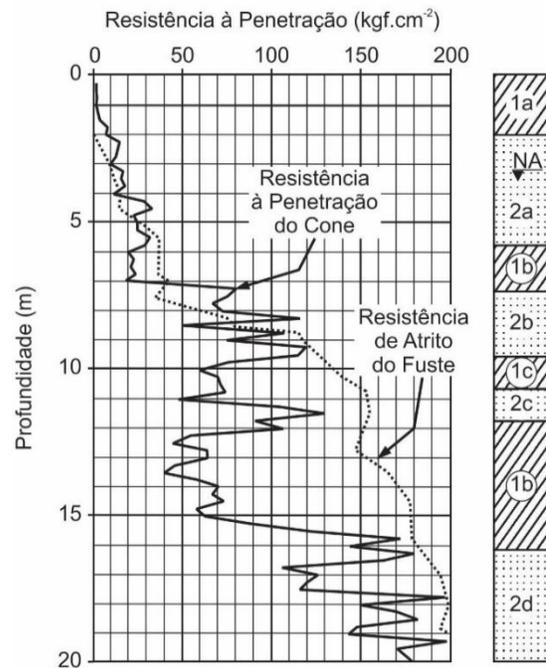


Figura 5.3. Resultado típico de ensaio de resistência à penetração estática. A composição do subsolo em questão é mostrada na legenda à direita: 1a – argila orgânica; 1b – argila silto-arenosa; 1c – argila

siltosa; 2a – areia fina; 2b – areia média e grossa; 2c – areia fina e média; 2d – areia média e grossa siltosa; NA – nível do lençol freático. Adaptado de Bueno & Vilar (1984).

Da mesma forma e pelas mesmas razões, torna-se necessária a correção da leitura do atrito entre o fuste e o solo. Por isto, sensores são instalados na base e no topo do fuste (regiões mostradas como u_2 e u_3 na figura 5.2).

É importante ressaltar que a determinação do atrito lateral contribui para a utilização das informações dos ensaios, pois os solos arenosos apresentam, em geral, altas resistências à penetração e baixos valores para razão de atrito, comportamento contrário aos solos argilosos.

Quando as determinações incluem a medição da poropressão nas laterais do fuste, a denominação comum para o procedimento é *ensaio de piezocone* ou *resistência à penetração piezométrica*, da mesma forma emprestando a sigla do usual em inglês *CPTu*.

Evidentemente, as correções e calibrações devem ser feitas para cada penetrômetro, para caracterizar as propriedades de cada um dos aparelhos e permitir que os valores obtidos nas mensurações possam ser devidamente comparáveis.

De posse dos valores determinados em campo e da associação experimental de suas inter-relações é possível construir mapas, gráficos ou ábacos que permitem determinar o tipo de solo (ou pelo menos os grandes grupos deles), como o exemplo da figura 5.4.

Além destas correlações semi-empíricas, inúmeras outras foram estabelecidas com o objetivo de estimar algumas das importantes

características físicas dos solos, conhecidas como *parâmetros geotécnicos*. A confiabilidade e a aplicabilidade destas correlações variam de acordo com as condições e tipos de solo. A tabela 5.1 procura estabelecer, resumidamente, numa escala também empírica, tal situação de confiabilidade.

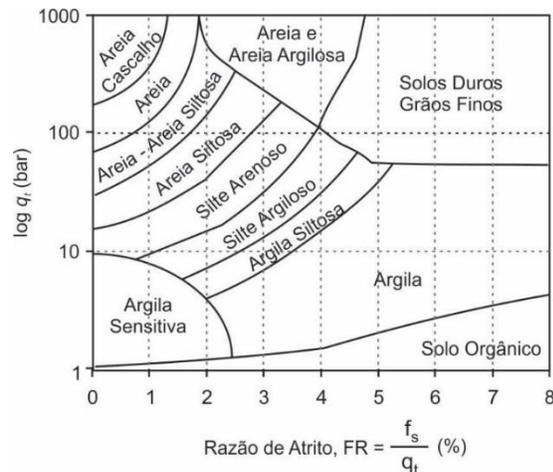


Figura 5.4. Classificação de solos baseada em resultados da resistência à penetração do cone e do atrito lateral. Adaptado de Mayne (2007).

Quando a cravação do cone (ou de todo o aparelho) no solo é feita mediante emprego de energia proveniente do impacto causado pela queda de uma massa conhecida (martelo) de uma altura pré-determinada, os penetrômetros são classificados como *dinâmicos*. No Brasil esta modalidade de ensaio, cujo objetivo é introdução no solo de um dispositivo⁴⁵ para obtenção de amostras indeformadas, é regida pela norma NBR 6484:2001. A massa utilizada tem 65 kg e a altura padrão de queda é de 0,75m. O ensaio recebe o nome de *sondagem de simples reconhecimento com SPT* (sigla referente ao nome em inglês *standard penetration test*).

A resistência do solo à penetração, neste caso, é mensurada simplesmente pela observação do número de impactos necessários para a

⁴⁵ Amostrador: tubo de aço com diâmetro externo de 50,8mm e interno de 34,9mm; comprimento de 609,6mm (podendo variar ± 2 mm).

penetração de 0,30m do amostrador padrão. O símbolo N é utilizado como abreviatura para *índice de resistência à penetração*. Considerando a norma NBR6484:2001, a classificação do estado de consistência e compactidade do solo ensaiado, de acordo com o valor observado para N , estão descritas na tabela 5.2.

Tabela 5.1. Aplicabilidade e confiabilidade de resultados dos ensaios de resistência à penetração na predição de características físicas dos solos: D_r – densidade relativa; RSC – razão de sobreconsolidação; ϕ – ângulo de atrito interno; C_c – índice de compressibilidade e k – permeabilidade. Adaptado de Robertson & Cabal (2010).

Tipo de Solo	Parâmetro Físico				
	D_r	RSC	ϕ	C_c	k
Areia	2-3	5	2-3	2-3	3
Argila	0	1	4	2-3	2-3

Confiabilidade: 1- alta; 2 – alta a moderada; 3- moderada; 4- moderada a baixa; 5 – baixa; 0 – não se aplica.

Tabela 5.2. Estados de compactidade e consistência de solos medidas pelo índice N no ensaio SPT.

Solo	Valores de N	Designação
Areias e Siltes Arenosos	≤ 4	Fofo
	5 a 8	Pouco Compactado
	9 a 18	Medianamente Compactado
	19 a 40	Compactado
	> 40	Muito Compactado
Argilas e Siltes Argilosos	≤ 2	Muito Mole
	3 a 5	Mole
	6 a 10	Médio
	11 a 19	Rijo
	> 19	Duro

No entanto, existem equipamentos menos sofisticados cuja ponta consiste em um simples cone e a penetração no solo é realizada da mesma forma que o descrito pela norma brasileira. O ensaio recebe o nome *de ensaio de penetração dinâmica de cone (DCPT – dynamics cone penetration test)*. Tal procedimento reúne em seus resultados características que simulam os outros dois ensaios (*CPT e SPT*). Este tipo de ensaio teve início em 1956, na Austrália, como parâmetro utilizado na engenharia aplicada à construção de estradas⁴⁶.

O penetrômetro dinâmico com detalhe para a ponteira é mostrado esquematicamente na figura 5.5. De acordo com a energia utilizada para provocar a penetração do cone no solo estes equipamentos são classificados em *leves, médios e pesados*. No entanto, para este tipo de equipamento, não há normatização brasileira e, portanto, variações na estrutura podem ser encontradas, como mostrado na tabela 5.3.

As determinações do *índice de resistência à penetração do cone (I_r)*, referentes aos ensaios DCPT são obtidas mediante cálculos envolvendo os parâmetros mostrados na tabela 5.3 e da energia resultante dos impactos para provocar a penetração de uma parte da ponteira cônica no solo. Utiliza-se para isso a conhecida *fórmula dos holandeses*, mostrada na equação 5.3.

$$I_r = N \frac{M^2 g H}{(M + m) A_c} \quad (5.3)$$

em que:

N – *nega* ou número de impactos para causar uma dada penetração do cone;

M – massa do martelo;

g – gravidade terrestre no local do ensaio

H – altura da queda do martelo;

⁴⁶ Scala (1956) apud Salgado & Yoon (2003).

m – soma da massa da guia, manopla, hastes e ponteira cônica.

A_c – área da secção transversal do cone.

Qualquer que seja o tipo de ensaio de resistência à penetração, seus resultados serão influenciados pelas características físicas dos solos. Dentre estas, são de especial interesse à agricultura e pecuária aquelas relacionadas com a densidade e a umidade. Como discutido no capítulo 4, a capacidade de compactação está diretamente relacionada com a umidade e infelizmente ainda não foram estabelecidas equações genéricas seguras que estabeleçam relações entre os valores obtidos para o índice de resistência à penetração e estas duas características. No entanto, verifica-se que existe certa correlação entre elas e o fenômeno pode ser descrito pela figura 5.6. A resistência à penetração, de maneira geral, decresce com o aumento da umidade, apesar de se observar que a densidade aparente do solo seco obedece à curva característica de compactação, atingindo seu máximo para uma condição de umidade ótima, cujo valor é intermediário entre a ausência total de água e sua saturação total.

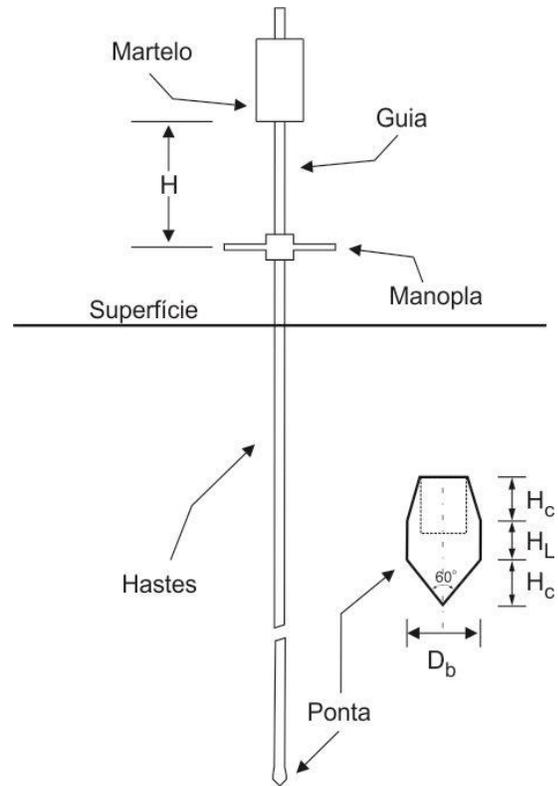


Figura 5.5 Esquema de penetrômetro dinâmico de ponteira cônica. Adaptado de Nogueira (1988) e Salgado & Yoon (2003).

Tabela 5.3. Dimensões do penetrômetro dinâmico de cone. Adaptado de Nogueira (1988), Fuka et al. (2009) e Salgado & Yoon (2003).

Parâmetros	Leve	Médio	Pesado	Super Pesado	Especial
Massa do Martelo (kg)	10±0,1	30±0,3	50±0,5	63,5±0,5	8
Massa da Estrutura* (kg)	6	18	18	30	nd
H (mm)	500±10	500±10	500±10	750±20	575
Área da Base do Cone (cm ²)	10	15	15	20	nd
D_b (mm)	35,7±0,3	43,7±0,3	43,7±0,3	50,5±0,5	20
D_b com desgaste máximo (mm)	34	42	42	50	nd
H_c (mm)	35,7±0,3	43,7±0,3	43,7±0,3	51±2	nd
H_L (mm)	17,9±0,1	21,9±0,1	21,9±0,1	25,2±0,4	3
Desgaste máximo do vértice (mm)	3	4	4	4	nd

Os símbolos H , D_b , H_c e H_L referem-se à figura 5.5; * - Incluindo a haste guia; nd – não declarado.

5.2 Aplicação agrícola do parâmetro resistência à penetração de cone no solo

O penetrômetro de cone é uma valiosa ferramenta quando utilizada em conjunto com outras ferramentas e procedimentos na realização de estudos para aplicações em engenharia. Fredrickson (1984).

Embora as reações observadas (ou mesmo algumas medições) do fenômeno da resistência à penetração de instrumentos nos solos (estacas de madeira ou metal) venham sendo utilizadas há muito tempo como ferramenta para as engenharias civil e geotécnica, somente a partir do início do século XX ela começou a ser tratada do ponto de vista técnico-científico. Na agricultura a utilização deste conhecimento é ainda mais recente. Os estudos mais detalhados sobre o assunto tiveram início em meados dos anos 1970. Informações do Departamento de Agricultura dos Estados Unidos da América do Norte (USDA) dão conta de que o Serviço de Conservação do Solo do estado de Nebraska tenha usado pela primeira vez⁴⁷ um penetrômetro estático de cone em 1974. Há relatos⁴⁸ de que uma das primeiras tentativas de aplicação agrícola de penetrômetros dinâmicos em 1945, neste mesmo país.

Desde então, muitas investigações e estudos técnicos tentaram adequar tais medições para aplicações agrícolas, pecuárias e florestais, no sentido de correlacionar as informações obtidas com os atributos físicos do solo. Destacadamente a variação da densidade do solo como resultado da compactação provocada pela sua utilização como meio de produção foi das mais estudadas. Os resultados obtidos mostram tendências com relação aos estados de compactação, densidade e

umidade do solo, mas infelizmente não há exatidão nestes dados e por isso é difícil estabelecer correlações seguras.

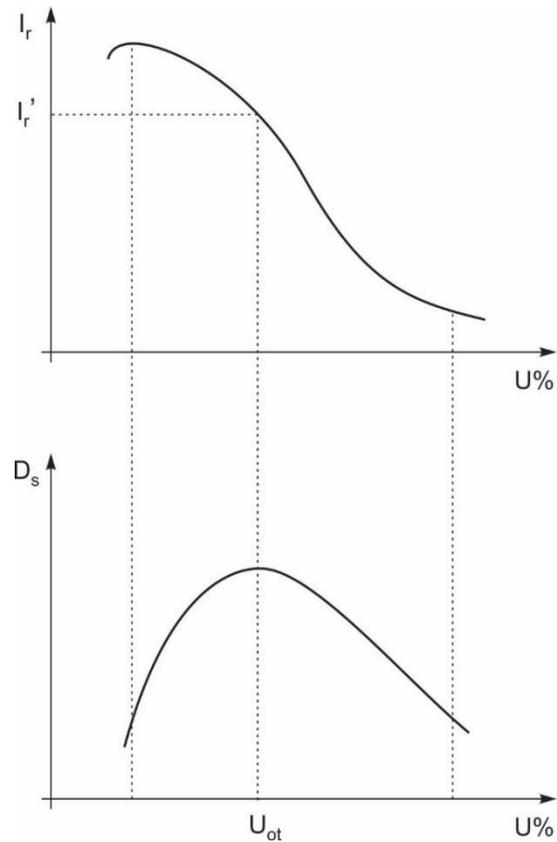


Figura 5.6. Comportamento característico da resistência à penetração do cone (I), em relação à umidade (U) e à densidade relativa (D) do solo seco. Adaptado de Caputo (1973).

No entanto, as informações de resistência à penetração associadas a outras ferramentas tecnológicas e observações de campo podem contribuir para a formação de um cenário realista das condições em que se encontra, momentaneamente, uma área onde se pretende implementar planos de produção agropecuária, tanto no que se refere à mobilização do solo para implantação de culturas como em operações com vistas à sua recuperação física e de fertilidade.

As informações sobre resistência à penetração fornecem subsídios aos profissionais das

⁴⁷ Fredrickson (1984).

⁴⁸ Herryck & Jones (2002).

ciências agrárias orientando a execução de atividades de manejo de solo que resultam em ações menos agressivas ao ambiente, além de proporcionar economia de energia necessária à realização das operações que requerem sua mobilização. É possível, ainda, acompanhar as alterações ocorridas no solo, decorrentes da sua utilização como meio de cultivo, causadas por operações realizadas na condução das culturas e ao tráfego de superfície. O controle dos danos causados pelo tráfego sobre o terreno nas operações de colheita e transporte dos produtos para fora da área de plantio torna-se importante em regiões canavieiras e de reflorestamento.

Os instrumentos de medição de resistência à penetração do cone no solo utilizados na agricultura brasileira recebem, de maneira geral, os nomes de *penetrômetro de impacto*, quando são dinâmicos e simplesmente *penetrômetros* quando são estáticos. Estes últimos, geralmente são aqueles que possuem um registrador que indica a carga aplicada, sem que seja possível gravar tal informação. No entanto, quando o equipamento estático é provido de dispositivo que *registra* (em papel ou eletronicamente) as informações de profundidade de penetração e respectiva carga, são chamados de *penetrógrafos*. As informações obtidas nas medições com os penetrômetros e penetrógrafos recebem o nome genérico de *índice de cone*.

5.2.1 Penetrômetro de impacto

No Brasil a aplicação dos penetrômetros de impacto teve como o seu mais importante incentivador Professor Rubismar Stolf⁴⁹, que propôs em 1983, como modelo a ser utilizado na agricultura, o *penetrômetro de impacto modelo IAA/Planalsucar-Stolf*. Um esboço do equipamento, que é utilizado até o presente, está na

figura 5.7. Trata-se de uma haste única, de cerca de 1,5m de comprimento, graduada em milímetros na sua porção inferior (0,7m), provida de um cone de penetração na extremidade, dois limitadores (superior a 0,4m do inferior) e um martelo com massa de 4kg, cuja queda transfere energia ao limitador inferior (batente), solidário à haste, provocando sua penetração no solo.

O emprego deste tipo de equipamento oferece algumas vantagens em relação aos penetrômetros e penetrógrafos estáticos manuais, pois sua configuração resulta em baixo custo de produção, não requer calibrações periódicas e a dureza do solo não representa uma dificuldade na manutenção de velocidade constante de penetração, o que é exigido nos demais aparelhos.

No entanto, a utilização do penetrômetro de impacto eleva consideravelmente o tempo de sondagem, uma vez que há necessidade de registro da profundidade de penetração a cada golpe do martelo, além do desgaste físico que o trabalho contínuo e o peso do equipamento provocam no operador. Existe, porém, uma grande vantagem a ser creditada a este tipo de equipamento: a energia transferida ao cone a cada impacto é constante (derivada da energia de posição do martelo – relativa à sua massa e à gravidade) para um determinado local da superfície terrestre. Nos equipamentos manuais estáticos a compleição física dos operadores e as condições de solo podem interferir no resultado da medição.

Os resultados obtidos das medições de campo com o penetrômetro de impacto podem ser apresentados em forma de gráfico relativo a uma profundidade padrão e ao número de impactos para que o cone percorra tal distância, utilizando-se a equação 5.4.

⁴⁹ Prof. Dr. Rubismar Stolf - Universidade Federal de São Carlos, Centro de Ciências Agrárias - Departamento de Recursos Naturais e Proteção Ambiental.

$$N = \frac{n}{p_2 - p_1} \cdot \psi \quad (5.4)$$

em que:

N – penetração padrão: número de impactos necessários para alcançar o deslocamento padrão do cone em profundidade pré-fixada pelo executor da sondagem; o mesmo que *nega* na equação 5.3;

n – número de impactos efetuados no procedimento atual, entre duas leituras de profundidade da haste;

p_i – profundidades lidas na haste antes e depois dos impactos efetuados no procedimento atual;

ψ – valor absoluto da profundidade padrão, adimensional..

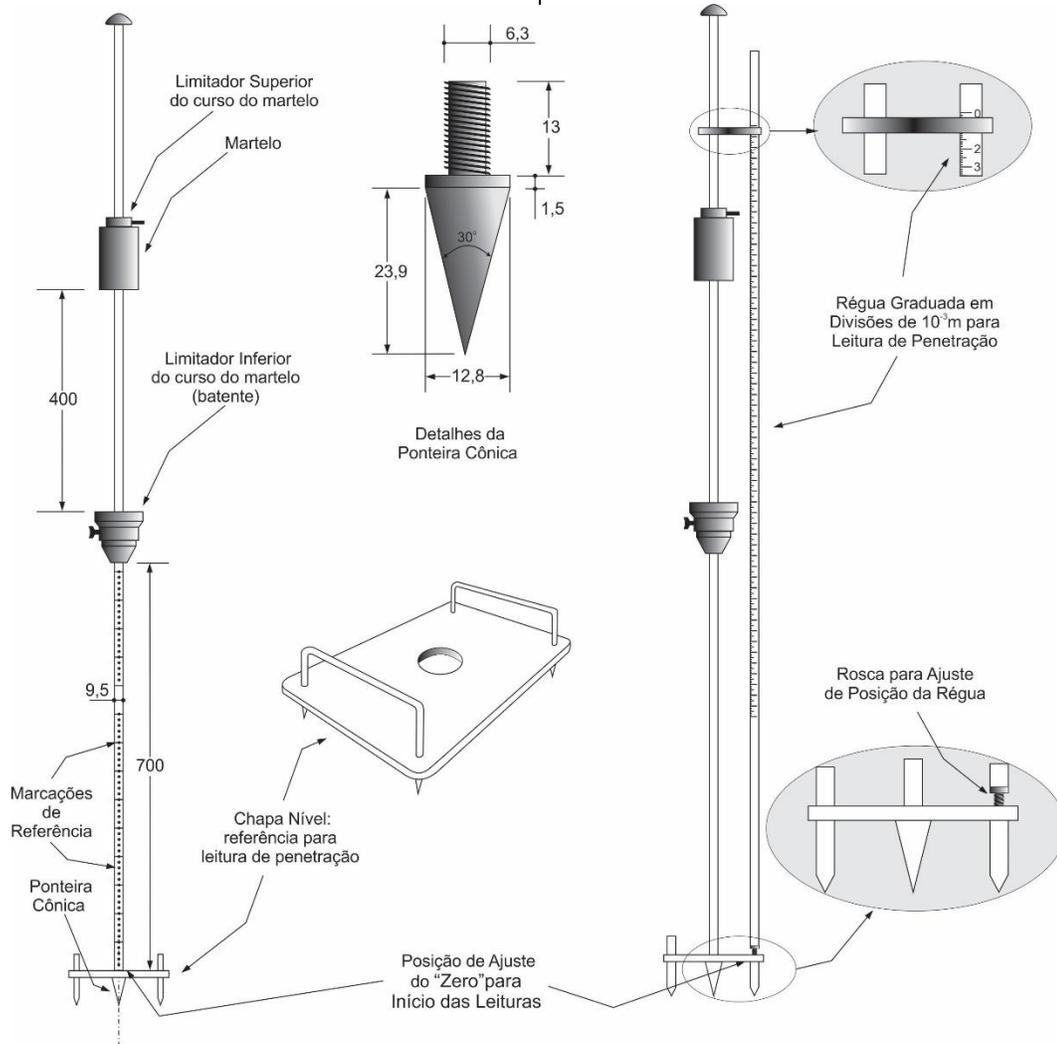


Figura 5.7. À esquerda: penetrômetro de impacto original, modelo IAA/ Planalsucar-Stolf, com sistema de leitura de penetração marcado na haste; à direita: versão atualizada, com régua auxiliar lateral para leitura de profundidade de penetração graduada em milímetros. Adaptado de Stolf et al. (1983) e Stolf et al. (2011).

Como exemplo prático pode-se calcular o número de impactos necessários para alcançar a profundidade padrão (ψ – adotada como sendo um decímetro dm ou 10^{-1} m). Num ensaio hipotético necessita-se de dois impactos (n) para provocar o deslocamento da haste da posição 21cm ($p_1 - 21 \cdot 10^{-2}$ m) para a posição 25cm ($p_2 - 25 \cdot 10^{-2}$ m) de profundidade. De acordo com a equação 5.4, verifica-se que o resultado N é 5 (cinco). Ou seja, cada impacto do martelo no batente teria provocado em média a penetração de 2cm ($2 \cdot 10^{-2}$ m) do cone no solo. Então, para cravar o cone à profundidade de um decímetro, valor padronizado neste ensaio, seriam necessários cinco impactos.

A tabela 5.4 mostra um exemplo hipotético de médias obtidas para um ensaio de campo e a obtenção dos valores de N , com a utilização da equação 5.4, cujos resultados permitiram a construção do gráfico mostrado na figura 5.8.

A área hachurada na figura 5.8 registra uma região onde há maior dificuldade de penetração, pois é necessário maior número de impactos para que a ponta cônica da haste do penetrômetro atravesse a distância pré-determinada como padrão. A conclusão lógica⁵⁰ que se pode obter de tal constatação é a de que esta região é mais compacta que aquelas até 0,27m, nas condições *atuais* do ensaio. Se tal informação, associada a outras observações agronômicas sugerem a existência de compactação neste solo, pode-se inferir que a camada compactada deverá estar instalada à profundidade que variará entre 0,28m e 0,40m.

Tais dados, porém, não podem ser diretamente interpretados como tensões de ruptura do solo. Para se chegar aos valores de tensão de ruptura é necessário equacionar a área da secção

transversal da ponteira cônica e a energia transferida ao equipamento como um todo após o impacto do martelo no batente.

Tabela 5.4. Valores de um ensaio hipotético para determinação de resistência à penetração de cone com penetrômetro de impacto. Adaptado de Stolf (1984).

Leituras da Haste		Nº Impactos	Penetração Atual	Penetração Padrão
p_1	p_2	n	$(p_2 - p_1)$	N
0	5,0		5,0	0
5,0	9,5	1	4,5	2,2
9,5	14,5	1	5,0	2,0
14,5	19,0	1	4,5	2,2
19,0	24,0	1	5,0	2,0
24,0	28,0	1	4,0	2,5
28,0	31,0	1	3,0	3,3
31,0	35,0	2	4,0	5,0
35,0	37,5	2	2,5	8,0
37,5	40,5	1	3,0	3,3
40,5	45,5	1	5,0	2,0
45,5	50,0	1	4,5	2,2
50,0	55,0	1	5,0	2,0

De acordo com os princípios da mecânica clássica a quantidade de movimento (momento linear) Q contida num corpo de massa m que se desloca à velocidade v é definida como:

$$Q = m \cdot v \quad (5.5)$$

⁵⁰ Considerando que não existe nenhum impedimento anormal (como uma raiz ou uma rocha) que restrinja o deslocamento da ponteira cônica da haste.

O equipamento mostrado na figura 5.7 funciona mediante conversão da energia de posição (potencial) acumulada no martelo em energia de movimento (cinética) quando do choque entre ele e o batente solidário à haste. Sendo a massa do martelo M , e a velocidade imediatamente antes do choque com o batente V_M , a quantidade de movimento Q_a existente no sistema é:

$$Q_a = M \cdot V_M \quad (5.6)$$

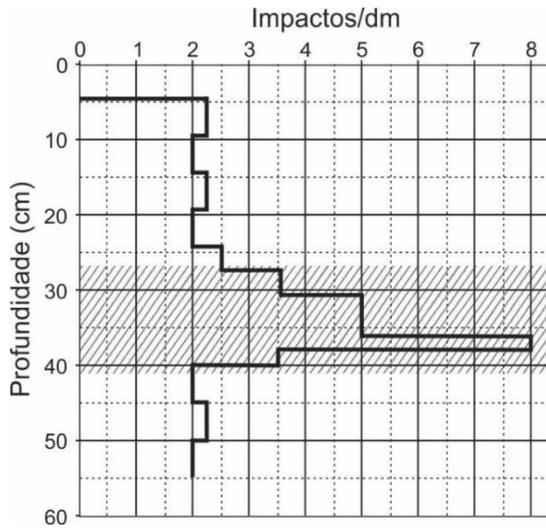


Figura 5.8. Apresentação dos resultados de um ensaio hipotético (ver tabela 5.4) para determinação de resistência à penetração de cone, com penetrômetro de impacto, apresentado em função da penetração padrão de 10^{-1} m (1dm).

Considerando que o choque é inelástico, tanto o martelo como o restante do penetrômetro adquirem a mesma velocidade inercial V imediatamente após o choque. Considerando, pois, a massa da estrutura do penetrômetro como m , a quantidade de movimento Q_d após o choque será:

$$Q_d = (M + m) \cdot V \quad (5.7)$$

Pela lei da conservação de energia as quantidades de movimento (Q_a e Q_d) se equivalem e, portanto, pode-se deduzir que:

$$V = \frac{M \cdot V_M}{M + m} \quad (5.8)$$

Por sua vez, a energia cinética Ec_d existente imediatamente após o choque é:

$$Ec_d = \frac{(M + m) \cdot V^2}{2} \quad (5.9)$$

Substituindo 5.8 em 5.9, tem-se:

$$Ec_d = \frac{M^2 \cdot V_M^2}{2(M + m)} \quad (5.10)$$

Pelo mesmo princípio de conservação da energia, deduz-se que a energia cinética antes do choque Ec_a foi resultante da conversão da energia potencial do martelo Ep_M em função da altura de queda h e, portanto:

$$Ec_a = Ep_M \rightarrow \frac{M \cdot V_M^2}{2} = Mgh \quad (5.11)$$

em que:

g – gravidade terrestre no local do ensaio⁵¹

Substituindo 5.11 em 5.10 tem-se que:

$$Ec_d = \frac{M^2 gh}{(M + m)} \quad (5.12)$$

A fórmula dos holandeses, mostrada pela equação 5.3, considera exatamente estes fenômenos físicos.

A resistência à penetração oferecida pelos solos, no entanto, deveria considerar mais um componente além da energia derivada da queda do martelo sobre o batente solidário à haste, principalmente quando as sondagens ocorrem

⁵¹ Não há consenso entre os autores sobre o valor típico ou padrão para a gravidade terrestre, mas há concordância

que ela varia de acordo com a latitude e a altitude: Maroja et al. (2005).

em solos relativamente fofos (ou soltos) como os que compõem a camada de aradura.

Mesmo antes de receber o golpe da queda do martelo, todo o equipamento (penetrômetro) estará apoiado, devido ao seu peso, sobre a ponteira cônica, transmitindo tensão de ruptura ao solo. Fica fácil de compreender que, se o solo se encontrar num estado suficientemente solto devido às operações de preparo periódico, não será necessário empreender nenhum impacto para que o cone inicie a penetração. Assim, para determinar o índice de cone (I_c), necessita-se considerar o efeito da tensão (τ) resultante do peso do equipamento em relação à área da secção transversal do cone (A_c), que será:

$$\tau = \frac{(M + m)g}{A_c} \quad (5.13)$$

O índice de cone será, portanto, determinado pela equação 5.14, quando da utilização de penetrômetros de impacto com área da secção transversal da ponteira cônica A_c e quando forem necessários N golpes para penetração padrão.

$$I_c = \frac{(M + m)g}{A_c} + N \left[\frac{M^2gh}{(M + m)A_c} \right] \quad (5.14)$$

Considerando a somatória da massa do martelo e do restante dos dispositivos utilizados para penetração do cone no solo ($M + m$) como sendo P e simplificando a equação 5.14, tem-se:

$$I_c = \frac{g}{A_c} \left[N \left(\frac{M^2h}{P} \right) + P \right] \quad (5.15)$$

Esta equação (5.15) poderá ser utilizada em qualquer circunstância. No entanto, se o solo apresentar pequena resistência à penetração (como seria o caso dos solos cultivados e recen-

temente mobilizados, por exemplo), cada impacto provocado pelo martelo poderá provocar penetrações relativamente grandes se comparadas aos solos mais compactos. Nestes casos torna-se desnecessário o cálculo da penetração padrão N e a equação a ser utilizada eliminaria tal valor, sendo acrescida do valor unitário n da penetração observada a cada impacto, passando a ser:

$$I_c = \frac{g}{A_c} \left(\frac{M^2h}{Pn} + P \right) \quad (5.16)$$

Quando não são necessários valores com precisão elevada, pode-se também considerar a gravidade terrestre como uma constante e a equação 5.15 ficaria ainda mais reduzida, uma vez que a área da base do cone é também uma característica fixa do aparelho.

No entanto, ao se tratar de pesquisas nas quais os valores devem ser mais precisos (nos laboratórios de solos, utilizam-se balanças que medem massas com erros da ordem de 10^{-5} kg) a variação da gravidade com a altitude e com a latitude⁵² deveria ser considerada, sob risco de contribuir para a propagação de erros na tomada das medidas, caso tais variações sejam negligenciadas. O Apêndice 2 mostra, resumidamente, um método de determinação do valor da gravidade terrestre em relação à variação de latitude e altitude.

Utilizando as informações da tabela 5.4, foram calculados os índices de cone correspondentes, para o mesmo ensaio de resistência à penetração, tendo em consideração a aceleração gravitacional na região de Piracicaba - SP (latitude $22^{\circ}42'S$, altitude de 574m em relação ao nível do mar.), massa do martelo 4 kg e massa total do penetrômetro 7,2kg ($m = 3,2$ kg)⁵³. O resultado está apresentado na figura 5.9 em duas versões, de acordo com as equações 5.15 e 5.16.

⁵² Consequências da força centrífuga provocada pela rotação do planeta em torno de seu eixo imaginário e do aumento

da distância entre os centros de massa dos corpos em questão devido à altitude.

⁵³ Conforme Stolf (1990).

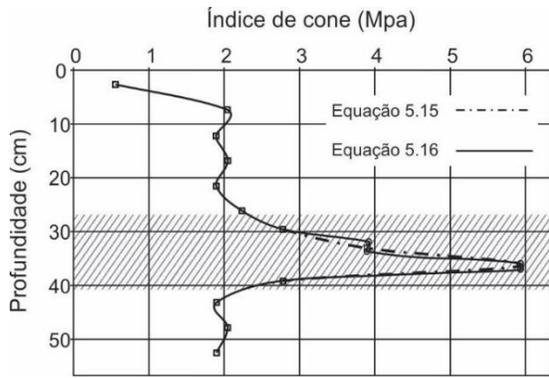


Figura 5.9. Resultado de ensaio hipotético para determinação de resistência à penetração com penetrômetro de impacto, apresentado em função do índice de cone, com base na tabela 5.4.

Para traçar a linha referente à equação 5.16, que considera somente um impacto e a respectiva penetração, o valor de n considerado foi a média aritmética da penetração observada entre as profundidades de 31 a 37,5cm, apresentadas na tabela 5.4. Pode-se notar que o gráfico construído com a utilização da equação 5.16 mostra-se mais completo por possuir maior número de informações.

Da mesma forma que quando os resultados foram apresentados em função da penetração padrão, é possível identificar a região (profundidade) de maior resistência à penetração, que está demarcada com a área hachurada.

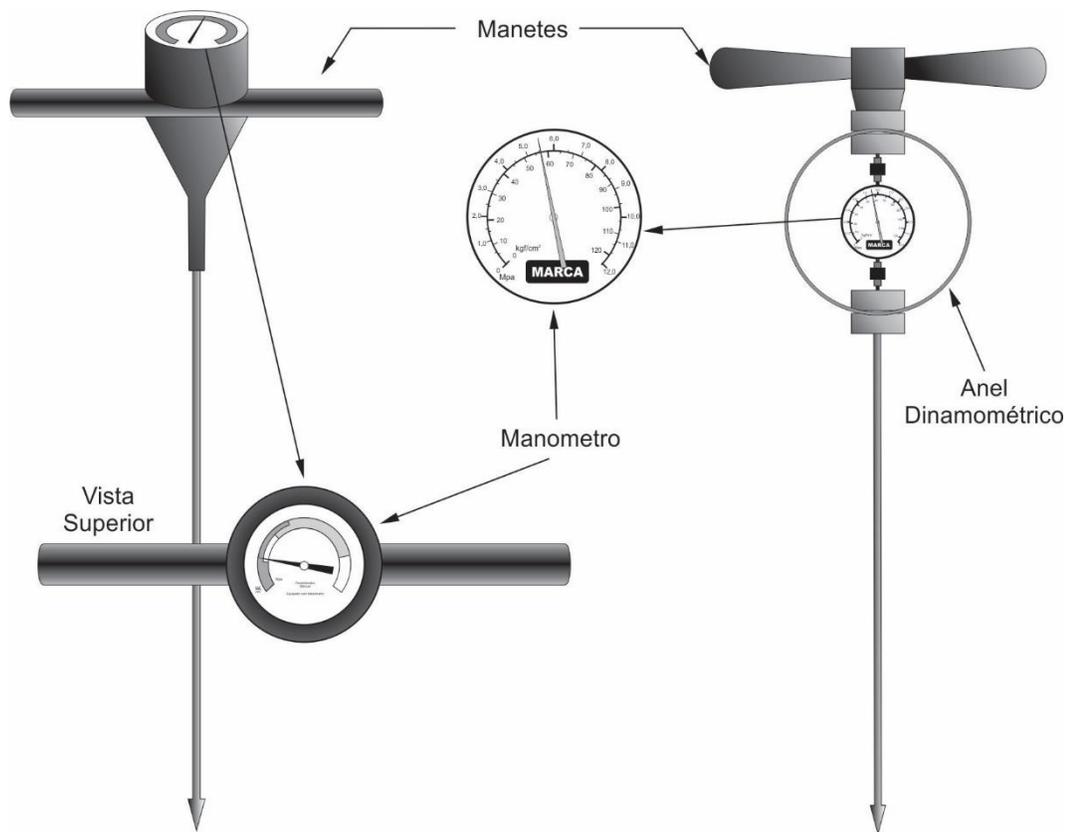


Figura 5.10. Representação artística de dois tipos comuns de penetrômetros utilizados no meio agrícola.

5.2.2 Penetrômetro manual

Os penetrômetros manuais são equipamentos classificados como *estáticos* e, portanto, a energia utilizada para provocar a penetração da ponteira cônica no solo é introduzida de forma contínua. Neste caso, para equipamento manual, ela é derivada do esforço muscular de um operador humano. A figura 5.10 mostra os tipos mais comuns de equipamentos utilizados na agropecuária.

O equipamento padrão possui uma ponteira cônica que é solidária a uma das extremidades da haste metálica. A outra extremidade está associada a um manômetro elástico⁵⁴ que mede diretamente o índice de cone, em função das dimensões padronizadas⁵⁵ do cone. Como pode ser observado pelas ilustrações da figura 5.10, a cravação do cone no solo acontece quando o operador empunha o penetrômetro pelos manetes⁵⁶ e apoia-se sobre eles. O peso de seu corpo, então, empurra o equipamento contra a superfície do solo. Equipamentos deste tipo não permitem registro das informações de maneira que elas sejam gravadas de alguma forma.

Os resultados obtidos das leituras dos dispositivos indicadores (manômetros) deverão ser registrados visualmente pelo operador, por observação do ponteiro do mostrador e relacionados com a profundidade em que se encontra o cone no momento da leitura. As regras propostas pela ASAE (1999), indicam que a velocidade de penetração deverá ser constante e o mais

próxima possível de $3 \cdot 10^{-2} \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ (30mm/s), sem ultrapassar este valor⁵⁷. Além disso, será também necessário anotar os valores correspondentes a todas as leituras. Portanto, fica claro que, na prática, é extremamente custoso realizar a operação, principalmente para um operador solitário. Em função dos requisitos operacionais o resultado das determinações será sensivelmente influenciado pela dificuldade de manutenção de um padrão que se adeque às normas, devido à quantidade de variáveis envolvidas.

De acordo com orientação do Exército Brasileiro⁵⁸ a operação para obter o índice de cone com penetrômetros manuais em atividades relacionadas com a construção de estradas segue algumas recomendações padronizadas. Não havendo nenhum padrão para uso desses equipamentos na atividade rural, tais recomendações foram adaptadas, uma vez que os instrumentos possuem dimensões e construção equivalentes e a região submetida à sondagem encontra-se dentro da mesma profundidade. Portanto, sugere-se que para operar com penetrômetros manuais nas atividades voltadas à produção agrícola, pecuária e florestal, deva-se proceder da seguinte forma:

- a) Pender verticalmente o penetrômetro, segurando-o num ponto situado acima do manômetro e verificar a coincidência da agulha do mostrador com o “zero” da escala. Caso haja discordância de posição, proceder ao ajuste permitido;
- b) Segurar o penetrômetro pelos manetes, com ambas as mãos, em ângulo reto em relação ao

⁵⁴ Tipo manômetro de Bourbon

⁵⁵ No Brasil não há padronização nem normatização oficial para os penetrômetros e penetrógrafos, de modo que é comum utilizar as normas fixadas pela ASAE - American Society of Agricultural Engineers, tanto no que se refere às suas dimensões e construção, como na utilização e reporte

das informações obtidas com sua aplicação, sendo as mais recentes datadas de 1999.

⁵⁶ Também denominados, empunhaduras, maçanetas ou guidão.

⁵⁷ Molina Jr et al (2013) mostram que, para algumas situações, variações de velocidade, mesmo que pequenas, podem alterar o valor do índice de cone.

⁵⁸ Brasil (2001)

- solo, mantendo a haste na vertical ao apoiá-lo no terreno. A posição de trabalho deverá ser em pé com o mostrador do manômetro voltado para o operador;
- c) Aplicar força verticalmente ao aparelho até que se inicie um movimento lento e uniforme para baixo;
 - d) A primeira leitura de posição da agulha do manômetro deverá ocorrer exatamente quando a penetração do cone for tal que sua base esteja nivelada com a superfície do solo;
 - e) Continuar o procedimento descrito em “c”, lenta e uniformemente para baixo e fazer sucessivas leituras no mostrador em intervalos apropriados, previamente definidos (sugere-se intervalo mínimo de 8cm e máximo de 15cm);
 - f) As leituras se encerram quando a distância entre a base do suporte do dispositivo de medição e o solo for inferior ao intervalo definido para as leituras.

A operação deve ser cuidadosa para não danificar o instrumento e evitar introdução de “vícios” que possam interferir na qualidade das leituras. Os cuidados para tal são:

- a) Manter o instrumento na vertical.
- b) Se, em qualquer profundidade, a capacidade máxima do manômetro for atingida pelo esforço do operador, em nenhuma hipótese dever-se-á aumentar a força com o objetivo de vencer a resistência do solo, sob pena de danificar o aparelho;
- c) Caso a situação prevista no item (b) ocorra, a sondagem do local deve ser abortada e uma nova tentativa deverá ocorrer num local vizinho, pois a dificuldade de penetração pode estar ligada a existência de um fragmento rochoso como um seixo ou qualquer outro objeto rígido na subsuperfície;

- d) Ao retirar o instrumento do solo após uma sondagem, faça-lo puxando-o pela haste e nunca pelos manetes, sob pena de danificar o manômetro.

5.2.3 Penetrógrafos

A possibilidade de ter o índice de cone como aliado na determinação de características físicas do solo desencadeou a realização de pesquisas que melhoraram o conhecimento do comportamento do solo em relação à resistência à penetração do cone. Com a consequente difusão deste conhecimento e das aplicações dos métodos de análise dos resultados das medições, tornou-se necessário o desenvolvimento de equipamentos que registrassem os resultados de maneira confiável e prática, se possível automaticamente.

Assim, surgiram os *penetrógrafos*, capazes de guardar as informações obtidas no campo, em tempo real, para que fossem posteriormente utilizadas e processadas. Tais sistemas de registro de informação proporcionaram a eliminação de uma das principais causas de variação introduzida pela ação humana quando da utilização dos equipamentos estáticos, que seria a interrupção do movimento de introdução do cone no solo, para realizar a leitura do manômetro.

Os penetrógrafos podem ser manuais ou, de alguma forma, associados a dispositivos eletromecânicos de comando e controle, o que confere isenção de interferência humana na sua utilização, tanto no que diz respeito a variações da força aplicada à haste como na velocidade de penetração.

Os penetrógrafos mais simples utilizados na atualidade estão representados na figura 5.11. Trata-se de um equipamento manual, cujo funcionamento é similar aos mostrados na figura 5.10. O anel dinamométrico foi substituído por

uma mola helicoidal e o manômetro por um dispositivo registrador. A mola helicoidal está posicionada verticalmente e é solidária de um lado aos manetes e do outro à haste, de modo que ela

se deforma quando o equipamento for pressionado para introduzir o cone no solo, reduzindo seu comprimento. Conforme preconizado pela lei de Hooke⁵⁹ a deformação da mola será constante e proporcional à força a ela imposta.

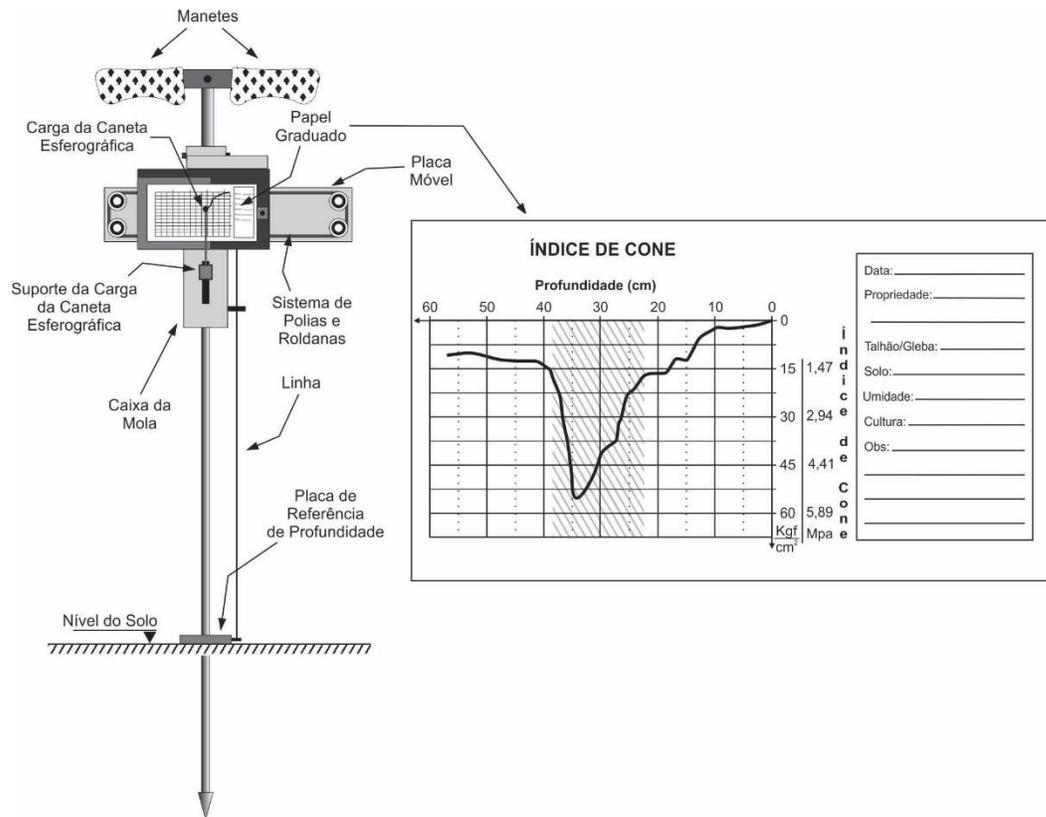


Figura 5.11. Penetrógrafo manual de molas que registra as informações em papel, gerando um gráfico com os valores do índice de cone e respectiva profundidade de determinação. A região hachurada na planilha à esquerda da figura identifica a porção mais adensada do solo, onde se registrou maior dificuldade de penetração do cone.

Ligado à mola do dinamômetro existe um suporte no qual fica instalado o marcador (que pode ser a carga de uma caneta esferográfica), cujo objetivo é registrar a deformação vertical da mola e o deslocamento da ponteira cônica em profundidade. Para isso, utiliza-se um papel devidamente graduado com linhas que demarcam

grandezas de tensão para registro do índice de cone.

Um mecanismo composto de polias e roldanas promove o deslocamento lateral de uma placa metálica, que é proporcional à penetração da haste no solo. Este movimento é comandado pelo posicionamento de uma placa de metal ligada ao mecanismo por um cabo inextensível

⁵⁹ **Robert Hooke** (1635-1703): cientista e inventor britânico cujos interesses foram dedicados a vários ramos do conhecimento, dentre os quais física,

astronomia, química, biologia, geologia, arquitetura e tecnologia naval. Demonstrou a equação que descreve a elasticidade, conhecida como lei de Hooke. Guerrini (2012).

e que é posicionada no nível do solo quando do início da medição. Ela possui um orifício central por onde passa o cone e a haste. À medida que a haste se desloca verticalmente, a posição relativa entre a placa que está no solo e a base da mola é alterada e, com o enrolamento do cabo, o mecanismo se desloca horizontalmente, possibilitando que o marcador desenhe uma linha, registrando o movimento.

O papel graduado colocado na placa móvel possui também linhas referenciais horizontais calibradas de acordo com os deslocamentos previstos para as movimentações vertical da penetração da haste, para demarcação dos valores de profundidade. A combinação dos movimentos em ambas as direções associada ao contato do marcador deixa um traço no papel, conforme o que mostra a figura 5.11. As linhas pré-existent no papel e sua escala permitem a leitura do valor do índice de cone a uma dada profundidade, ao longo do comprimento da haste.

É evidente que ao dar início às medições deve-se posicionar o marcador (pena da caneta esferográfica) exatamente no ponto de origem da abscissa e da ordenada que representam respectivamente os valores de profundidade e índice de cone, além de cuidar para que a colocação do papel registrador esteja devidamente ajustada na sua posição, como forma de evitar a introdução de variações ou erros nessas medidas. Após cada amostragem uma nova folha de papel é colocada no aparelho, possibilitando novo registro.

No final dos trabalhos uma coleção de folhas contendo as linhas demarcadas em cada sondagem é levada ao escritório onde será feita a tabulação das informações, possibilitando o estudo das condições em que se encontra o solo da área amostrada.

O avanço da eletrônica possibilitou a substituição dos mecanismos utilizados no pene-

trógrafo manual descrito anteriormente por sensores e dispositivos de memória que armazenam grande quantidade de informação. A princípio o emprego de equipamentos desta natureza se restringiu a órgãos e instituições de pesquisa, devido ao alto custo dos componentes integrantes do sistema. Estes equipamentos receberam a denominação genérica de *penetrógrafos eletrônicos*.

O desenvolvimento da tecnologia de produção dos sensores eletrônicos e a consequente diminuição de preços dos componentes, possibilitou a construção e o acesso a equipamentos com maior nível de sofisticação eletrônica. Basicamente eles são compostos de uma célula de carga para medir a força com que a haste está sendo introduzida no solo (e que substitui a mola helicoidal) e um dispositivo que mede o deslocamento desta mesma haste, frequentemente um sensor magnético ou luminoso.

Neste tipo de equipamento, ao mesmo tempo em que se procede à penetração do cone, os sensores emitem sinais que serão transformados em valores de índice de cone e profundidade, armazenados na memória do aparelho e, geralmente, convertidos em arquivos que podem ser lidos por aplicativos próprios dos computadores pessoais. Ao final dos trabalhos todas as informações serão automaticamente convertidas numa planilha de cálculo que será consultada e tratada de acordo com a conveniência e necessidade do técnico responsável.

Todos os equipamentos mecânicos como os descritos anteriormente e esquematizados nas figuras 5.10 e 5.11 são de operação manual. Quando se trata de penetrógrafos eletrônicos, por sua vez, podem ser manuais, acoplados a tratores agrícolas ou qualquer outro veículo que proporcione rápido deslocamento pelo campo. Devido à facilidade de operação e rapidez na aquisição de dados (o tempo dispendido entre duas determinações pode ser menor que 1 minuto, para profundidade média de 0,6m) estes equipamentos

possibilitam a sondagem de enormes áreas em curto período de tempo. Os veículos que os carregam podem ser equipados com sistemas de geoposicionamento para referenciar geograficamente cada uma das medições e produzir informações que permitem tomadas de decisão relacionadas com os conceitos mais modernos de agricultura de precisão.

5.3 Resultados e consequências das medidas de índice de cone

O desenvolvimento vegetal e a produção das *commodities* que compõe o agronegócio estão, de maneira geral, intimamente associados a três fatores naturais básicos relacionados ao solo: disponibilidade de nutrientes de origem química, capacidade de armazenamento de água e aeração proporcionada pelos espaços vazios.

Quanto ao fornecimento de nutrientes, desde o século XIX pesquisadores vêm estudando compostos de origem mineral e orgânica que podem fornecer às plantas o que é suficiente e necessário à produção e adequado às necessidades econômicas das atividades rurais. A tecnologia para tal, na atualidade, encontra-se perfeitamente dominada.

No entanto, a técnica utilizada para manejo dos solos experimenta dúvidas maiores. Embora consideráveis progressos tenham sido conseguidos nos anos mais recentes, principalmente com a adoção das técnicas associadas ao sistema de semeadura direta, ao contrário do que se pudesse esperar, a compactação persiste e se instala devido ao tráfego de máquinas motoras e movidas cujos sistemas de rodado e de deposição de sementes provocam altas tensões na superfície. Se, nos sistemas convencionais de cultivo ela pode ser encontrada em profundidades que podem, com frequência, ultrapassar os 25 centímetros, no sistema de semeadura direta sua ocorrência se dá muito mais superficialmente. O resultado

disso, no entanto, tem os mesmos efeitos no desenvolvimento vegetal e por consequência, na produção, embora em diferentes intensidades. Sendo assim, a compactação interfere nos outros dois fatores naturais de produção – umidade e aeração.

Ao provocar o rearranjo das partículas do solo, a compactação diminui a porosidade e por consequência a aeração e a infiltração de água, o que diminui sua disponibilidade aos vegetais, principalmente nos períodos de veranicos ou estiagens, além de promover a erosão e o assoreamento dos cursos d'água e lagos (naturais ou artificiais). Sabe-se que estes efeitos são menores no sistema de semeadura direta.

No entanto, a semeadura direta ainda não pode ser um sistema empregado em todas as regiões, pois sua prática é limitada por condições climáticas ou características culturais. O caso brasileiro é particularmente importante, pois uma só cultura, a da cana-de-açúcar, ocupa atualmente área de sete milhões de hectares. As perspectivas de crescimento desta área, conforme mostram projeções da figura 5.12, estimam que se possa chegar a 2030 com área ocupada pela cultura da ordem que quatorze milhões de hectares.

A área atualmente ocupada somente pela cultura da cana-de-açúcar no Brasil é equivalente à de países como a Irlanda, Panamá ou República Tcheca. A se confirmarem as previsões, para a safra de 2030, ela seria maior que a Bulgária, Cuba, Nicarágua ou Grécia. A importância deste fato se dá porque toda esta área é cultivada com técnicas convencionais, o que significa mobilização total da área invertendo as camadas do perfil com aração e gradeação como método de preparo de solo para implantação da cultura. Além disto, as características culturais imprimem às áreas de cultivo intenso tráfego por ocasião dos tratamentos culturais e da colheita e, por conseguinte, observam-se elevados níveis de compactação.

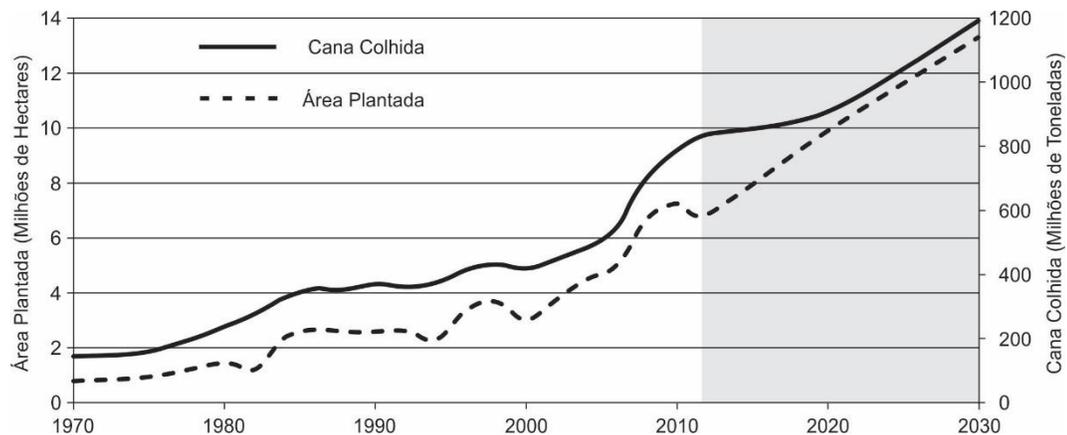


Figura 5.12. Crescimento da área do canavial brasileiro e da produção de cana-de-açúcar (histórico e projetado) entre 1970 e 2030. Adaptado de Torquato (2006), EPE (2007) e UNICA (2014).

Desde que se iniciou a medição da resistência à penetração do cone no solo agrícola ela tem sido utilizada como ferramenta de reconhecimento do seu estado físico. Na grande maioria dos relatos, o índice de cone teria como objetivo a determinação do estado de compactação em que ele se encontra. Determinar o grau de compactação de um solo pode orientar os profissionais das ciências agrárias no sentido de minimizar seus efeitos e consequências, tornando as operações (mecanizadas ou não) de manejo do solo mais eficientes.

Sabe-se que quando a densidade relativa do solo aumenta, ocorrem problemas com o desenvolvimento de plantas, os quais são atribuídos a diversas causas. Uma das consequências mais evidentes da compactação são os efeitos provocados no sistema radicular das plantas cultivadas, fazendo com que seu crescimento seja irregular, tanto no que se refere à massa de raízes quando comparada à uma situação de solo mais favorável, quanto à sua morfologia. As raízes normais apresentam formas da secção transversal arredondadas, e seu desenvolvimento linear é, em geral, suave e contínuo. Quando ocorre compactação a secção

transversal das raízes é francamente oblonga ou ovalada podendo-se observar que seu desenvolvimento longitudinal apresenta dobras acentuadas, incomuns em condições normais. Tal fato, acredita-se, dificultaria as funções específicas do sistema radicular e prejudicaria o metabolismo vegetal, reduzindo a produção. A figura 5.13 mostra o desenvolvimento radicular de uma soqueira de cana-de-açúcar, numa situação em que foi detectada diferença de densidade em um solo contendo 60% de argila. A região isenta de raízes (hachurada) apresenta valores de densidade da ordem de $1,45\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$ enquanto que as outras regiões possuem densidade de $1,19\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$.

No entanto, as correlações entre densidade do solo e desenvolvimento radicular não podem ser generalizadas, pois estão associadas a diversos fatores, podendo-se citar a umidade e a granulometria do solo como as mais importantes. A densidade observada no estudo que originou a situação da figura 5.13 como exercendo influência impeditiva ao desenvolvimento radicular da cana-de-açúcar ($1,45\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$), poderia não resultar no mesmo efeito caso a proporção de argila fosse menor conferindo ao solo uma textura arenosa.

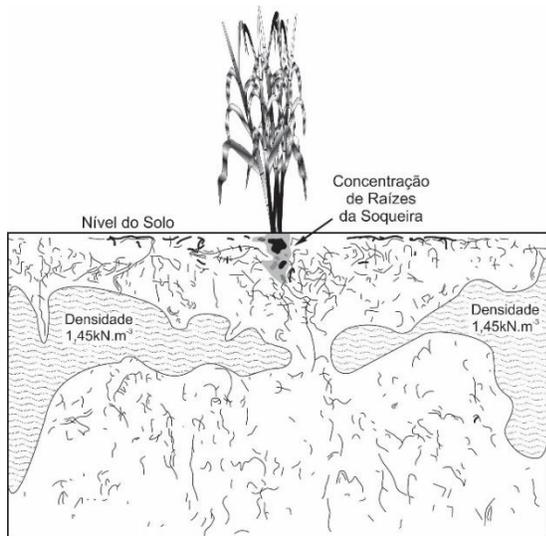


Figura 5.13. Representação artística do sistema radicular da cana-de-açúcar, mostrando região onde se verificou impedimento para o desenvolvimento radicular, creditado ao aumento de densidade do solo. Adaptado de Vasconcelos & Miranda (2011) apud Vasconcelos et al. (2004).

Mais problemático ainda seria generalizar as relações entre resistência à penetração do cone, compactação de um solo e impedimento ao desenvolvimento radicular. Não se pode esquecer de considerar que o que interessa ao empreendedor do agronegócio é a produção e, muitas vezes, não é seguro afirmar que os indicativos de compactação ou de resistência à penetração do cone interfiram de forma decisiva na capacidade produtiva das culturas.

A figura 5.14 apresenta resultado de pesquisa realizada em solo de textura muito argilosa (presença de argila acima de 78%), com duas cultivares de soja⁶⁰ em condição de tráfego intenso (compactado – densidade $1,38\text{kN.m}^{-3}$) e escarificado (não compactado – densidade $1,17\text{kN.m}^{-3}$).

Verificou-se que, apesar das diferentes condições físicas e de resistência à penetração do cone, não houve diferença de produtividade. Além disso, apesar de se tratar de mesma espécie, uma das cultivares apresentou maior capacidade de desenvolver o sistema radicular em maior profundidade quando comparada com a outra, embora a quantidade total de raízes tenha sido equivalente.

Os autores concluíram que não há correlações entre os valores de resistência à penetração do cone na determinação do estado de compactação do solo e o crescimento radicular. Outra condição importante a ser considerada neste estudo é que ele aconteceu num período em que não foi observada restrição hídrica. Por isso, talvez, a compactação do solo não tenha sido determinante na produtividade.

Outro experimento, com milho, mostra conclusões contrárias ao da soja. A granulometria do solo em que se instalou o experimento apresenta característica arenosa (presença de areia acima de 63%) que sofreu compactação pelo tráfego forçado de um trator agrícola.

Concluiu-se que a compactação teve influência decisiva no desenvolvimento radicular, tanto no que se refere à quantidade como à formação (avaliada pelo diâmetro das raízes).

Entre a semeadura e o pendoamento ocorreu deficiência hídrica importante sendo que, num período de 13 dias, a umidade do solo esteve próxima do ponto de murcha permanente. A produtividade média obtida nos seis ensaios resultou na distribuição representada no gráfico da figura 5.15, mostrando decréscimo linear de produção, à medida que ocorre aumento do índice de cone.

⁶⁰ A área de soja cultivada atualmente no Brasil (mais de 24 milhões de ha) é maior que a do Reino Unido (Inglaterra, Escócia, País de Gales e Irlanda do Norte).

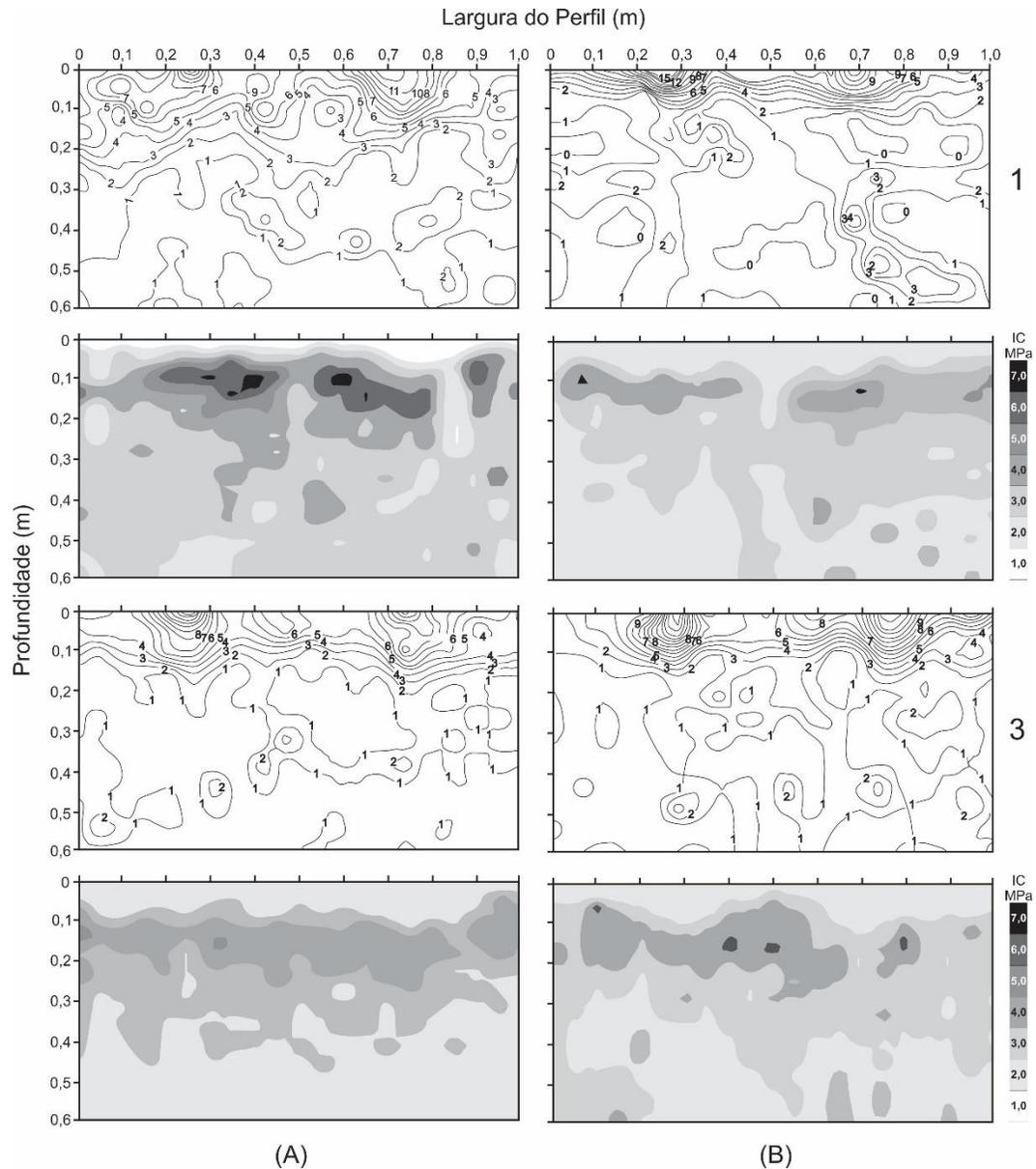


Figura 5.14. Distribuição de raízes (cm.cm^{-3}) e índice de cone do solo, para as variedades de soja Embrapa-4 (coluna A) e BR-16 (coluna B). Solo compactado (linha 2) e não compactado (linha 4). Adaptado de Cardoso et al. (2006).

A bibliografia está repleta de estudos e pesquisas que tentam correlacionar as medições de índice de cone com desenvolvimento radicular, densidade do solo e produtividade das plantas cultivadas. Dentre eles, ocorrem inúmeros casos controversos como os apresentados.

No entanto, em todos os casos é possível correlacionar o aumento do índice de cone com

o aumento da densidade do solo, embora dependente da umidade em que ele se encontra.

Existe, portanto, consenso em determinar a profundidade da camada de maior resistência à penetração do cone e relacioná-la à região em que se encontra a camada compactada de um solo. Este seria um indicativo importante e fundamental

para regulação (posicionamento) das ferramentas que equipam as máquinas e implementos de mobilização de solo, quando se constata agronomicamente a necessidade de realização de operações corretivas de adequação do solo às exigências da atividade produtiva.

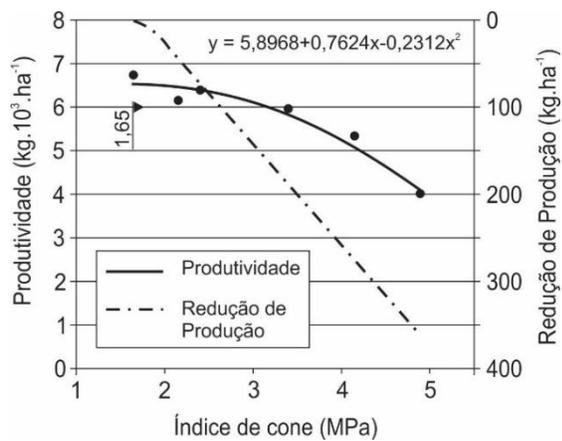


Figura 5.15. Comportamento da produtividade do milho em relação ao aumento do valor do índice de cone. A redução de produção foi determinada com o emprego da equação de regressão. Adaptado de Freddi et al. (2007).

BIBLIOGRAFIA CONSULTADA

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6484. Solo – Sondagem de simples reconhecimento com SPT – Método de ensaio. 2001. 17p.

ASAE. AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL ENGINEERS. **Procedures for using and reporting data obtained with the soil cone penetrometer**. In: ASAE Standards 1999: standards engineering practices data, 46ed. St Joseph, 1999. p.964-6. (ASAE EP542).

ASAE. AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL ENGINEERS. **Soil cone penetrometer**. In: ASAE Standards 1999: standards engineering practices data, 46th ed. St. Joseph, 1999. p.834-835 (ASAE S313.1).

BIANCHINI, A., MAIA, J.C.S., MAGALHÃES, P.S.G., CAPPELLI, N., UMEZU, C.K. **Penetrógrafo eletrônico automático**. Revista brasileira de engenharia agrícola e ambiental, Campina Grande, v.6, n.2, p.332-336, 2002.

BRASIL. Exército. Estado-Maior. Portaria Nº 149, de 19 de dezembro de 2001. **Manual de Campanha C 5-38 – ESTRADAS**. 1. ed., Brasília, DF, 2001.

BUENO, B.S., VILAR, O.M. **Mecânica dos solos, Volume I**. São Carlos: Universidade de São Paulo/EESC, 1984. Publicação 062/94. 131p.

CAMARGO, O.A., ALLEONI, L.R.F. **Compactação do solo e o desenvolvimento das plantas**. Piracicaba: Degaspari, 1997. 132p.

CAPUTO, H.P. **Mecânica dos solos e suas aplicações**. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 1973. 456p.

CARDOSO, E.G., ZOTARELLI, L., PICCININ, J.L., TORRES, E., SARAIVA, O.S., GUIMARÃES, M.F. **Sistema radicular da soja em função da compactação do solo no sistema de plantio direto**. Brasília: Pesq. agropec. bras., v.41, n.3, p.493-501, 2006;

EPE. Empresa de Pesquisa Energética. Plano Nacional de Energia 2030. 2007. Disponível em: http://www.mme.gov.br/mme/galerias/arquivos/publicacoes/pne_2030/PlanoNacionalDeEnergia2030.pdf. Acesso em: 07 mai. 2014.

FREDDI, O.S., CENTURION, J.C., BEUTLER, A.N., ARATANI, R.G., LEONEL, C.L. **Compactação do solo no crescimento radicular e produtividade da cultura do milho**. Viçosa, Revista Brasileira de Ciência do Solo, n.10, p.91-95, 1986.

FREDRICKSON, R.J. **The static cone penetrometer: the equipment and using data**. Washington: United States department of agriculture - soil conservation service, Soil mechanics note nº 11, 1984. 11p.

FUKA, M., MARSCHALCO, M., KŘÍSTKOVÁ V., KOVÁŘ, L. **Research of application of dynamics penetration test for improvement engineering geological investigation possibilities in Ostrava basin**. GeoScience Engineering, v. LV, n.3, p. 1-11, 2009. ISSN 1802-5420.

GUERRINI, I.M. **Deformação elástica: lei de Hooke**. Disponível em: http://educar.sc.usp.br/sam/hooke_roteiro.html. Acesso em 12 jan. 2012.

HERRICK, J.E., JONES, T.L. **A dynamic cone penetrometer for measuring soil penetration resistance**. Madison: Soil Sci. Soc. Am. J. n.66, p.1320–1324, 2002.

KEES, G. **Hand-Held Electronic Cone Penetrometers for Measuring Soil Strength**. Missoula, United States department of agriculture - forest service, 2E22E60 - Soil Strength Tester, 2005. 12p.

KIM, K., PREZZI, M., SALGADO, R. **Interpretation of cone penetration tests in cohesive soils**. Publication FHWA/IN/JTRP-2006/22. Joint Transportation Research Program, Indiana Department of Transportation and Purdue University, West Lafayette, Indiana, 2006. doi: 10.5703/1288284313387

LOPES, W. **Variação da aceleração da gravidade com a latitude e a altitude**. Florianópolis: Caderno Brasileiro de Ensino de Física, v.25, n.3, 561-568, 2008.

MAROJA, A.M., VITURINO, M.F.C., PEREIRA, J.S. **Medida da aceleração da gravidade**. In: XVI Simposio Nacional de Ensino de Física, 2005, Rio de Janeiro, p.1-4. Disponível em <http://www.sbf1.sbfisica.org.br/eventos/snef/xvi/cd/resumos/T0297-1.pdf>. Acesso em: 07 jan. 2012.

MAYNE, P.W. **Cone penetration test – a synthesis of highway practice**. Washington, D.C.: Transportation Research Board, 2007. 117p.

MITCHELL, J.K. **Fundamentals of soil behavior**. New York, John Wiley & Sons, 2ed., 1993. 437p.

MITCHELL, J.K., SOGA, K. **Fundamentals of soil behavior**. New York, John Wiley & Sons, 3ed., 2005. 565p.

MOLINA JR, W. F.; PIEDADE, S. M. S.; AMARAL, J. R. **Penetration resistance in a latosol under different moisture and penetration speeds**. Revista Ceres, v. 60, n. 5, p. 715-721, 2013.

NOGUEIRA, J.B. **Mecânica dos solos**. São Carlos, USP/EESC, 1988. Publicação 042/94. 197p

ROBERTSON, P.K., CABAL, K.L. **Guide to Cone Penetration Testing for Geotechnical Engineering**. Signal Hill: Gregg Drilling & Testing, 2010. 124p.

SÁ, M.A.C., SANTOS JR, J.D.G. **Considerações teóricas sobre o cálculo da resistência mecânica à penetração determinada com penetrômetros dinâmicos**. Planaltina: Embrapa Cerrados – Documentos 200, 2007. 27p.

SALGADO, R., YOON, S. **Dynamic cone penetration test (DCPT) for subgrade assessment**. Indiana, Joint Transportation Research Program, Department of Transportation and Purdue University, 2003. Publication FHWA/IN/JTRP-2002/30 doi: 10.5703/1288284313196. 90p.

STOLF, R. **Operação do penetrômetro de impacto modelo IAA/Planalsucar-Stolf**. Piracicaba: IAA/ PLANALSUCAR., 1984. 8p. (Série Penetrômetro de Impacto. Boletim n.2).

STOLF, R. **Fórmulas de transformação dos dados de penetrômetro de impacto em força/ unidade de área**. In: XIX Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola - CONBEA, 1990, Piracicaba. v.2, p. 823-836. Anais.

STOLF, R., FERNANDES, J, FURLANI NETO, V.L. **Recomendação para o uso do penetrômetro de impacto modelo IAA/Planalsucar-Stolf**. Piracicaba: IAA/PLANALSUCAR, 1983. 9p. (Série Penetrômetro de Impacto. Boletim n. 1)

STOLF, R., MURAKAMI, J.H., MANIERO, M.A., SOARES, M.R., SILVA, L.C.F. **Incorporação de régua para medida de profundidade no projeto do penetrômetro de impacto Stolf**. In: XL Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola - CONBEA, 2011, Cuiabá. p. 1-10. DC-ROM.

TORQUATO, S.A. **Cana-de-açúcar para indústria: o quanto vai precisar crescer.** Análise e Indicadores do Agronegócio. São Paulo, v. 1, n. 10, out. 2006. Disponível em: <http://www.iea.sp.gov.br/out/LerTexto.php?codTexto=744>>. Acesso em: 16 jan. 2012.

TSHUA, C.H.C. **Utilização de penetrometro manual em solo colapsível e comparação com resultados de prova de carga em placa e em sapata.** São Carlos, EESC/USP. Dissertação de Mestrado, 57p. 2002.

UNICA. União da Agroindústria Canavieira. Unicadata. 2014. Disponível em: <http://www.unica.com.br/unica/?idioma=1>. Acesso 15 jul. 2014.

VASCONCELOS, A.C.M., **Dinâmica do desenvolvimento radicular da cana-de-açúcar.** In: VASCONCELOS, A.C.M., MIRANDA, L.L. Dinâmica do desenvolvimento radicular da cana-de-açúcar e implicações no controle de nematóides. Campinas: Os Autores, p. 10-43, 2011.

VILAR, O.M., BUENO, B.S. **Mecânica dos solos, Volume II.** São Carlos: Universidade de São Paulo/EESC, 1985. Publicação 080/94. 219p.

***Comportamento do Solo na Interação
com as Ferramentas e Sistemas de
Rodado dos Equipamentos Agrícolas***

O CULTIVO DO SOLO E SEUS OBJETIVOS

Fato: uma conclusão confirmada em tal medida que se torna razoável oferecer-lhe uma concordância provisória.

Michael Shermer

No Brasil a Lei nº 9.985, promulgada em 18 de julho de 2000 instituiu o Sistema Nacional de Unidades de Conservação da Natureza (SNUC), dentre as quais se encontram as florestas nacionais) e regulamenta atividades relacionadas às áreas de preservação. No artigo 2º parágrafo II define “conservação da natureza”: *manejo do uso humano da natureza, compreendendo a preservação, a manutenção, a utilização sustentável, a restauração e a recuperação do ambiente natural, para que possa produzir o maior benefício, em bases sustentáveis, às atuais gerações, mantendo seu potencial de satisfazer as necessidades e aspirações das gerações futuras, e garantindo a sobrevivência dos seres vivos em geral.*

Quando se consideram as áreas naturalmente preservadas (ou na sua utilização para qualquer fim, mas de forma sustentável), a ideia a ser formada não deve admitir uma comunidade ambiental estabelecida e equilibrada o suficiente

para ser imutável, no tempo e no espaço, a não ser que o período de tempo considerado e a área observada sejam previamente definidas e, ambos, relativamente pequenos. Em se tratando da vegetação que ocupa uma área natural, o que parece estável quando analisado em curtos períodos de tempo (dezenas e até centenas de anos) poderá não o ser quando este período for longo o suficiente para que mudanças climáticas interfiram decisivamente no ambiente. Da mesma forma, quando se analisam grandes extensões (como a Amazônia, por exemplo), o que parece um sistema fechado, capaz de autossustentação pode mostrar-se extremamente dinâmico quando observado numa área mais restrita. Além disso, por mais inofensiva que possa parecer, qualquer atividade humana a ser desenvolvida numa área de preservação causará perturbação, em algum grau de intensidade⁶¹.

⁶¹ *Whenever you put a foot down on forest or range land, you are - two a degree - compacting the soil. The hooves of*

cattle, the wheels of vehicles, the weight of a dragged log: all these can compact the soil too. Lull (1959).

No entanto e apesar disto, as comunidades biológicas terrestres em condições naturais, de maneira geral, possuem como característica intrínseca a capacidade de manter suas necessidades básicas de preservação em caráter sustentável, no longo prazo. Ou seja, sem a ocorrência de distúrbios catastróficos (como grandes incêndios – naturais ou não, inundações, erupções vulcânicas e coisas do gênero), uma vez estabelecidas e em equilíbrio, as comunidades cuidarão de preservar as condições de manutenção da vida como fertilidade do solo, disponibilidade de água e trocas internas de nutrientes, dentre outras não menos importantes. Mesmo em casos nos quais uma grande perturbação (natural) aconteça, a resposta da comunidade é pronta, no sentido de reestabelecer a condição original ou atingir uma nova situação de equilíbrio.

Como se observa ao longo da história, a evolução da espécie humana resultou nas exigências socioeconômicas da civilização moderna, tornando necessária a retirada da cobertura vegetal natural do solo (em áreas cada vez maiores) para implantação das atividades agrícola, pecuária e florestal⁶². Tal ação, que nos primórdios da civilização teria sido de pequena escala, realizada por grupos nômades intensificou-se principalmente depois do advento da mecanização das atividades no campo. Como os campos cultivados ou pastos perpetuam-se, a atividade produtiva no meio rural como a conhecemos na atualidade poderia ser considerada um distúrbio catastrófico. Embora tenha se manifestado de forma mais ou menos gradual, (ainda que num período de tempo relativamente curto), a ação humana não permite às comunidades perturbadas (no caso as áreas de matas, savanas, várzeas,

e outras ocupadas pela agricultura e pelos pastos) o processo natural de regeneração.

Além disso, o tipo de exploração agrícola convencional utiliza-se da tecnologia do cultivo do solo, provocando mobilização em área total, o que em alguns casos pode acontecer mais de uma vez por ano. Afortunadamente, o advento da técnica da semeadura direta evita que isto aconteça, resultando em situações favoráveis à preservação do solo, principalmente no que se refere à erosão.

De qualquer modo, algumas culturas agrícolas e diversas regiões do planeta possuem condições climáticas que ainda não permitem a utilização desta tecnologia e, portanto, as ações tradicionais de preparo do solo serão utilizadas, ainda, por longo período.

A denominação consagrada para as ações de cultivo convencional é *preparo periódico* do solo. Tal método foi largamente utilizado, desde os primórdios da agricultura, em todo o planeta para implantação de culturas cujo ciclo pode ser classificado como *anual*, pois seu desenvolvimento acontece entre a primavera (quando ocorre semeadura ou plantio) e o outono.

As finalidades do preparo de solo são as mais variadas e, no presente, discute-se sua real necessidade. As operações de mobilização no manejo convencional do solo classificam-se em *primária* e *secundária*, de acordo com o objetivo final desejado e com relação ao tamanho dos agregados resultantes da operação na chamada *camada de aradura* do terreno.

As operações realizadas no que se chama de manejo primário, são denominadas *aração* e os equipamentos que são responsáveis pela sua realização são os *arados*, cujo efeito é o de cortar

⁶² Há que se considerar também a ocupação de outras áreas destinadas às necessidades de urbanização, tanto nas cidades e complexos industriais, como demais instalações de infraestrutura como estradas, portos e

aeroportos, represas para geração de energia, etc. A distribuição proporcional da ocupação no Brasil é mostrada na figura A5 do Apêndice 1.

uma fatia de solo (denominada *leiva*), levanta-la, provocar seu fracionamento ou desagregação em torrões de tamanho adequado (ação também conhecida por esboroamento) e inverter a posição da leiva, expondo a parte inferior à ação do sol e da atmosfera. A figura 6.1 dá uma ideia do resultado da ação desta operação.

A condição encontrada na superfície do solo após o preparo primário é inadequada para a deposição de sementes ou órgãos propagativos de plantas, exigindo, portanto, que seja efetuada uma nova operação para redução de tamanho de torrões. As operações com tal objetivo constituem o que se convencionou chamar de *preparo secundário*, admitidas por alguns especialistas como *acabamento*, pois delas resulta uma superfície com um aspecto menos irregular que a deixada pela operação primária. Os equipamentos utilizados nesta operação são, na grande maioria

das vezes, denominados de *grades*, cujos órgãos ativos podem ser discos, dentes ou molas.

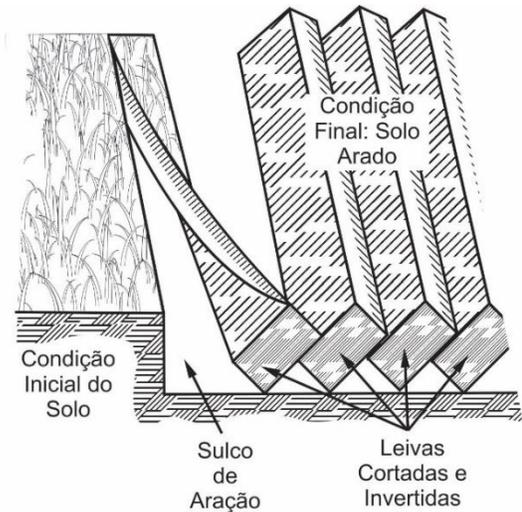


Figura 6.1. Representação do efeito da operação de preparo primário (aração) realizada num solo, mostrando as leivas e o sulco de aração.

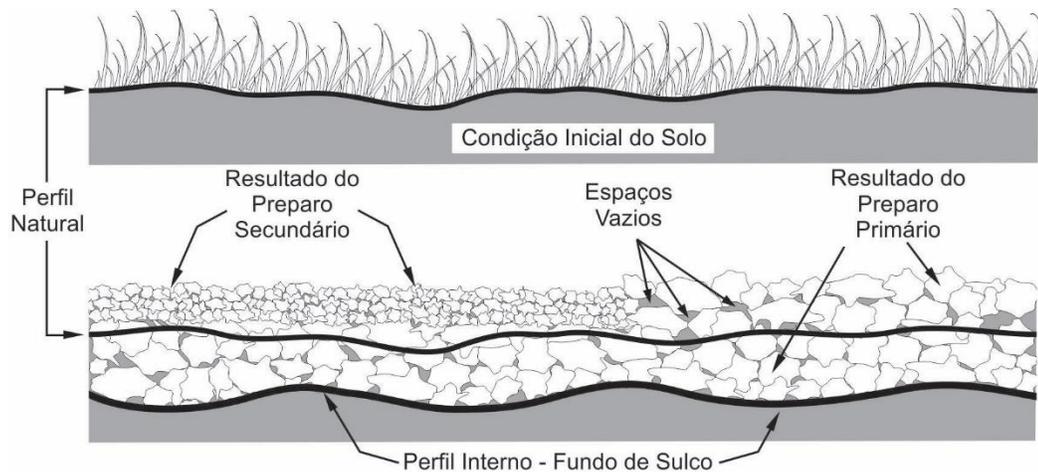


Figura 6.2. Perfil de um solo submetido ao preparo periódico. Na parte inferior, a parcela superficial do lado esquerdo, representa o resultado do preparo secundário: partículas menores, contendo menor quantidade de espaços vazios (portanto sob processo de compactação) se comparado com o restante, em que somente o preparo primário foi executado.

A figura 6.2 mostra esquema do que se espera para o resultado final da operação de preparo periódico do solo, quando ele apresentaria

condições ideais para receber as sementes ou órgãos propagativos das plantas. Verifica-se que as operações realizadas no preparo primário apresentam resultado grosseiro, com agregados de

tamanho maior e abundante quantidade de espaços vazios entre eles. Após o preparo secundário, o tamanho dos agregados e a quantidade de espaços vazios diminui.

Estas operações serão discutidas em detalhes (execução, equipamentos utilizados, suas regulagens, implicações ambientais e econômicas, eficiência, controle, etc.), noutra ocasião, por texto apropriado sobre equipamentos e técnicas de preparo do solo.

6.1 Objetivos do Preparo Periódico do Solo

A proposta básica do preparo de solo (ou cultivo) para instalação de culturas (plantio⁶³) é prover às plantas cultivadas um ambiente favorável à germinação e desenvolvimento vegetativo. Busca-se com estas operações a obtenção das melhores condições que proporcionarão às sementes umidade, calor e aeração suficiente para que o processo metabólico de germinação se inicie. Esta ação ocorre na região onde se deu o preparo secundário (figura 6.2), parte do perfil com torrões de menores dimensões, que é denominada *leito de sementeira*. Imagina-se que tais condições imporão menores exigências energéticas para eclosão das plântulas, por ocasião da germinação. Como “colaboração” para o processo, durante a operação de plantio imprime-se certa pressão na região onde foi depositado o elemento de propagação visando proporcionar contato íntimo com o solo com o objetivo de possibilitar a troca de calor e umidade (ver figura 6.3).

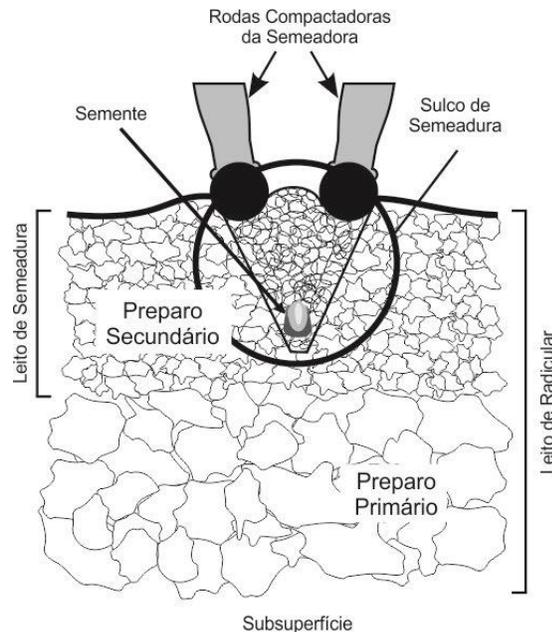


Figura 6.3. Esquema em corte, representativo da região onde ocorreu a operação de sementeira. Observa-se a posição da semente no sulco e sua posição relativa à região onde foram executadas as operações de preparo de solo primário e secundário.

No entanto, a pressão (ou compressão) do solo sobre a semente, o que tecnicamente é *compactação*, deve ser de tal ordem que a plântula tenha capacidade de eclodir sem que haja consumo excessivo de energia durante a germinação. Excesso de compressão pode resultar num *stand* inadequado, quer seja por inviabilizar a eclosão das plântulas (resultando em morte prematura por impedância mecânica na emissão do hipocótilo) ou da alongação da radícula (que formará futuras raízes), limitando a sobrevivência da planta. Apesar de tais condições serem comuns em culturas anuais que ocupam grandes extensões de terra, o resultado desejado pode ser comparado com um canteiro onde se cultivam hortaliças.

⁶³ Designação geral dada à operação de se colocar no solo sementes, órgãos de propagação vegetativa ou mudas, visando a instalação de uma cultura. Para cada um dos tipos de material utilizado a operação recebe uma designação,

a saber: sementes – *semeadura*; órgãos de propagação vegetativa – *plantio* e mudas (ou plântulas) – *transplante*. Mialhe (2012)

A região onde acontece o desenvolvimento radicular da planta é condicionada, principalmente, pelo preparo primário do solo e o ideal é que seja composta de agregados de tamanhos que proporcionem suficiente infiltração de água e movimentação de ar, sem que sejam facilmente desfeitos pela energia das gotas de chuva ou arrastados pela água que eventualmente venha a escorrer nos campos cultivados. Esta situação concorda com a analogia dos canteiros de hortaliças.

Além dos objetivos citados, há outros motivos para a utilização das operações de mobilização total do solo mediante as operações de cultivo tradicional. Pode-se, portanto, afirmar que o preparo convencional do solo tem como objetivos:

- Desagregar o solo, em caráter suficiente para aumentar seu volume e possibilitar melhores condições de germinação dos órgãos utilizados na propagação das plantas, a aeração do sistema radicular e o armazenamento de água;
- Condicionar o solo a uma situação tal que leve ao menor dispêndio de energia assim como menor número de outras operações necessárias à implantação de culturas ou de tratamentos culturais futuros;
- Incorporar restos de cultura, adubos verdes, fertilizantes e corretivos com o intuito de melhorar as condições de fertilidade do solo assim como promover homogeneização da fertilidade ao longo do perfil;
- Enterrar o mato que se desenvolveu entre a colheita de uma cultura e implantação da cultura seguinte, como forma de controle mecânico de plantas daninhas;

- Erradicar culturas semiperenes, numa ação similar à descrita no item anterior.

Apesar de alguns destes objetivos serem objetos de controvérsias, eles são claros para a maioria dos estudiosos do assunto *preparo do solo*. Na realidade o que se espera como resultado das operações é melhor produtividade em termos agrícolas. As condições de produção rural, quando se trata de plantas cultivadas, são baseadas no conhecimento de suas necessidades durante o desenvolvimento, sendo que cada estágio (germinação, emergência, crescimento, frutificação e colheita) exige condições específicas dos aspectos físicos produzidos pelas operações realizadas na mobilização do perfil do solo. Sabe-se, no entanto, que em boa parte das vezes, algumas das operações seriam desnecessárias, uma vez que técnicas não convencionais de implantação de culturas, com mobilização apenas na linha de semeadura (semeadura direta), obtêm produtividades equivalentes àquelas observadas com mobilização total da área. No entanto, a expectativa de melhores condições de produção com o emprego de técnicas convencionais ou não, provocam problemas muitas vezes de solução complicada, principalmente em se tratando de regiões tropicais.

O cultivo sequencial de uma única espécie, com a eliminação de outras plantas consideradas *daninhas*, como é o caso das explorações agrícolas convencionais, expõe o solo à ação da atmosfera e à radiação solar direta. Antes da semeadura ele é invertido incorporando o material de cobertura (mato ou restos culturais) o que contribui para a mineralização (resultando em diminuição sensível da quantidade de matéria orgânica presente) e para a erosão.

Durante o período que vai da germinação até a condição em que o desenvolvimento vegetativo da cultura seja suficiente para cobrir totalmente

o solo com sua folhagem ele estará exposto à ação da energia contida nas gotas de chuva, resultando em mais compactação e erosão. Os tratamentos culturais necessários (cultivo, combate a pragas e doenças, fertilização de cobertura e colheita) promoverão o tráfego dos rodados de tratores e demais equipamentos sobre a superfície (quase sempre úmida) causando, novamente, compactação. Por fim, a retirada da produção pela colheita fará a exportação de nutrientes que serão subtraídos da área, interferindo negativamente na fertilidade. Em seguida o terreno pode ser novamente semeado (portanto exposto a mais tráfego e mobilização) para uma segunda cultura (conhecida como safrinha) ou deixado em pousio até a próxima cultura, o que faz com que mais uma vez esteja exposto à ação da radiação solar e do impacto das gotas de chuva.

6.2 Preparo Vertical do Solo

Um dos efeitos da utilização de equipamentos cada vez maiores e mais pesados nos trabalhos de produção agrícola é o desenvolvimento de uma camada compactada na subsuperfície. As implicações desse fenômeno tornam necessárias operações de correção. Para tanto, a partir do início da segunda metade do século XX popularizaram-se máquinas e implementos destinados a tal fim, denominados *subsoladores*. Estes equipamentos consistem-se basicamente de hastes metálicas com formas variadas (retas – perpendiculares ou inclinadas em relação ao sentido de deslocamento ou então, curvas), providas de pontas cujo material é endurecido para suportar a abrasão provocada pelo atrito com o solo. A ponta da haste é responsável pelo cisalhamento do solo através de trincas que se formam a partir de seu bordo de ataque. As hastes dos subsoladores são

introduzidas (a profundidades quase sempre maiores que 0,4m) e em seguida tracionadas. A figura 6.4 mostra a forma de uma haste curva, com geometria parabólica e o que seria o padrão de rompimento do solo a partir de sua ponta.

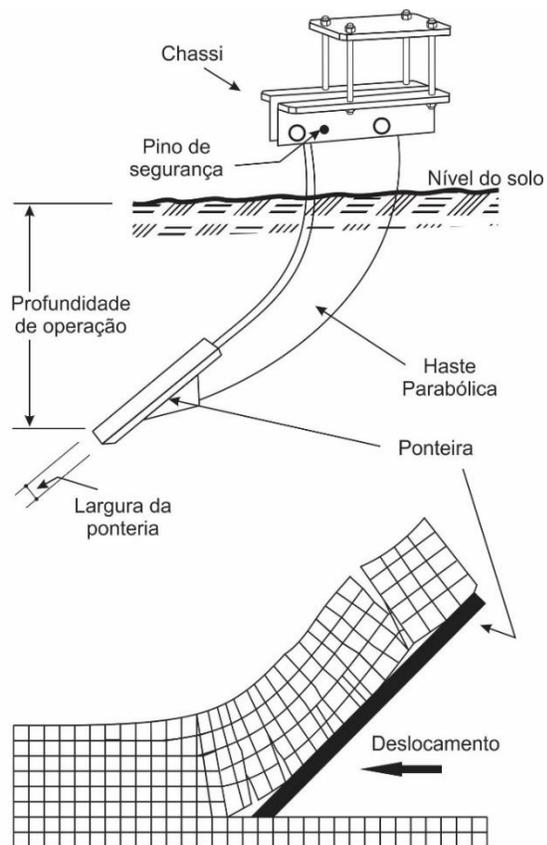


Figura 6.4. Uma haste de subsolador, com curvatura parabólica e o padrão de ruptura do solo sob ação da ponteira metálica. Adaptado de Lanças (2002).

A agricultura sustentável, no entanto, busca desenvolvimento de técnicas que melhorem a eficiência no uso de energia fóssil e de insumos (fitossanitários e fertilizantes), além de minimizar o uso de máquinas, tanto no revolvimento do solo por diminuição do número de operações necessárias, como pelo trânsito na superfície do terreno. Na busca de alternativas para as técnicas convencionais de preparo periódico do solo

foram desenvolvidos procedimentos de campo que possibilitaram modificações em tais métodos (cuja mobilização significa inversão de camadas), dando origem ao sistema de manejo denominado *preparo vertical do solo* que, apesar de causar mobilização em área total, não inverte suas camadas.

Os equipamentos utilizados no preparo vertical do solo também são constituídos de hastes metálicas rígidas e são denominados *escarificadores*, que estão esquematicamente representados na figura 6.5. Tais equipamentos realizam a operação de *escarificação*, que consiste, a exemplo da subsolagem, na introdução das hastes no solo e posterior tração, provocando, a exemplo dos subsoladores, seu rompimento. O preparo vertical do solo é realizado com objetivos semelhantes aos descritos para as operações do preparo periódico convencional, enquanto que a subsolagem é uma operação não periódica e corretiva.

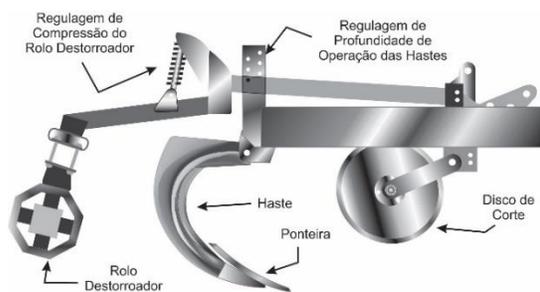


Figura 6.5. Escarificador utilizado no preparo vertical do solo. Adaptado de JAN (2012).

Os escarificadores são os equipamentos que possibilitam o emprego da técnica de manejo de solo denominada de *conservacionista*, cuja premissa básica é a manutenção de material de cobertura vegetal na superfície do terreno como forma de minimizar sua degradação, principalmente no que se refere ao controle da erosão.

6.3 Conclusão

As ações de mobilização dos solos agrícolas, cujos objetivos são os de melhorar as condições para a produtividade das plantas cultivadas poderão resultar, contrariamente, em danos que nem sempre se restringem à área agrícola, como a diminuição da fertilidade, por exemplo. Frequentemente podem atingir outros níveis na cadeia ambiental, causando problemas sérios para a sociedade como um todo.

Portanto, conhecer as interações do solo com as ferramentas que equipam máquinas e implementos agrícolas são tão importantes como realizar um bom trabalho de mobilização ou minimização do uso de energia nas operações. Estudar as relações físicas que ocorrem entre o solo e a ferramenta poderá contribuir na produção de resultados que ajudem a preservar o ambiente, orientando tanto projetistas quanto usuários de equipamentos agrícolas na manutenção das condições físicas do solo.

Nos próximos capítulos tais relações serão estudadas, assim como as consequências mecânicas do ato de tracionar um dispositivo dentro do solo, utilizando os conhecimentos das características físicas descritos na Parte I deste texto, combinados com princípios da geometria e das leis da mecânica clássica.

BIBLIOGRAFIA CONSULTADA

BALASTREIRE, L. A. **Máquinas agrícolas**. São Paulo: Manole, 1987. 307p.

BRASIL. **LEI nº 9.985, de 18 de julho de 2000. Institui o Sistema Nacional de Unidades de Conservação do Brasil (SNUC)**. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/L9985.htm. Acesso em: 21 jan. 2012.

CAÑAVATE, J.O., HERNANZ, J.L. **Técnica de la mecanización agraria**. Madrid: Mundi Prensa, 1989. 641p.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Censo Agro 2006: IBGE revela retrato do Brasil agrário**. 2010. Disponível em http://www.ibge.gov.br/home/presidencia/noticias/noticia_visualiza.php?id_noticia=1464&id_pagina=1&titulo=Censo-Agro-2006:-IBGE-revela-retrato-do-Brasil-agrario. Acesso em 13 jun. 2012.

JAN. Linha preparo do solo. Implementos Agrícolas Jan S.A. Disponível em: http://www.jan.com.br/sub_jmh_.html. Acesso em 26 jan. 2012.

LANÇAS, K.P. **Subsolagem ou escarificação**. Pelotas: Cultivar Máquinas, n. 14, p.34-37, 2002.

LULL, H.W. **Soil compaction on forest and range lands**. Washington DC: U.S. Government Printing Office, n.768, 1959. 33p.

MIALHE, L.G. **Máquinas agrícolas**. Piracicaba: USP/ESALQ, v.1, 1967. 262p.

MIALHE, L.G. **Máquinas agrícolas para plantio**. Campinas: Millenium, 2012, 623p.

PERDOK, U.D., KOUWENHOVEN, J.K **Soil tool interaction and field performance of implements**. Amsterdam: Soil Tillage Research, v.30, n.2-4, p.283-326, 1994.

PILLAR, V.D. **Dinâmica temporal da vegetação**. UFRGS: Departamento de Botânica. Disponível em: http://ecoqua.ecologia.ufrgs.br/arquivos/Reprints&Manuscripts/Manuscripts&Misc/8_Sucesso_94Nov21.pdf. Acesso em 21/01/2012.

RICHEY, C.B., JACOBSON, P., HALL, C.W. **Agricultural engineers' handbook**. New York: McGraw-Hill, 1961. 880p.

SRIVASTAVA, A.K., GOERING, C.E., ROHRBACH, R.P., BUCKMASTER, D.R. **Engineering principles of agricultural machines**. St. Joseph: ASABE, 2006. 2ed. 588p.

INTERAÇÃO SOLO-FERRAMENTA

Os solos, tal qual as paisagens, são muitas vezes produzidos pelo homem. Agricultores desenvolvem solos agrícolas que, se forem bem-sucedidos, são a base de sistemas agrícolas sustentáveis; por vezes a produção dos solos fracassa, mas todas as boas práticas de gestão dos solos têm como objetivo a implementação de uma agricultura sustentável.

Brilha & Sá

Estabelecer e explicar as interações físicas entre o solo e os equipamentos utilizadas pelos agricultores, nas chamadas operações agrícolas⁶⁴, é uma tarefa árdua pelos mesmos motivos já comentados nos capítulos anteriores, em função das condições de descontinuidade e variabilidade tanto física como química observada no meio.

Apesar disso, pesquisadores ao redor do mundo vêm obtendo progressos nas investigações sobre o assunto e o objetivo deste capítulo é

reunir o que há de mais importante nos conhecimentos desenvolvidos até o presente, de maneira a formar uma coleção de informações que permitam compreender e estudar o fenômeno. É certo que, na velocidade com que se produz conhecimento atualmente, no momento em que este texto estiver sendo publicado, um sem-número de novas pesquisas e investigações tenham chegado ao final e, possivelmente, muito do que se verá a seguir pode ter se tornado obsoleto.

⁶⁴ Operações agrícolas são etapas que ocorrem numa sequência ordenada desde a instalação das culturas até a obtenção dos produtos em condições de serem comercializados, as quais exigem o conhecimento de

métodos específicos de trabalho e o emprego de equipamentos especialmente projetados para esse fim. Mialhe (2012).

No entanto, pode-se afirmar que os princípios básicos que envolvem os fenômenos que regem a inter-relação existente entre o solo as ferramentas⁶⁵ empregadas na agricultura estão perfeitamente atuais e é por eles que se começará a discutir o assunto.

Quando se pretende estudar a dinâmica do solo como um corpo rígido é necessário que, além de todas as aproximações necessárias para assim defini-lo, também se registre que a tentativa de manipulá-lo como forma de obter material adequado ao uso humano não é prerrogativa única das atividades relacionadas com as ciências agrárias. Várias outras atividades humanas exigem que o solo seja cortado, esborado, transportado e compactado, dentre outras ações que requerem conhecimentos físicos correlatos. Embora as reações do meio produzam fenômenos regidos por leis universais da física, neste capítulo serão discutidos conhecimentos específicos e necessários para estudar e compreender o que ocorre durante as operações agrícolas realizadas com ferramentas cuja finalidade é mobilizar o solo, de alguma forma.

No capítulo 3 foram discutidas as características físicas do solo e seu comportamento enquanto material resultante do intemperismo e que compõe a camada superior da litosfera. No entanto, para entender o que acontece quando ele é o meio no qual atuam as ferramentas utilizadas para manipulá-lo de forma que sirva às necessidades humanas, faz-se necessário estudar seu comportamento dinâmico como um corpo rígido. Além disso, não se pode esquecer que o resultado desta manipulação deve servir como benefício ao desenvolvimento das plantas e provocar o mínimo de danos ambientais. Portanto, o estudo

do solo e sua interação com as ferramentas deve levar em consideração também os aspectos biológicos e químicos intrínsecos da atividade e do meio. A figura 7.1 procura resumir as etapas que devem ser observadas na realização deste estudo. Os princípios de cultivo (ou preparo de solo) são discutidos e estudados através do processo de inter-relação solo-máquina. A combinação de vários processos (por ação de diferentes ferramentas) resulta numa operação específica (como, por exemplo, a semeadura). Durante o processo de desenvolvimento da cultura podem ser necessárias várias operações singulares para tratos culturais diferenciados. No longo prazo, a adoção de novas técnicas introduziria inovações (tanto em máquinas como em processos) no sistema de produção, as quais implicariam em ganhos consideráveis para a produtividade assim como para a preservação ambiental.

7.1 O Solo como um Corpo Rígido

Assume-se, como já foi discutido, que um solo é um meio poroso, composto por mistura de materiais orgânicos e inorgânicos. A porção inorgânica é formada de partículas cujas dimensões variam desde as infinitamente pequenas como íons e radicais presentes na fase líquida (constituindo, juntamente com a água, aquilo que se convencionou chamar de *solução do solo*), até cascalho e rochas que ainda não sofreram completa ação do intemperismo. Além disso, como se sabe, a composição química deste mineral é extremamente variável e enormemente complexa. A fase orgânica é composta por entes vivos (que

⁶⁵ Termo utilizado em mecânica agrícola para designar utensílios manuais, bem como sinonímia de órgão ativo, que vem a ser, em implemento ou máquina o

componente que efetivamente realiza uma dada atividade agrícola durante a operação Ripoli (1995). Neste texto, algumas vezes ferramenta poderá ser chamada de *lâmina*.

promovem alterações físicas e químicas importantes e constantes no meio) e matéria morta, desde aquela que na prática integra o meio e recebe o nome de húmus, até partes relativamente

grandes de carcaças de plantas ou animais ainda em decomposição. Por fim, estão presentes os espaços livres (ditos vazios), em cujo interior ora se encontram gases, ora líquidos.

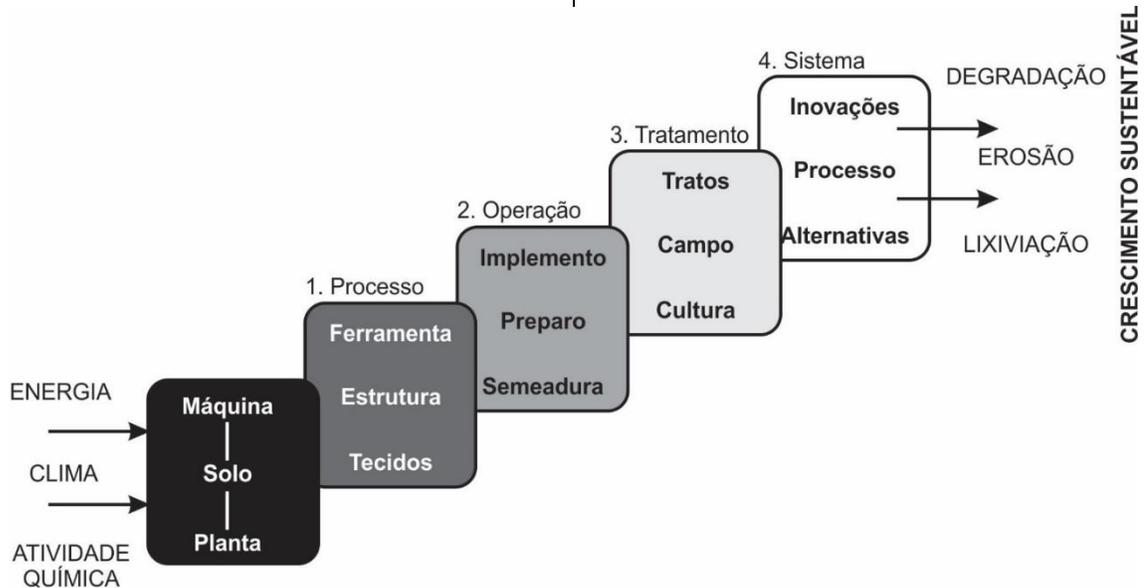


Figura 7.1 Aspectos espacial e temporal da inter-relação solo-máquina-planta, nos vários níveis de integração do processo de produção agrícola. Adaptado de Predok & Kouwenhoven (1994).

A descrição dada no parágrafo anterior para o meio “solo” permite infinitas associações entre suas características físicas e químicas. Além de todas as demais interferências que elas poderiam sofrer por parte das condições ambientais, principalmente as relacionadas à temperatura, conferem ao *material solo* uma variabilidade que o torna um meio difícil de ser modelado e estudado.

A características físicas do solo, discutidas no capítulo 3, consideram os fenômenos a que ele está sujeito como um material contínuo. Isto significa que foram consideradas forças e tensões atuando dentro da massa de solo e as modificações por elas causadas no arranjo (ou composição) de sua constituição, conferindo a ele novas características físicas.

Quando, no entanto, utiliza-se uma ferramenta para mobilizar o solo como nas operações agrícolas realizadas na implantação de culturas, porções finitas são mobilizadas e é possível entender que, estas, passam a agir como corpos rígidos, conforme está representado na figura 7.2.

Neste caso, o fenômeno físico deve ser estudado do ponto de vista da ação (ou interação) que ocorre quando há contato entre a ferramenta e o solo e o resultante deslocamento como um torrão e quando este eventualmente se choca com outros corpos ou torrões. Nesta situação a descrição (ou modelagem) do fenômeno é relativamente mais simples do que aquela necessária para descrever as alterações dentro da massa de solo, devido a forças e tensões atuantes. Deve-se considerar, no entanto, que as ferramentas produzem torrões que serão deslocados de seu local

original e para tanto, atuam na massa de solo que, por sua vez, reage segundo as relações estudadas no capítulo 3. Assim, pode-se dizer que ambas as condições devem ser consideradas o que, novamente, torna a modelagem uma situação muito mais complexa.

Em se tratando da inter-relação do bloco de solo com a ferramenta e com o próprio solo, os fenômenos que devem ser considerações são relativos a: adesão, atrito, *momentum* e abrasão.

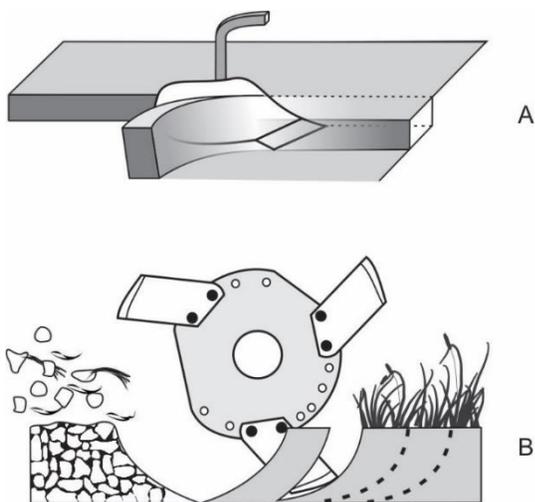


Figura 7.2. Representação esquemática da ação de (A) um arado de aiveca cortando uma leiva e (B) do rotor de uma enxada rotativa mobilizando fatias de solo que são quebradas em torrões e arremessadas.

7.1.1 Adesão

Adesão pode ser definida como a força de atração existente entre corpos de natureza diferente. É um fenômeno que acontece no nível molecular, sendo muito comum na interface entre líquidos e gases e as leis que o regem estão relacionadas com a tensão superficial, explicitada

pelo fenômeno da capilaridade, ambos descritos no Apêndice 2.

A ação da adesão nas superfícies dos dispositivos que trabalham ou mobilizam o solo (destinados a operações agrícolas ou outras atividades humanas) interfere na qualidade e na quantidade do trabalho realizado, ou seja, na eficiência operacional do conjunto do qual ela participa, seja tal trabalho efetuado por máquinas ou com ferramentas manuais. Sua ação incrementa a demanda por potência quando os solos possuem características que facilitam o fenômeno, principalmente quando a argila está presente em grandes proporções. Em casos extremos ocorre impedimento de colheita de produtos agrícolas cuja produção se dá por raízes e tubérculos, assim como do tráfego de máquinas na superfície do terreno. Inúmeros autores comentam que em situações extremas a adesão pode reduzir de 30 a 50% a eficiência do trabalho de equipamentos de movimentação de terra nas operações necessárias a obras de construção civil.

A teoria que explica o fenômeno apregoa que a água permanecerá dentro dos poros até que uma força externa (por exemplo, uma mesa de tensão) ou a gravidade sejam suficientes para vencer a tensão dentro deles e fazer com que se quebre a coluna capilar. Isto faria com que a solução escoasse ou ocorresse drenagem. Quando se observa a equação A19⁶⁶, pode-se entender que quanto menor o raio de curvatura do menisco existente na ascensão capilar, maior será a tensão necessária para drenar o líquido existente no tubo. Uma vez que este parâmetro é relativo ao diâmetro do tubo, analogicamente poros de pequeno calibre proporcionam pequenos raios de curvatura do menisco. Como já discutido, solos com elevada proporção de argila possuem maior concentração de poros de pequenas

⁶⁶
$$\Delta P = \frac{2T_{SG}}{R} \quad (A19)$$

dimensões (microporos) e assim, apresentariam maior índice de adesão.

Em relação à quantidade de água existente no solo, as forças adesivas e suas interferências nas inter-relações com as superfícies dos equipamentos podem ser descritas, de acordo com vários autores pela sumarização mostrada na tabela 7.1. Estas considerações procuram explicar os esquemas da figura 7.3 que representam o mesmo fenômeno, mostrado macroscopicamente na figura 3.13 (Capítulo 3).

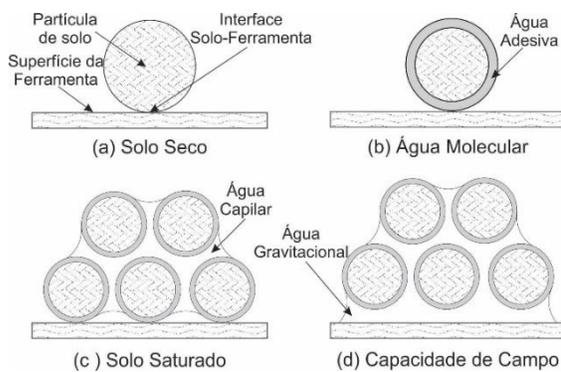


Figura 7.3. Representação microscópica dos diferentes estágios de umidade do solo e possíveis condições de contato com a superfície da ferramenta. Desenhos sem observação de escala. Adaptado de Soni & Salokhe (2006).

Como é possível verificar pela representação da figura 7.3, a adesão tem sua influência maximizada com o incremento do teor de água, sendo que a partir de um determinado ponto começam a aparecer forças viscosas e lubrificação na interface solo-ferramenta.

Enquanto a umidade é praticamente nula ou somente existe água adsorvida, formando uma fina película em torno das partículas de solo, as forças presentes são dominadas pelo atrito. Nestas condições ocorrem as máximas tendências de adsorção de água e as forças de adesão podem ser negligenciadas. Tal situação pode ser

entendida como similar àquela descrita no capítulo 3 (figura 3.12) para o contato solo-solo. No caso presente, trata-se do contato sólido-sólido envolvendo partículas de solo e a superfície da ferramenta agrícola. Se não há presença de líquido na região de contato as forças presentes se limitam a interações químicas relacionadas com as ligações atômico-moleculares (covalências, iônicas ou metálicas) e as forças de *van der Waals*, também discutidas naquele capítulo.

A figura 7.4 representa genericamente a relação entre presença de água no solo e a força adesiva em superfícies metálicas. Verifica-se que a partir de um determinado teor de água no solo a adesão diminui, devido à formação da película líquida (ou filme) entre as partículas e a superfície da ferramenta e a consequente minimização do efeito da adesão capilar. À medida que a quantidade de água presente cresce sua ação passa a ser de lubrificação e o efeito da força adesiva decresce.

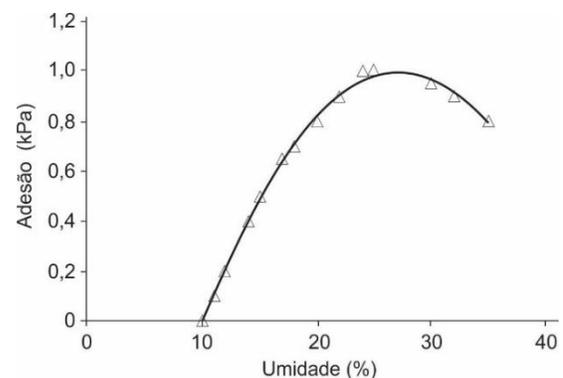


Figura 7.4. Relação entre umidade e adesão observada na interação solo-superfície metálica. Adaptado de Khan et al. (2010).

Este comportamento é influenciado, em grande parte, pelo tipo de solo e dos minerais que estão presentes, inclusive o tipo de argila que compõe sua estrutura. Também tem grande influência a presença de matéria orgânica, sendo que solos ácidos são menos adesivos que solos

com elevada porcentagem de material orgânico em decomposição.

Num sentido mais amplo, no entanto, adesão deve ser entendida como um fenômeno que envolve além das forças interatômicas e moleculares, também questões físicas macroscópicas.

Quando dois corpos sólidos estabelecem contato entre si, a área de contato aparente (A_a) difere da área de contato real (A_r), como mostrado na figura 7.5. Esta condição é semelhante àquela descrita para as situações mostradas nos índices a e b da figura 7.3 descritas nos mesmos índices da tabela 7.1.

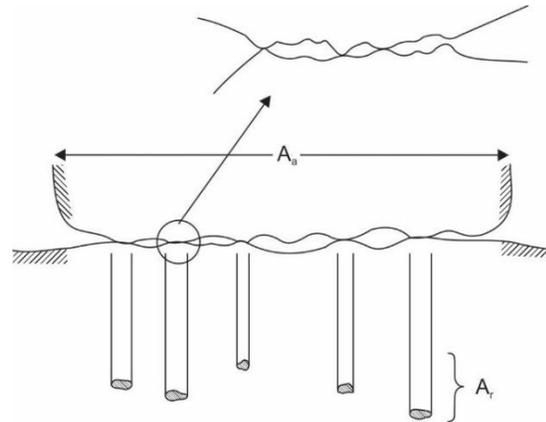


Figura 7.5. Esquema de duas superfícies rugosas em contato e suas respectivas áreas de contato - aparente (A_a) e real (A_r). Adaptado de Bhushan (2003).

Tabela 7.1. Condições das partículas de solo e da interação solo-ferramenta devido à variação do teor de água. Adaptado de Soni & Salokhe (2006).

Intervalo de Água Contida no Solo	Estado da Partícula de Solo	Interface Solo-Ferramenta	Estado da Água na Interface Solo-Ferramenta	Contribuição das Forças na Interface SF
a) Zero até Máxima tensão de adsorção de água	Solo seco em estufa: partícula isenta de umidade	Contato direto partícula-ferramenta	Sem água	<ul style="list-style-type: none"> • Atrito puro; • Adesão mínima
b) Máxima tensão de adsorção de água até máximo conteúdo de água molecular	Envolvida por fina película (filme) de água	Contato entre ferramenta e água envolvente da partícula	Água molecular adsorvida	<ul style="list-style-type: none"> • Propriedades físico-químicas de adsorção
c) Máximo conteúdo de água molecular até Capacidade de campo	Envolvida por camada de água	Camada de água envolvendo partículas na região de contato	Camada de água resultante de água molecular adsorvida	<ul style="list-style-type: none"> • Propriedades físico-químicas de adsorção; • Pressão capilar negativa; • Adesão
d) Capacidade de campo até Saturação	Envolvimento por água gravitacional	Água gravitacional envolvendo partículas na região de contato		<ul style="list-style-type: none"> • Tensão capilar; • Viscosidade; • Atrito úmido;

No caso de haver um filme líquido entre as superfícies em contato (correspondendo às condições *c* e *d* da figura 7.3 e tabela 7.1), podem ocorrer várias manifestações do fenômeno da *molhabilidade* (ver Apêndice 2). As superfícies em questão, quanto à molhabilidade, classificam-

se em hidrofílicas ou hidrofóbicas, o que é determinado de acordo com os ângulos de contato entre elas e o menisco formado pelo líquido presente. Tais condições são representadas na figura 7.6

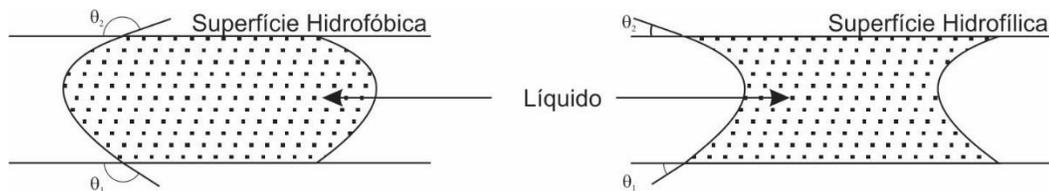


Figura 7.6. Formação de meniscos devido à tensão superficial e classificação das superfícies em hidrofílicas ou hidrofóbicas de acordo com seu comportamento em relação ao contato com um filme líquido e respectivos ângulos de contato (θ).

Para a condição hidrofílica a curvatura do menisco provoca o aparecimento de tensão negativa na superfície molhada, resultando em força de adesão. Neste caso, para promover a separação das suas superfícies será necessária uma força superior ao peso dos corpos que estão em contato, como representado na figura 7.7. Em muitos casos esta condição representa uma interferência importante no comportamento dos corpos em contato, quando se pretende promover o movimento relativo entre eles. Este fenômeno é correspondente ao que se observa no emprego de equipamentos de mobilização do solo e sua ação é intensificada pela presença de substâncias e partículas que favorecem o acúmulo de água em pequenos espaços entre as superfícies.

Observa-se que a força de adesão (N – não confundir como peso do bloco) é diretamente proporcional à força de compressão (T) e o coeficiente de adesão (μ') diretamente proporcional ao tempo de aplicação da compressão. O comportamento genérico dos materiais que estão sujeitos às forças adesivas está representado na figura 7.8.

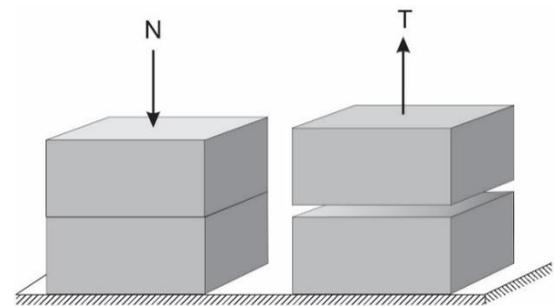


Figura 7.7. Duas superfícies sólidas em contato, inicialmente sob uma tensão compressiva (N) e a devida força normal (T) necessária à sua separação.

A força normal líquida (T) necessária para atingir o estado iminente de separação das estruturas representadas na figura 7.7 é normalmente aceita como a força adesiva. Sua relação com a tensão de compressão (N) pode ser entendida como sendo o coeficiente de adesão (μ'):

Nas operações agrícolas de mobilização de solo as forças que agem na superfície das ferramentas (comprimindo-o contra o órgão ativo

$$\mu' = \frac{N}{T} \quad (7.1)$$

do equipamento agrícola) podem ser consideradas de grandes proporções, o que contribuiria positivamente para adesão entre ambos, embora o tempo de atuação desta força seja relativamente pequeno. Com o incremento da adesão pode

ocorrer aumento do desgaste da superfície da ferramenta. Deve-se considerar ainda que a recuperação elástica⁶⁷ influencia diretamente a adesão, de forma inversa: quanto menor for a recuperação maior será o efeito adesivo.

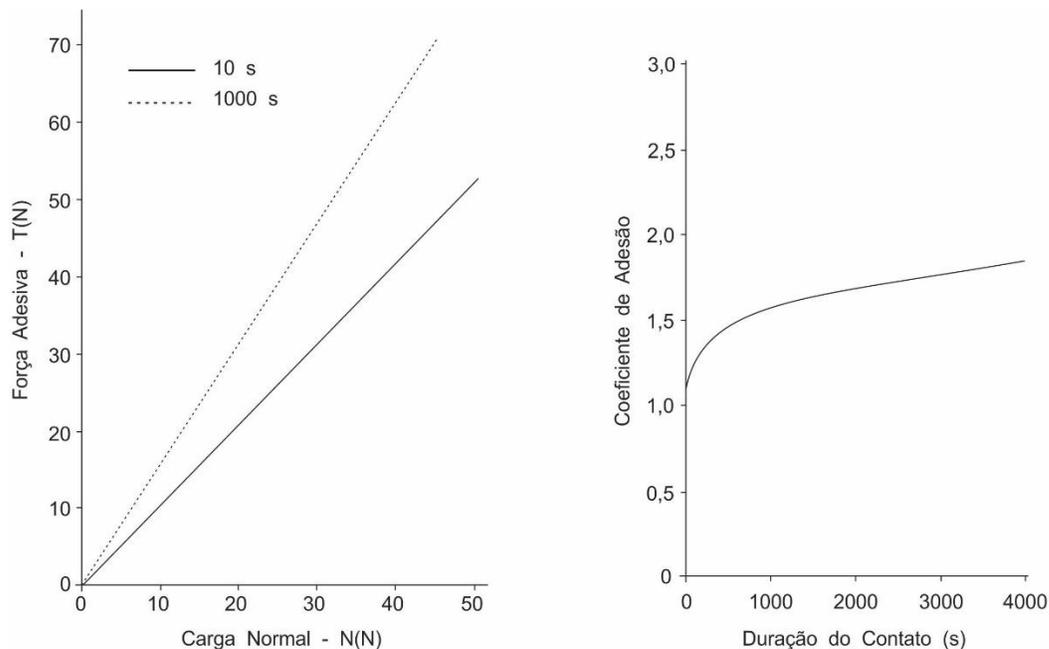


Figura 7.8. Efeito da carga normal sobre a força adesiva e do tempo de sua aplicação no contato entre as superfícies no coeficiente de adesão. Adaptado de Bhushan (2003).

A figura 7.9 mostra o esquema de uma esfera submetida à carga de deformação e sua real área de contato. A presença de água na interface de contato entre as superfícies sólidas, no caso da interação solo-ferramenta parece, no entanto, ser a principal causa da adesão, o que provoca significativo aumento de energia necessária à realização dos trabalhos de mobilização.

tipos: a força resultante da tensão superficial através dos meniscos e a força viscosa.

Caso as superfícies estejam molhadas (e no caso dos equipamentos agrícolas a umidade do solo concorre para tal) ou haja tendência de condensação nos poros formados pelos contatos, o fenômeno de adesão estará presente. Neste caso as forças originadas podem ser divididas em dois

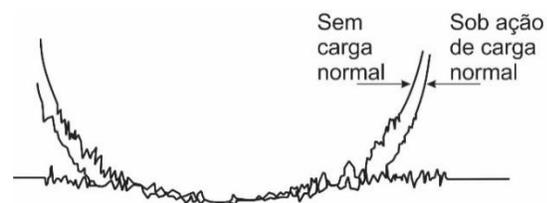


Figura 7.9. Representação esquemática do perfil microscópico da área de contato entre uma esfera e uma superfície plana, sob a ação de carga normal e após sua retirada. Adaptado de Bhushan (2003).

Assumindo que as partículas de solo estejam recobertas por um fino filme de água

⁶⁷ Também conhecida como *efeito mola*, é a propriedade dos materiais que provoca a tendência de retornar à sua

forma original após ser submetido a uma tensão ou deformação.

(figura 7.3c e d), podem ser estabelecidas três situações, mostradas na figura 7.10. A figura 7.10(a) retrata uma partícula real em contato com uma superfície plana e lisa. Os pequenos espaços presentes nas irregularidades microscópicas proporcionam a formação de meniscos pela presença (ou condensação) de líquidos, conforme

comentado anteriormente. As demais partes da figura 7.10(b, c e d) representam partículas ideais e suas características geométricas quando consideradas as condições em que o filme líquido se estabelece entre as duas superfícies.

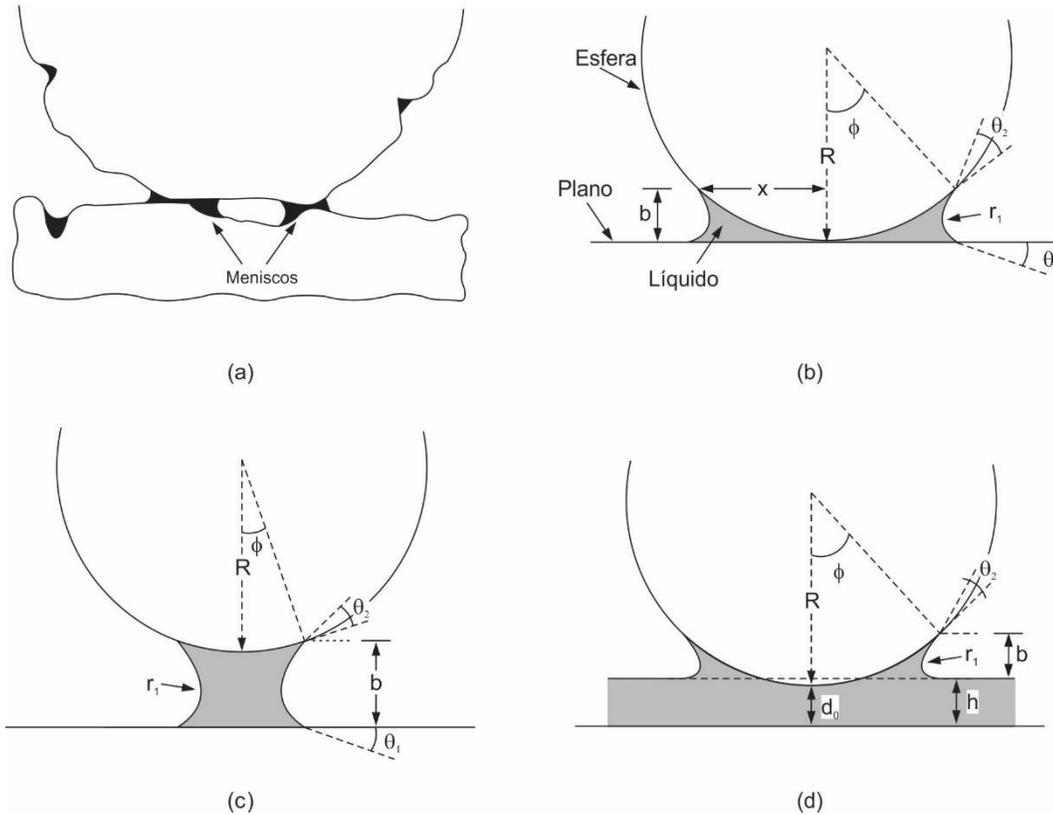


Figura 7.10. Formação de meniscos por presença de líquidos na região de contato entre uma partícula e uma superfície plana (a) e condições geométricas ideais do fenômeno quando a partícula encontra-se em contato com o plano (b), quando a partícula está separada do plano, mas persiste o menisco (c) e quando existe um filme contínuo de líquidos entre as duas superfícies (d). Adaptado de Bhushan (2003).

De acordo com a equação de Laplace⁶⁸, que trata da força de atração (F_L) entre uma esfera e uma superfície plana, pode-se escrever⁶⁹:

$$F_L \sim 2\pi r T_s (\cos\theta_1 + \cos\theta_2) \quad (7.2)$$

No caso em que θ_1 e θ_2 possuem dimensões muito próximas ou são iguais, a equação 7.2 será:

$$F_L \sim 4\pi r T_s \cos\theta \quad (7.3)$$

⁶⁸ **Pierre Simon – Marquês de Lapalce** (1749-1827): Estudioso francês que se destacou na astronomia, física e matemática.

⁶⁹ A sequência de equações de 7.2 a 7.9 foi proposta por Bhushan (2003).

Tal expressão é válida para condições em que a espessura do menisco é maior do que as imperfeições das superfícies e independe da quantidade de líquido existente.

Ocorre ainda, neste sistema, uma componente normal (vertical) de aderência que resulta da tensão superficial em torno da circunferência formada pelo filme de água que envolve a partícula (esfera), como representado na figura 7.11.

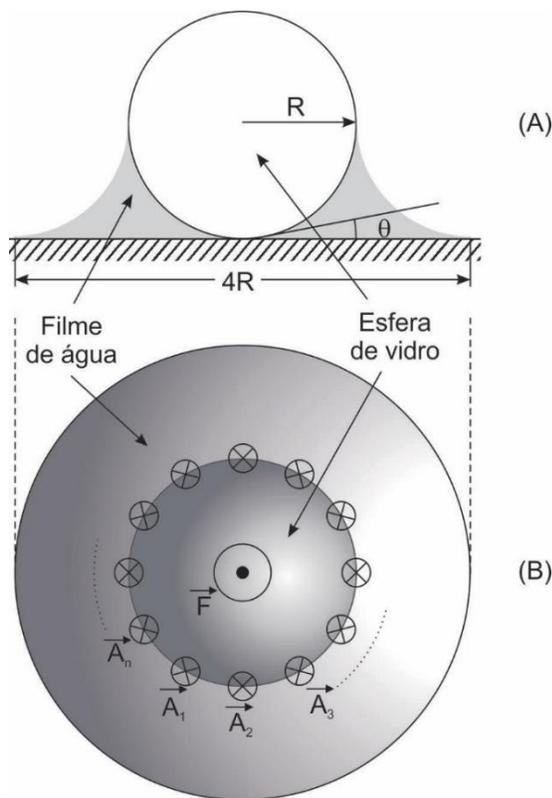


Figura 7.11. Representação de uma esfera apoiada sobre uma placa plana, ambas de vidro, envoltas por um filme de água. F - força normal atuando na esfera; A_n – força adesiva. Adaptado de Gill & Vanden Berg (1968)

Considerando as dimensões da figura 7.10, a componente de aderência normal (A) será dada por:

$$A \sim 2\pi r T_s \sin\phi (\sin\phi + \theta) \quad (7.4)$$

Desta forma, a força de atração total a que ficam submetidos os corpos em questão devido à formação do menisco por tensão superficial é:

$$F_{am} \sim F_L + A \quad (7.5)$$

Analisando a equação 7.4, pode-se concluir que quando o ângulo ϕ é de pequenas dimensões, a equação 7.5 se reduz a:

$$F_{am} \sim F_L \sim 4\pi r T_s \cos\theta \quad (7.6)$$

Quando a partícula está na iminência de separação (figura 7.10c), a equação que permite calcular a força que atua no sistema é:

$$F_L \sim \frac{2\pi r T_s (\cos\theta_1 + \cos\theta_2)}{1 + \frac{d_0}{b}} \quad (7.7)$$

Conclui-se, pela equação 7.7 que a maior atração será obtida quando a distância entre a partícula e a superfície plana for nula, retornando à equação 7.2.

Quando o material em questão é o solo⁷⁰, pode-se considerar que existe um filme de água contínuo entre as partículas e a superfície das ferramentas de mobilização, o que aproximaria o sistema daquele representado na figura 7.10(d). Considerando que o ângulo de contato entre o solo e a água seja θ ($\theta = \theta_2$) e entre esta e a ferramenta seja nulo ($\theta_1 = 0$), tem-se que a magnitude da força em questão será:

$$F_{am} = \frac{2\pi R T_s}{1 + \frac{d_0}{b}} (1 + \cos\theta) \quad (7.8)$$

A força adesiva calculada pela equação 7.8 é tangente ao contato existente entre a partícula

⁷⁰ De acordo com Jia (2004).

e a ferramenta. A sua correspondente componente normal (N_{am}) pode ser calculada por:

$$N_{am} = F_{am} \sin \theta = \frac{2\pi RT_s}{1 + \frac{d_0}{b}} (1 + \cos \theta) \sin \theta \quad (7.9)$$

Métodos para minimizar ou controlar a adesão

Considerando a adesão como um fenômeno extremamente negativo para as operações no meio rural (e demais atividades humanas que necessitam mobilizar o solo), muitos estudos tem sido desenvolvidos no sentido de minimizar seu efeito.

Com tal objetivo, busca-se por substâncias⁷¹ que possam ser associadas às superfícies das ferramentas de modo a minimizar o efeito da adesão. Exemplo típico deste fato pode ser observado na figura 7.12, onde se apresentam os resultados referentes à comparação da resistência específica oferecida pelo solo à tração de arados, quando suas partes metálicas são revestidas por esmalte, em comparação à condição convencional. Apesar dos resultados positivos o uso de tais substâncias apresenta inconvenientes quanto aos custos elevados e à baixa resistência ao desgaste.

Por outro lado, pesquisas mais recentes têm procurado entender como ocorre a interação entre os animais que vivem no solo e a adesão deste aos seus corpos. O sucesso da movimentação dos animais no interior do solo é creditado a diversos fatores sendo os mais importantes a morfologia do exoesqueleto e a geometria da

sua superfície, além da secreção de substâncias lubrificantes ou antiadesivas. A tabela 7.2 mostra os resultados comparativos obtidos em laboratório referentes à exigência trativa oferecida por placas metálicas convencionais e revestidas com estruturas providas de inúmeras protuberâncias convexas e circulares (ver esquema na figura 7.13) que simulam a superfície externa da carapaça de um coleóptero conhecido como *dung beetle*.

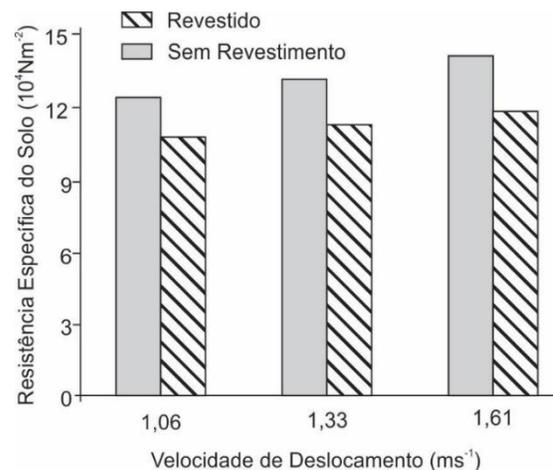


Figura 7.12. Comparação da resistência específica do solo à tração de arados de aivecas com partes metálicas em contato direto com o solo e quando revestidas com ENAMEL⁷²: profundidade de 0,25m e 24,1% de umidade. Adaptado de Saloke et al (1990).

O resultado mostra que a superfície “rugosa” imitando a carapaça do animal proporcionou menor resistência à tração, provavelmente dificultando a aderência do solo à ferramenta.

⁷¹ Óleo lubrificante à base de silicone, tinta à base de óxido de chumbo e de cromo, vernizes, revestimentos com Teflon[®], cerâmicas e alguns esmaltes.

⁷² Nenhuma referência, citação, comentário explícito ou não, contido nesta obra, como marcas e modelos de fabricantes de equipamentos, métodos e técnicas, instituições de caráter

público ou privado indicam preferência, endosso ou recomendação do autor.

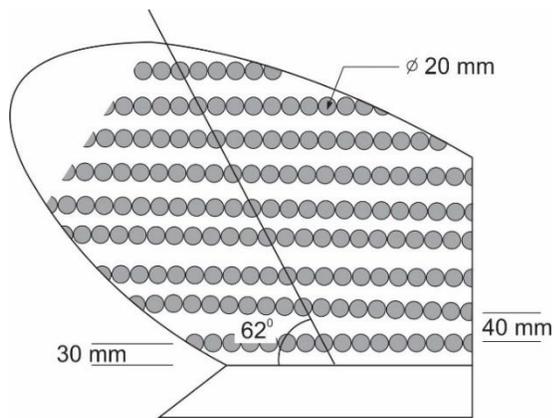


Figura 7.13. Distribuição de estruturas côncavas na superfície de uma aiveca, simulando a estrutura do exoesqueleto de um coleóptero. Adaptado de Qaisrani et al (2010).

Ao associar propriedades de materiais diversos ao fenômeno da adesão capilar resultante da presença de água no solo é possível estabelecer outras condições que beneficiem o trabalho de equipamentos na sua mobilização. O desenvolvimento de materiais de alta resistência à abrasão, e baixos coeficientes de adesão e atrito tem proporcionado resultados promissores. Resultados de investigação neste sentido são mostrados na figura 7.14, onde se compara a ação de dois materiais diferentes.

A temperatura e outro fator importante, relativo ao fenômeno da adesão, muito embora no caso das operações agrícolas este seja um parâmetro incontornável. A figura 7.15 apresenta resultados de variações na força adesiva observada para o contato solo-metal, provocados por alteração na temperatura. Verifica-se que a mudança de 5°C para 30°C significou uma redução de 80% na força necessária para separar as duas superfícies.

⁷³ Sigla em inglês para Polietileno de Ultra Alto Peso Molecular: material de alta resistência ao desgaste por abrasão e baixo coeficiente de atrito.

Tabela 7.2. Comparação da exigência trativa verificada para ferramentas convencionais (contato metal-solo) e outras de mesmo formato revestidas com material plástico imitando o exoesqueleto de um coleóptero (*Phanaeus vindex*, MacLachlan), quando tracionadas dentro do solo. Adaptado de Qaisrani et al (2010).

Ferramenta	Velocidade de deslocamento (ms ⁻¹)	Força de tração (kN)	%
Chapa Plana			
Metal Convencional	0,01	0,80	100
	0,02	0,85	100
	0,06	0,97	100
Revestida com UHMW-PE ⁷³	0,01	0,58	73
	0,02	0,62	73
	0,06	0,69	71
Aiveca			
Metal Convencional	1,00	1,27	100
	1,39	1,46	100
Revestida com UHMW-PE	1,00	0,95	74
	1,39	1,02	70

Pode-se concluir⁷⁴ que as forças adesivas que ocorrem entre o solo e as ferramentas, são influenciadas principalmente pela tensão do menisco (conhecida como pressão de Laplace) e pela resistência viscosa. De acordo com a teoria atualmente aceita, quanto mais delgada for a película de água que recobre o espaço entre as

⁷⁴ Fountaine (1954) & Tong et al (1994).

superfícies dos sólidos em questão (solo-ferramenta) maiores serão estas duas forças. A natureza do material com o qual a ferramenta é construída é irrelevante, uma vez que as forças de atração entre ele e o solo são insignificantes. A utilização de alguns materiais como resinas e tintas pode ser eficiente na redução da ação adesiva e do atrito, por estabelecer uma condição de pequena molhabilidade.

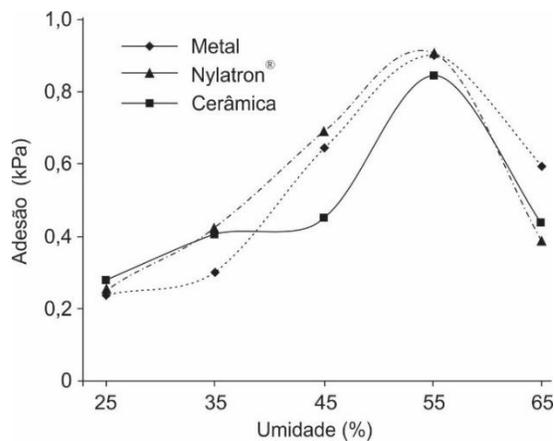


Figura 7.14. Influência de vários materiais e da umidade do solo no índice de adesão do solo a uma superfície plana. Adaptado de Harsono (2011).

7.1.2 Atrito

O fenômeno físico do atrito, conforme descrito por Coulomb, foi examinado no subcapítulo 3.4, onde se concluiu que o coeficiente de atrito solo/solo é uma propriedade dinâmica do solo. Experimentalmente pode-se comprovar que o coeficiente de atrito é independente da área de contato, da carga normal atuante, assim como da velocidade de deslocamento relativo entre duas superfícies. No entanto⁷⁵, estas condições não são verdade absoluta quando se considera o contato solo/solo, mas podem servir como boas aproximações enquanto se observarem pequenas

cargas normais e velocidades de deslocamento relativamente baixas.

Em se tratando da interação do solo com as ferramentas utilizadas para sua mobilização, a afirmação anterior também é verdadeira, isto é, o fenômeno *atrito* solo/metal não acontece de maneira a respeitar fielmente o que se verifica nos casos de contatos entre superfícies sólidas contínuas.

Tomando-se como referência a figura 3.10, define-se coeficiente de atrito (μ) como:

$$\mu = \frac{T}{N} = \frac{F_a}{N} = \tan\phi \quad (7.10)$$

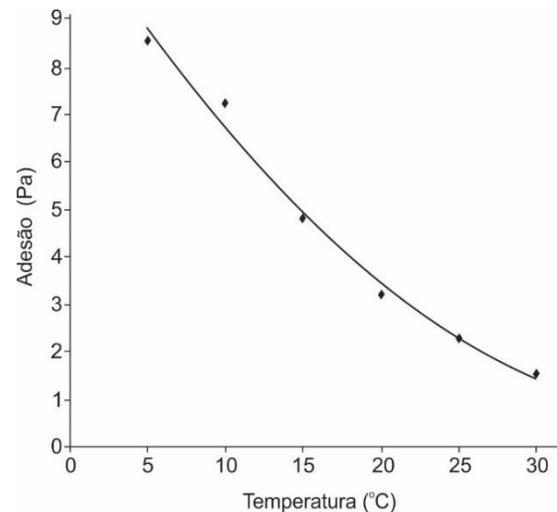


Figura 7.15. Influência da variação da temperatura na força adesiva de um solo argiloso em uma placa metálica. Adaptado de Azadegan & Massah (2012).

As respostas das pesquisas com relação ao comportamento dos parâmetros comumente utilizados para mensurar o atrito entre dois materiais, quando um deles é o solo, são controversas. Isto pode ser creditado às dificuldades de se obter homogeneidade no material em função das enormes variações nele encontradas (conforme discutido noutras ocasiões, neste texto) e até às condições exigidas para sua manipulação durante

⁷⁵ Segundo Gill & Vanden Berg (1968).

os ensaios. Um exemplo dessa afirmação está representado na figura 7.16, que mostra a influência da velocidade no ângulo de atrito entre dois tipos diferentes de solo e uma placa metálica de aço carbono. Fica evidente a correlação positiva entre velocidade de deslocamento e ângulo de atrito, o que parece contraditório com os resultados que afirmam independência entre tais parâmetros⁷⁶.

Infelizmente, para as pesquisas envolvendo atrito entre o solo e a ferramenta, vários outros fenômenos físicos estão presentes no meio em questão e na grande maioria das vezes são indissociáveis, como é o caso já discutido da adesão. Sua ação sobre o atrito entre o solo e a ferramenta apresenta um componente que pode ser comparado com uma força de compressão similar ao que acontece quando se insere uma carga sobre a superfície de contato (equivalente à ação da força N representada na figura 3.10).

A adesão induziria o sistema a uma tensão normal, o que influenciaria no valor do coeficiente de atrito, sendo que, neste caso é denominado por alguns autores⁷⁷ como *coeficiente de atrito aparente* (μ'). Considerando tais fatos, muitos deles têm utilizado como modelo matemático para representar o que denominam de *resistência ao deslizamento* (S) ou seja, a componente tangencial de deslizamento entre uma superfície metálica e o solo, a seguinte equação⁷⁸:

$$S = C_{\alpha} + \sigma \tan \phi \quad (7.11)$$

em que:

S – tensão tangencial de deslizamento na interface de contato;

C_{α} - tensão tangencial de adesão na interface de contato;

⁷⁶ Payne (1956).

⁷⁷ Nichols (1937); Gill e Vanden Berg (1968); Hendrick & Bailey (1982).

σ - tensão normal na interface de contato;

ϕ – ângulo de atrito solo/metal.

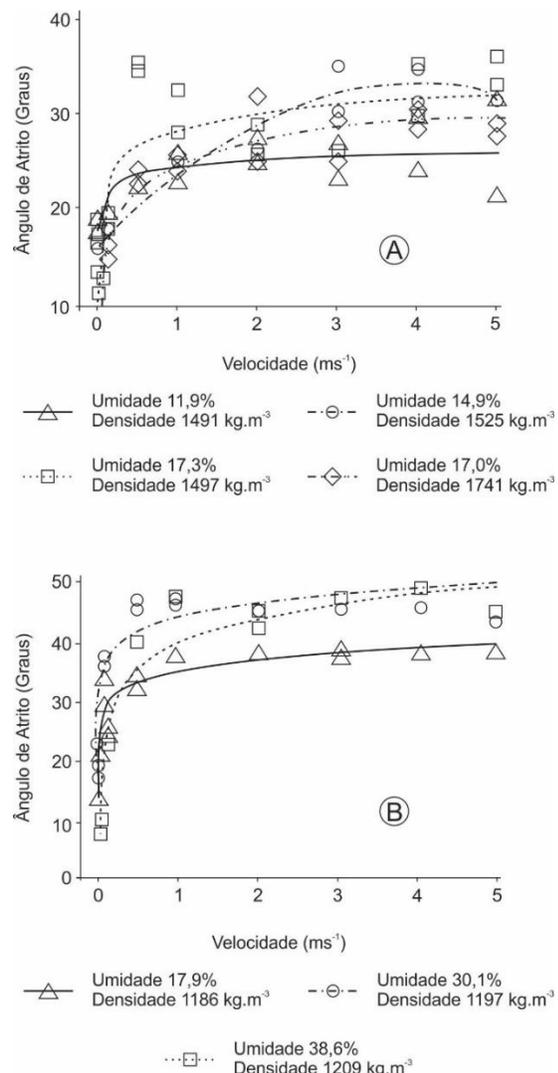


Figura 7.16. Influência da velocidade no ângulo de atrito verificado para dois tipos de solo: A – franco argilo arenoso e B – argila (ambos segundo triângulo textural da figura 3.1), em diversas condições de umidade. Adaptado de Stafford & Tanner (1983a).

Como a adesão está intimamente relacionada com o teor de água no solo, o valor de C_{α} é diretamente proporcional à umidade do solo. Nos

⁷⁸ Payne (1956)

casos em que sua participação no fenômeno de resistência ao deslizamento entre as duas superfícies é desprezível, a equação 7.11 será novamente equivalente à equação 7.10. Um resultado clássico sobre o efeito da adesão sobre o atrito entre solo e superfícies metálicas está representado na figura 7.17. Nota-se que o coeficiente de atrito, aparente, está diretamente relacionado com a umidade do solo, sendo que o fenômeno é mais pronunciado à medida que se incrementa a quantidade de argila. Até determinado teor de água, o

comportamento é similar àquele observado para contato entre corpos rígidos. Com o incremento da umidade para valores intermediários a ação da adesão começa a se manifestar, mediante o fenômeno do atrito aparente, até atingir um máximo. Nesta condição, a partir da qual a quantidade de água é tal que o líquido passa a exercer efeito lubrificante entre o metal e as partículas do solo, nota-se que o atrito tende a diminuir sensivelmente.

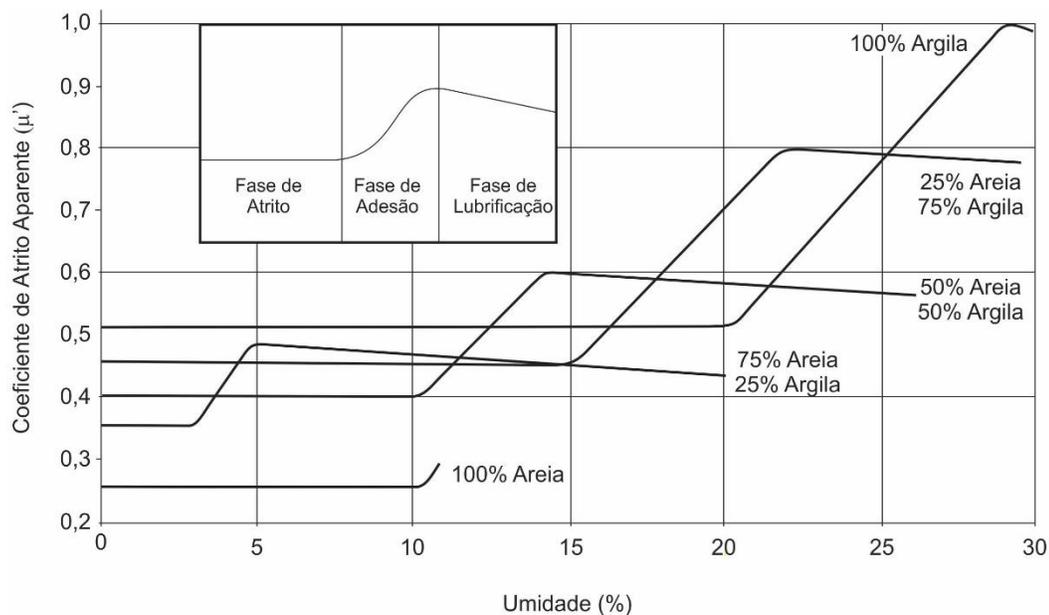


Figura 7.16. Comportamento do solo em variadas condições de umidade e composição granulométrica em relação ao coeficiente de atrito aparente. No detalhe pode-se observar o comportamento genérico de um solo em função da ação da umidade e respectiva ação da adesão. Adaptado de Nichols (1937).

7.1.3 Abrasão

Abrasão é o nome dado ao desgaste de uma superfície qualquer, cuja causa é a ação do atrito. Quando ocorre movimento relativo entre um corpo rígido de solo e a superfície metálica de uma ferramenta de mobilização ambos estão sujeitos ao fenômeno de abrasão. Seu efeito tem diferentes intensidades, dependendo tanto da composição física do metal em questão como das

condições físico-mecânicas do solo, sua composição mineralógica e do teor de água presente no meio. Ao provocar desgaste em ambas as superfícies (solo e ferramenta), a abrasão produz efeitos diferentes em cada uma delas. Nas partículas do solo a abrasão pode ser negligenciada, pois as consequências serão inexpressivas. No entanto, a ação do solo sobre a ferramenta de mobilização poderá ter consequências importantes para diversos aspectos do trabalho.

As formas projetadas para as ferramentas tem o objetivo de facilitar o rompimento do solo e sua movimentação durante a mobilização. No entanto, com o decorrer do tempo de uso, estas formas serão alteradas pelo desgaste, o que influenciará nas relações de forças e consequentemente, na energia necessária à execução dos trabalhos, assim como na sua qualidade. Além disso a substituição das partes desgastadas será inevitável, incorrendo em dispêndio de dinheiro na aquisição de novas peças, tempo e mão de obra nas ações mecânicas de reposição. As interrupções do trabalho da maquinaria para tais reparos influenciarão na eficiência do operacional do sistema, contribuindo para o aumento dos custos de produção.

Em função de tais fatos, conhecer as condições que promovem e processo de abrasão e tratar de evita-los ou minimizar seus efeitos como forma de proteger os equipamentos durante o uso podem ser importantes como objetivo de redução do custo operacional da maquinaria agrícola.

O processo de desgaste pode ser entendido como sendo o ataque das partículas do solo à superfície metálica das ferramentas, o que inicialmente provocaria pequenas ranhuras, deslocando o metal lateralmente em relação ao sentido do deslocamento relativo entre elas⁷⁹. Nos metais mais duros a ranhura é mais superficial, mas a evolução do processo é semelhante em todos os materiais. Após o aparecimento das ranhuras inicia-se uma sequência de rachaduras e posterior produção de fragmentos (lascas) microscópicos, os quais se desprendem da peça original, dando início à perda de material.

Os ensaios de desgaste, de maneira geral, têm como objetivo determinar a perda de massa das peças em estudo, como forma de caracterizar o efeito da abrasão. A figura 7.17 mostra um exemplo

de perda de massa observada numa ferramenta estreita (tipo ponteira utilizada em escarificadores) em função da distância percorrida. Como se nota, a posição da estrutura de mobilização de solo na barra de tração também pode influenciar seu desgaste, devido às possíveis flexões e consequentes mudanças de direção durante o trabalho.

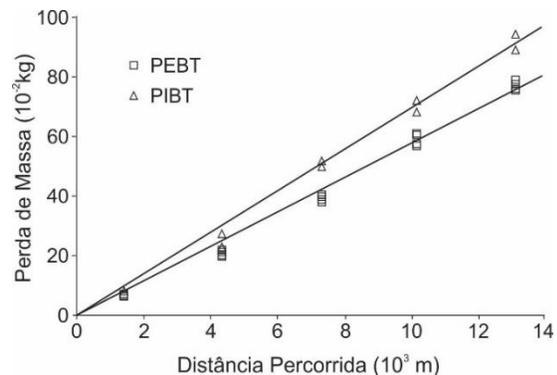


Figura 7.17. Desgaste verificado em ponteiras de um escarificador, posicionadas em locais diferentes na barra de tração. PEBT – posição externa da barra de tração; PIBT – posição interna da barra de tração. Adaptado de Quirke et al (1988).

Outro exemplo de desgaste em equipamentos agrícolas está representado na figura 7.18, onde se vê a representação da variação da forma da ferramenta em função da distância percorrida. O ensaio se deu num solo franco-arenoso, com teor de água da ordem de 0,13kg kg⁻¹, à velocidade de 1,4 m s⁻¹.

Diversos modelos predição do desgaste por abrasão foram propostos e a maioria deles pode ser descrita pela equação⁸⁰:

$$V = \frac{kNS}{3H} \quad (7.12)$$

em que:

V – volume de desgaste (mm³);

N – Carga (N);

⁷⁹ Quirke et al (1988).

⁸⁰ Kushwaha (1991)

S – desgaste no sentido do deslocamento (mm);
 H – Dureza (Nmm⁻²);
 k – coeficiente de desgaste (adimensional).

O coeficiente de desgaste e a dureza de alguns metais são mostrados na tabela 7.3.

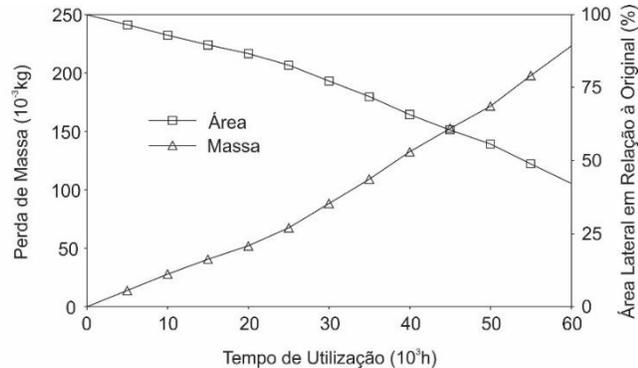
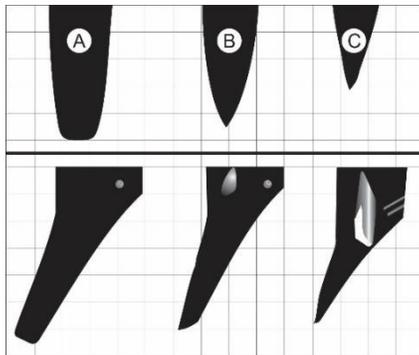


Figura 7.18. À esquerda: representação artística da variação da área frontal (acima) e lateral (abaixo) de ponteiros de hastes sulcadoras para deposição de fertilizantes utilizadas em semeadoras, com relação à peça original (A), depois de 30.000 (B) e 60.000 (C) metros lineares de deslocamento em operação de campo. À direita: comportamento do desgaste durante o uso, relativo à perda de massa e área lateral das mesmas peças. Adaptado de Machado et al (2009).

Tabela 7.3. Coeficiente de desgaste e dureza de alguns metais utilizados na manufatura de ferramentas agrícolas. Adaptado de Kushwaha (1991).

Material	Dureza Vickers (DPH)	Coeficiente de Desgaste	
		Solo (10 ⁻⁷)	Areia (10 ⁻⁶)
SAE1018	102	4,68	1,96
T-303	142	4,77	2,31
RPT	192	3,90	2,27
C12-L14	205	3,98	1,94
SAE4140	277	4,85	1,67
SAE5160	430	3,09	1,36
BHN512	534	0,44	0,47

DPH – Dureza medida por pirâmide de diamante.

A figura 7.19 apresenta resultado obtidos num ensaio de desgaste acelerado para os diversos metais citados na tabela 7.3, utilizando areia e solo. Como se pode notar, o desgaste verificado quando se utiliza areia como meio abrasivo é mais intenso do que no solo, numa magnitude entre 3,4 e 5,8 vezes. Também foi observado que, à medida que o metal se torna mais duro, o desgaste é menor.

7.1.4 Momento Linear ou Quantidade de Movimento

A quantidade de movimento (Q) de um corpo rígido, como um fenômeno físico, foi discutida no capítulo 5 e está definida na equação 5.5.

Quando um bloco de solo é destacado de sua posição natural, onde está em repouso, por um equipamento de mobilização e adquire movi-

mento, ele está sujeito às leis newtonianas que regem seu deslocamento ao longo da trajetória e, portanto, se comporta como um corpo rígido.

Embora a quantidade de movimento do bloco de solo não possa ser assumida como uma propriedade dinâmica, o fato de haver uma quantidade de energia acumulada no processo pode conferir a ele a possibilidade de se transformar ao atingir um obstáculo. O fato de um dado bloco de solo ser arremessado pela ação de um equipamento agrícola, fará com que ele se desfaça ao atingir outro bloco de solo que repousa sobre a superfície ou, por exemplo, pelo impacto na chapa que regula a abertura traseira de uma enxada rotativa. Desta forma, a quantidade de movimento de uma fração finita (um bloco) de solo pode influenciar na sua desagregação.

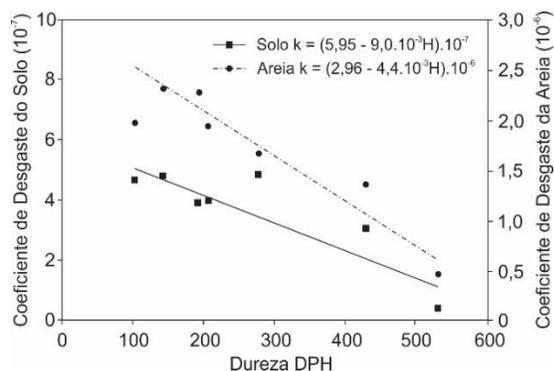


Figura 7.19. Relação entre os coeficientes de desgaste e a dureza DPH para alguns metais utilizados na manufatura de ferramentas agrícolas. Adaptado de Kushwaha (1991).

7.2 Mecânica das ferramentas agrícolas utilizadas na mobilização de solo

Ferramentas agrícolas de mobilização (ou de cultivo) são dispositivos destinados a aplicar forças (ou tensões) no solo cujo objetivo seria transformá-lo num meio adequado à propagação e desenvolvimento das plantas cultivadas e a elas

proporcionar condições otimizadas de produtividade.

No cultivo tradicional, onde se mobiliza o solo em área total, o emprego das ferramentas tem enorme importância, pois é esta fase do trabalho que demanda maior quantidade de energia. Nos cultivos alternativos, como é o caso da semeadura direta, elas tem importância fundamental uma vez que são responsáveis por adequar o meio à deposição das sementes. Portanto, entender a mecânica da interação solo-ferramenta terá relação direta com o sucesso do empreendimento agropecuário, uma vez que tem relação íntima com os custos e a qualidade do processo de produção.

No entanto, o que acontece sob a superfície do solo quando uma ferramenta de cultivo é tracionada ainda é um grande enigma, apesar de inúmeras pesquisas realizadas sobre o fenômeno. Infelizmente as conclusões de tais estudos não são claras. As variáveis envolvidas no processo são inúmeras e seu controle torna-se quase impossível, de modo que o trabalho nesta área é pouco produtivo, embora e por isso mesmo, fortemente atrativo.

A grande maioria dos estudos realizados sobre a interação solo-ferramenta tem seu foco no equipamento e em seu projeto. As reações do solo às tensões a ele aplicadas pelas ferramentas são menos estudadas, talvez pelas dificuldades de modelagem em função da variabilidade encontrada no meio. No entanto, o estudo do fenômeno de cultivo deve descrever ambos os meios – os esforços provocados na ferramenta pela reação do solo e a propagação das tensões provocadas pelo deslocamento da ferramenta no meio granular que é o solo.

Infelizmente, a possibilidade de modelagem dos efeitos e reações resultantes da mobilização do solo na agricultura ainda está longe de ser obtida, tornando o trabalho prático de campo

executado pelo agricultor em algo mais próximo de *arte* que de ciência⁸¹.

As reações do solo à ação das ferramentas de cultivo acontecem em escala tridimensional e, por isso, sua análise torna-se ainda mais complexa. A figura 7.20 mostra o esquema de um equipamento de aiveca em ação e a consequente

reação do solo ao deslocamento da ferramenta. Nota-se que há deslocamento vertical da leiva cortada, dando origem a fissuras transversais ao sentido de deslocamento (representadas pelos planos de fratura primários) e, simultaneamente, deslocamento lateral em função da forma da ferramenta o que provoca fissuras longitudinais no solo (planos de fratura secundários).

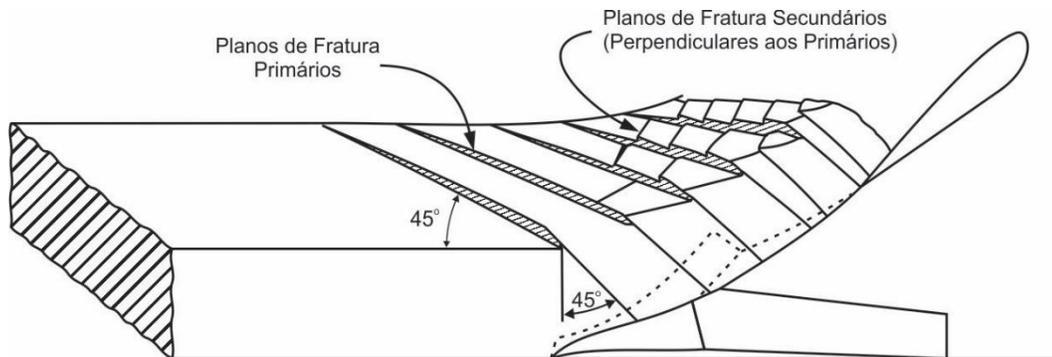


Figura 7.20. Representação artística de um arado monocorpo de aiveca atuando dentro do sulco de aração e a reação do solo ao ser formada a leiva. Adaptado de Richey et al (1961).

O estudo do comportamento do solo assim como das ferramentas é feito através da mecânica clássica e como forma de simplificar este estudo, observa-se a ação de cada um destes movimentos de forma isolada, com o emprego de dispositivos que agem numa única direção, como mostrado na figura 7.21.

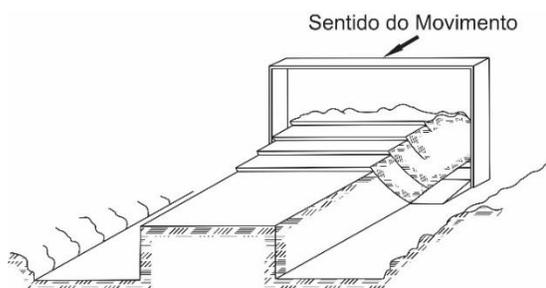


Figura 7.21. Reação do solo à ação de uma ferramenta composta por uma chapa plana inclinada transversalmente em relação ao sentido de seu deslocamento. Adaptado de Gill e Vanden Berg (1968).

Ao se deslocar dentro do solo a ferramenta fica sujeita às forças de resistência ao cisalhamento, inércia de cada bloco formado, resistência ao corte que ele oferece à ação da ferramenta e ao atrito solo-metal. Quando a relação entre a profundidade (h) de trabalho e a largura da ferramenta (b) é muito grande (figura 7.22), o efeito do cisalhamento do solo à frente do movimento, no sentido da superfície, ocorre a partir da ponta da lâmina, emitindo uma onda que propaga o choque em todas as direções e forma uma estrutura semelhante a uma taça partida.

Considerando a relação entre os parâmetros h e b , alguns autores classificam em *estreitas* e *largas*. As ferramentas que atuam em condições nas quais a relação entre a profundidade e a largura (h/b) é maior ou igual à unidade seriam estreitas e quando tal relação é menor que isso, são consideradas largas e neste caso, modelos físicos dos fenômenos devem considerar o esforço

⁸¹ Tal afirmação foi feita por Gill e Vanden Berg (1968) e, infelizmente, ainda pode ser tomada como atual, apesar

dos progressos obtidos nas investigações das relações solo-ferramenta.

desenvolvido lateralmente em relação ao movimento, em função da resistência que o solo oferece a ser desestruturado nesta região. Além destas duas denominações, as ferramentas podem ainda ser classificadas como *inclinadas* e *verticais*. Aquelas que apresentam características semelhantes às da figura 7.21 seriam as *inclinadas* e as *verticais* seriam aquelas cujas características físicas tem maior semelhança com a forma apresentada na figura 7.22.

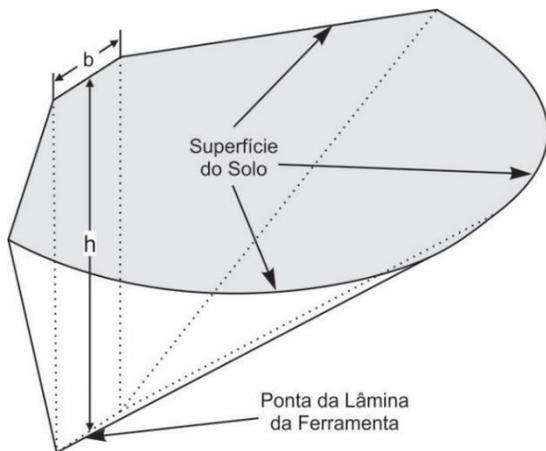


Figura 7.22. Representação esquemática da região onde ocorre o cisalhamento de um solo quando submetido à ação de uma ferramenta estreita de largura b , atuando na profundidade h e cujo deslocamento se dá para o lado direito.

7.2.1 Ferramentas Largas

A reação do solo representada na figura 7.21, quando a ferramenta se move no sentido indicado, é semelhante ao observado quando submetido a um ensaio de compressão. À medida que o movimento progride (a pequenas velocidades) nota-se que ocorrem falhas por cisalhamento devido ao aumento da tensão e, em intervalos relativamente regulares, formam-se blocos de solo.

Quando se utiliza uma ferramenta larga ($h/b < 1$) no trabalho de mobilização de solo, o esforço lateral pode ser negligenciado e o modelo utilizado é o apresentado na figura 7.23. Ela representa um corte longitudinal da região de atuação de uma ferramenta com as mesmas características e atuando em condições similares ao mostrado na figura 7.21, no trabalho de mobilização do solo. As forças cA_1 e $\mu_s N_1$ são relativas à resistência do solo ao cisalhamento e ocorrem no plano de fratura, no momento da falha de cada bloco. A força $\mu_F N_0$ corresponde ao atrito solo metal e B é devida à aceleração imposta a cada bloco (inércia). O produto do índice de resistência ao corte (k) do solo pela largura da ponta da ferramenta (b) resulta na força de resistência ao corte. De acordo com o diagrama, as forças que agem⁸² verticalmente no bloco de solo, quando em equilíbrio dinâmico são:

$$\begin{aligned} \Sigma F_y = & P - N_0(\cos\delta - \mu_F \text{sen}\delta) \\ & - N_1(\cos\beta - \mu_s \text{sen}\beta) \\ & + (cA_1 + B)\text{sen}\beta = 0 \end{aligned} \quad (7.13)$$

onde:

F_y – forças que atuam verticalmente no bloco de solo;

P – peso do bloco de solo;

N_0 – força normal que atua na superfície da ferramenta;

μ_F – coeficiente de atrito solo-metal;

N_1 – força normal à superfície de cisalhamento;

μ_s – coeficiente de atrito solo-solo (correspondente a $tg\phi$, sendo ϕ o ângulo de atrito interno do solo);

c – coesão do solo;

⁸² Modelo desenvolvido por Söhne (1956)

- A_1 – área da superfície de cisalhamento;
- β – ângulo de cisalhamento do solo;
- δ – ângulo de inclinação da ponteira da ferramenta em relação à direção do deslocamento.

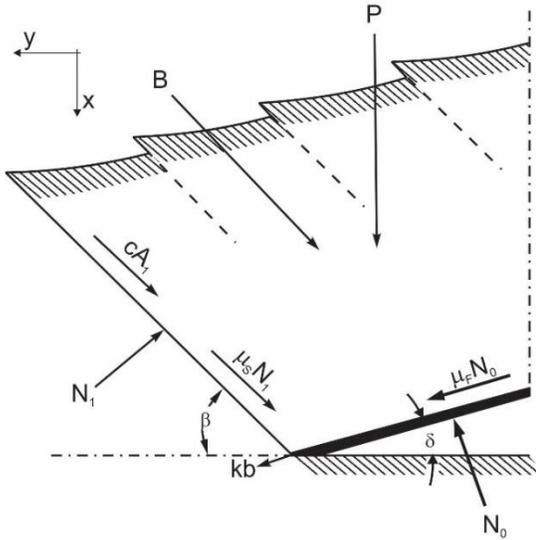


Figura 7.23. Representação de um corte longitudinal no momento em que a ferramenta da figura 7.21 mobiliza o solo e das forças que atuam num bloco resultante de tal ação. Adaptado de Söhne (1956).

De maneira análoga ao plano vertical, é possível equacionar as forças (F_x) que atuam no bloco de solo no plano horizontal, em equilíbrio dinâmico:

$$\begin{aligned} \Sigma F_x = & N_0(\text{sen}\delta + \mu_F \text{cos}\delta) \\ & - N_1(\text{cos}\beta - \mu_S \text{sen}\beta) \\ & - (cA_1 + B)\text{cos}\beta = 0 \end{aligned} \quad (7.14)$$

A figura 7.24 mostra detalhe da ferramenta que atua no sistema da figura 7.23, de maneira isolada.

Nas condições de equilíbrio, a força de tração exercida sobre a ferramenta no sentido do deslocamento é:

$$T = N_0(\text{sen}\delta + \mu_F \text{cos}\delta) \quad (7.15)$$

Como se pode notar, as equações 7.13 a 7.15 negligenciam as componentes da resistência ao corte do solo kb . Tal fato é explicado, pois tal resistência somente tem importância quando no solo são encontradas rochas e raízes⁸³, o que é incomum nos terrenos cultivados.

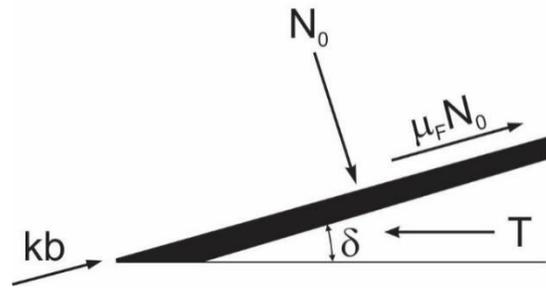


Figura 7.24. Forças que atuam na interface solo-ferramenta.

De maneira similar com o que ocorre na interface solo-ferramenta, estudam-se as forças atuantes no bloco de solo, na interface de falha, ao longo do plano de cisalhamento (figura 7.23). Neste caso o equilíbrio horizontal será:

$$T - N_1(\text{sen}\beta + \mu_S \text{cos}\beta) - (cA_1 + B)\text{cos}\beta = 0 \quad (7.16)$$

Isolando-se o valor de N_0 e N_1 nas equações 7.15 e 7.16, respectivamente e substituindo em 7.13, têm-se:

$$\begin{aligned} N_0 &= \frac{T}{\text{sen}\delta + \mu_F \text{cos}\delta} \\ N_1 &= \frac{T - (cA_1 + B)\text{cos}\beta}{\text{sen}\beta + \mu_S \text{cos}\beta} \end{aligned}$$

⁸³ De acordo com Söhne (1956).

$$P - T \left(\frac{\cos\delta - \mu_F \text{sen}\delta}{\text{sen}\delta + \mu_F \cos\delta} \right) - \left\{ [T - (cA_1 + B)\cos\beta] \frac{\cos\beta - \mu_S \text{sen}\beta}{\text{sen}\beta + \mu_S \cos\beta} \right\} + (cA_1 + B)\text{sen}\beta = 0$$

Fatorando e simplificando os termos da equação resultante obtêm-se:

$$P - T \left[\frac{\cos\delta - \mu_F \text{sen}\delta}{\text{sen}\delta + \mu_F \cos\delta} + \frac{\cos\beta - \mu_S \text{sen}\beta}{\text{sen}\beta + \mu_S \cos\beta} \right] + \frac{cA_1 + B}{\text{sen}\beta + \mu_S \cos\beta} = 0$$

Fazendo

$$\left[\frac{\cos\delta - \mu_F \text{sen}\delta}{\text{sen}\delta + \mu_F \cos\delta} + \frac{\cos\beta - \mu_S \text{sen}\beta}{\text{sen}\beta + \mu_S \cos\beta} \right] = z,$$

resulta:

$$T = \frac{P}{z} + \frac{cA_1 + B}{z(\text{sen}\beta + \mu_S \cos\beta)} \quad (7.17)$$

A importância da equação 7.17 é a eliminação das incógnitas relativas às tensões normais (N_0 e N_1) exercidas pelo solo na superfície da ferramenta e no plano de cisalhamento na interface de falha que ocorre à frente do movimento. Resta ainda determinar as componentes relativas ao peso e à aceleração do solo, devido ao movimento da ferramenta.

A figura 7.25 apresenta o mesmo esquema do corte longitudinal mostrado na figura 7.23, com parâmetros de ordem geométrica que permitem determinar a área da secção do bloco de solo, com o objetivo de determinação do seu peso.

Modificando a equação 3.11 pode-se obter⁸⁴:

$$M = D_u V$$

O volume em questão refere-se ao bloco de solo suportado pela ponteira da ferramenta ao longo de sua estrutura, cuja largura é b , e será obtido da relação entre esta dimensão e a área trapezoidal que representa a secção transversal mostrada na figura 7.25. Desta forma pode-se obter:

$$h^* = h \frac{\text{sen}(\delta + \beta)}{\text{sen}\beta} \quad \text{e} \quad l_1 = h \frac{\cos(\delta + \beta)}{\text{sen}\beta}$$

$$l_2 = h^* \text{tg}\delta = h \frac{\text{sen}(\delta + \beta) \text{tg}\delta}{\text{sen}\beta}$$

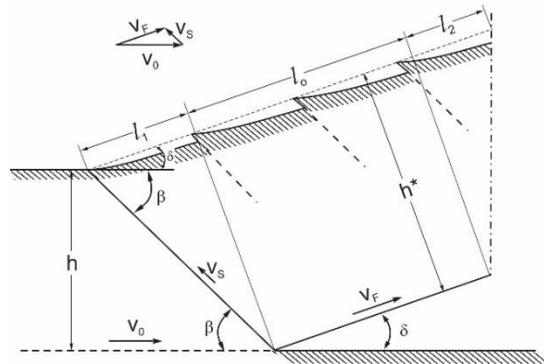


Figura 7.25. Parâmetros geométricos de um bloco de solo mobilizado por uma ferramenta larga, num plano inclinado.

A área A do trapézio representado na figura 7.25 será:

$$A = h^* \left(l_0 + \frac{l_1 + l_2}{2} \right)$$

O peso da massa de solo suportada pela superfície da ferramenta de acordo com o diagrama representado na figura 7.25 será:

$$P = D_u b A \quad (7.18)$$

⁸⁴ Neste caso, D_u seria o peso específico do solo, assumindo as dimensões $ML^{-2}T^{-2}$.

Substituindo os valores de l_1 e l_2 na equação 7.18, o peso da massa de solo em questão seria:

$$P = \frac{D_u b h \text{sen}(\delta + \beta)}{\text{sen}\beta} \left\{ l_0 + \dots + h \frac{\text{cos}(\delta + \beta) + \text{sen}(\delta + \beta) t g \delta}{2 \text{sen}\beta} \right\} \quad (7.19)$$

A área do plano de cisalhamento do solo (A_1) que aparece na sequência de equações de 7.13 a 7.17 também será calculada em função dos parâmetros geométricos da figura 7.25 e será:

$$A_1 = \frac{bh}{\text{sen}\beta} \quad (7.20)$$

A força B que rege a movimentação do bloco de solo no sentido vertical, quando este é submetido aos esforços da lâmina da ferramenta pode ser obtida de acordo com a segunda lei de Newton e assim, determinada:

$$B = M \frac{\partial v}{\partial t} \quad (7.21)$$

A massa M de solo mobilizado e, portanto, elevado pela força B será relativa à distância percorrida pela ferramenta na unidade de tempo e poderá ser determinada pela relação:

$$M = \frac{D_u}{g} b h v_0 t \quad (7.22)$$

A aceleração que o movimento vertical impõe ao solo mobilizado assumindo que a velocidade é nula no início do movimento, pode ser descrita da seguinte forma:

$$\frac{\partial v}{\partial t} \cong \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{v_S - 0}{t - 0} = \frac{v_S}{t} \quad (7.23)$$

Utilizando a figura 7.25 como referência, e assumindo que o solo está em movimento, pode-se deduzir que:

$$v_0 = v_F \text{cos}\delta + v_S \text{cos}\beta \quad \text{e} \quad v_S \text{sen}\beta = v_F \text{sen}\delta$$

Rearranjando as expressões de velocidade:

$$v_S = \frac{v_0 - v_F \text{cos}\delta}{\text{cos}\beta} \quad (7.24)$$

$$v_F = \frac{v_S \text{sen}\beta}{\text{sen}\delta} \quad (7.25)$$

Substituindo 7.25 em 7.24, obtém-se;

$$v_S = v_0 \frac{\text{sen}\delta}{\text{sen}(\delta + \beta)} \quad (7.26)$$

Substituindo 7.22, 7.23 e 7.26 em 7.21, pode-se determinar a força que acelera a massa de solo:

$$B = \frac{D_u}{g} b h v_0^2 \frac{\text{sen}\delta}{\text{sen}(\delta + \beta)} \quad (7.27)$$

A determinação do ângulo de cisalhamento β , assim como da coesão c , serão feitas mediante ensaios de tensão e cisalhamento, como descrito no capítulo 3. De acordo com as figuras 3.26, 3.30 e 3.31, pode-se chegar à descrição do estado de tensões representado pelo círculo de Mohr-Coulomb mostrado na figura 7.26.

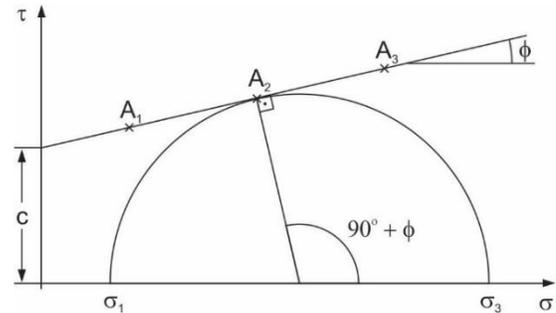


Figura 7.26. Círculo de Mohr-Coulomb, representando um ponto de ruptura do solo, determinando o ângulo de atrito interno (ϕ) e respectivo valor de coesão (c).

Como se observa pela figura 3.26, o ângulo obtido na representação de Mohr-Coulomb é o dobro daquele em que realmente acontece a fratura. Desta forma, o valor a se utilizar para o ângulo de cisalhamento será:

$$\beta = \frac{1}{2}(90 - \phi) \quad (7.28)$$

A figura 7.27 mostra o resultado de ensaios obtidos com dois tipos de ferramentas e os limites calculados, segundo o modelo descrito.

A figura 7.28 mostra o comportamento esperado para a resistência do solo à tração de uma ferramenta quando ocorre variação do ângulo de ataque da lâmina.

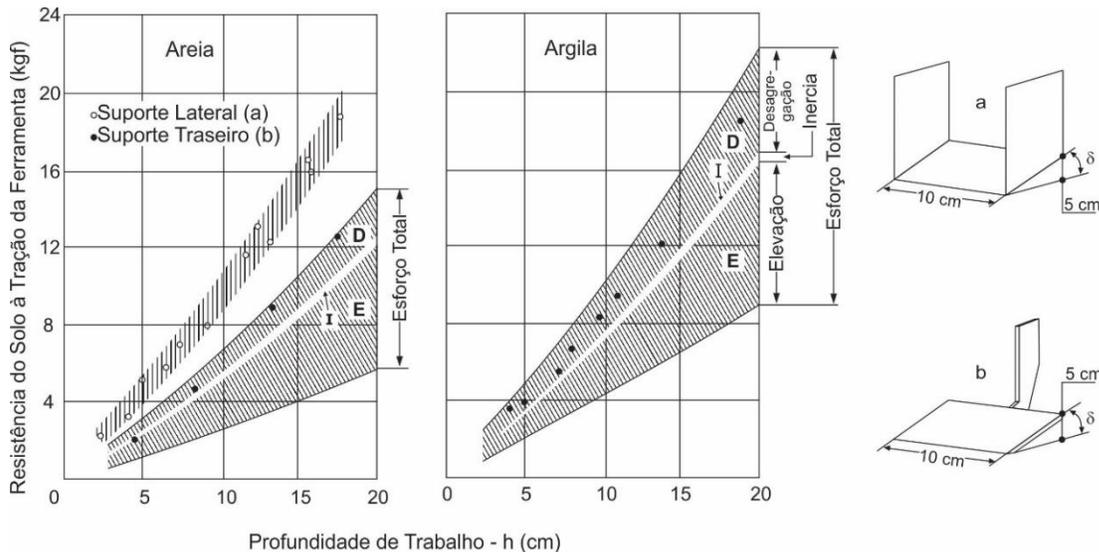


Figura 7.27. Resistência do solo à tração das ferramentas com as configurações de suporte da lâmina lateral (a) e traseiro (b) em solo arenoso e argiloso, de acordo com a profundidade de trabalho, mostrando a participação dos três parâmetros previstos no modelo, à velocidade de deslocamento de 1 ms^{-1} . Adaptado de Söhne (1956).

O modelo apresentado até aqui, no entanto, não leva em consideração a influência da adesão solo-metal, que atua na ponteira da ferramenta e está representada na figura 7.29 pela componente $a_d A_0$. Quando este efeito é considerado a equação que definirá⁸⁵ a força de tração imposta à ferramenta será:

$$T = \frac{P}{z} + \frac{cA_1 + B}{z(\text{sen}\beta + \mu_s \text{cos}\beta)} + \frac{a_d A_0}{z(\text{sen}\delta + \mu_F \text{cos}\delta)} \quad (7.29)$$

7.2.2 Ferramentas estreitas

A reação do solo à ação de ferramentas cuja profundidade de trabalho é proporcionalmente muito maior de que sua largura, ao contrário do que acontece com as ferramentas largas, não apresenta consenso tão claro entre os especialistas. Uma descrição clássica das fraturas que ocorrem está mostrada na figura 7.30.

No emprego desse tipo de equipamento, percebe-se que ocorre a formação de um corpo de solo (uma “cunha”) à frente da estrutura metálica da haste da ferramenta. Tal estrutura (representada na figura 7.30 pelo sólido formado pelas

⁸⁵ Rowe & Barnes (1959) citados por Gill & Vanden Berg (1968)

letras *abcdef*), adere ao metal e se comporta como se fizesse parte integrante da ferramenta. Estabelecido esta condição, cada uma das faces da cunha (formadas pelos planos *abed* e *bcfe*) passa a comprimir o solo produzindo zonas de mobilização, representadas pelas regiões demarcadas como “asa” na figura 7.30(C). Também ocorrem outras duas zonas de fratura, com formato triangular, cujos vértices mais agudos têm origem no vértice da cunha.

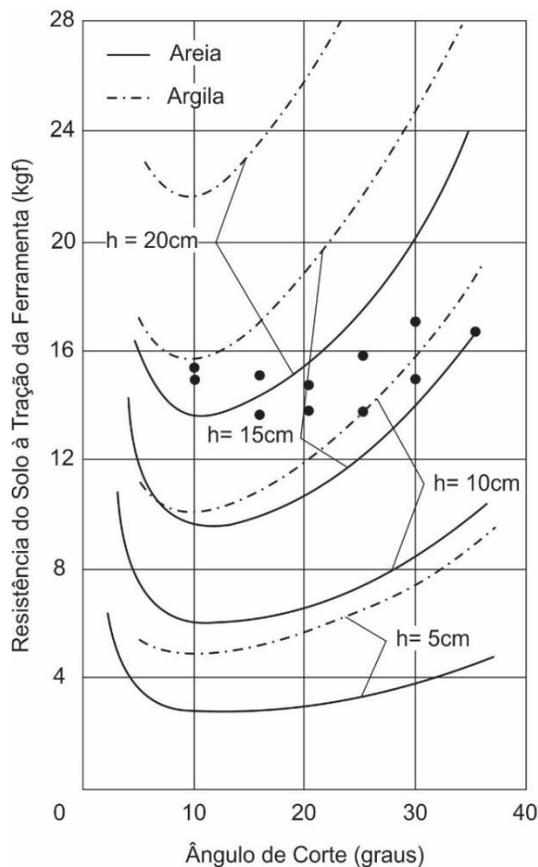


Figura 7.28. Comportamento previsto, de acordo com o modelo descrito, em solos arenoso e argiloso, em função da variação do ângulo de ataque (de corte) da lâmina da ferramenta e da profundidade de trabalho. Os pontos indicam valores medidos à profundidade de 15,7cm para uma velocidade de deslocamento de 1ms^{-1} . Adaptado de Söhne (1956).

Nas condições de trabalho em campo torna-se extremamente difícil observar as estruturas descritas e representadas na figura 7.30, uma vez que após a ruptura do solo, a ferramenta continua seu movimento à frente e perturba o meio, provocando o rearranjo dos torrões e desfazendo a estrutura anteriormente mobilizada pela fratura, misturando-os.

A movimentação do solo, no entanto, não fica restrita ao bloco representado em 7.30(A). Quando a ferramenta é tracionada, ele se desloca verticalmente para cima, uma vez que neste sentido e direção existe menor resistência. Surge, daí, um movimento que se assemelha a uma onda e há considerável aumento de volume.

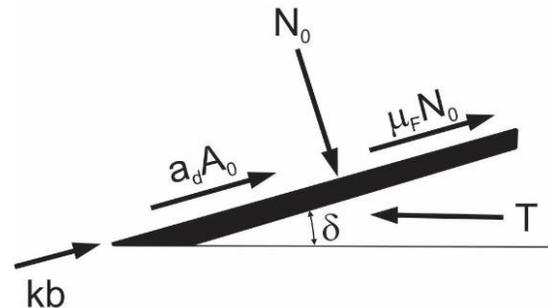


Figura 7.29. Situação equivalente à mostrada na figura 7.24, com a representação da componente de adesão solo-metal.

A formação da cunha de solo que se adere à ferramenta é altamente indesejável, pois o atrito solo-solo é muito superior àquele encontrado no caso do contato solo-metal. Este fato incrementa a demanda de energia no trabalho de mobilização. É também considerado que a cunha formada não é um corpo definitivo. Acredita-se que com o deslocamento da ferramenta tal estrutura deslize sobre o metal e se quebre em uma série de partes menores, principalmente

se há um ângulo de inclinação da lâmina. No entanto, para cada parte quebrada que se desprende do metal, outra cunha será formada,

sendo que o efeito final será semelhante ao de uma estrutura permanente.

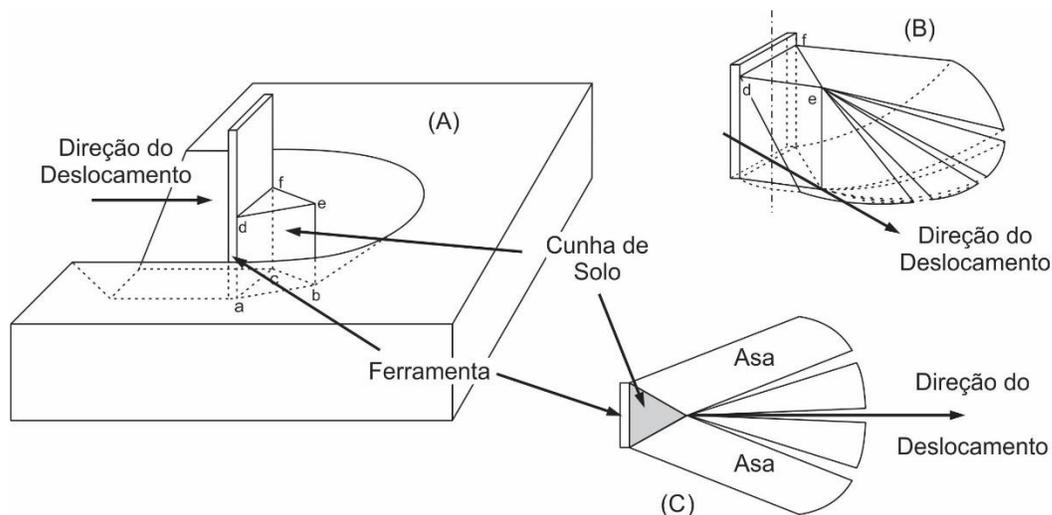


Figura 7.30. Representação esquemática da perturbação causada no solo pela cunha formada à frente de uma ferramenta estreita e do volume mobilizado quando o solo fraturado é retirado (A). O comportamento padrão de fratura ocorre em simetria bilateral em relação à direção do movimento, produzindo quatro blocos fraturados. Observa-se a vista tridimensional em (B) e do plano superior dos blocos em (C). Adaptado de Payne (1956) e Perdok & Kouwenhoven (1994).

O modelo matemático clássico⁸⁶ para estudo do comportamento de ferramentas estreitas é descrito na equação 7.30. Aceita-se que tal relação algébrica seria a *equação universal de movimentação de solo*, a qual se aplicaria a qualquer geometria da ferramenta e descreve a força total (P) necessária para cortar o solo, causando a mobilização desejada.

$$P = (D_u g h^2 N_d + c h N_c + q h N_q) b \quad (7.30)$$

em que:

D_u – densidade do solo;

g – aceleração gravitacional;

h – profundidade de trabalho da ferramenta;

c – coesão interna do solo;

q – sobrecarga superficial verticalmente aplicada no solo;

b – largura da ferramenta;

Os coeficientes N_d , N_c e N_q dependem das características físicas do solo, das formas e dimensões da ferramenta e do atrito entre suas superfícies. Os valores destes coeficientes poderão também ser influenciados pelo ângulo de ação (ataque) e pela relação entre a profundidade de trabalho e a largura da ferramenta (h/b). Tais parâmetros podem ser obtidos de acordo as referências apresentadas no esquema da figura 7.31. De acordo com tais parâmetros pode-se obter:

⁸⁶ Proposto por Reece (1965); Ver Apendice 2.

$$N_d = \frac{\frac{r}{2h} \left(1 + \frac{2r}{3b} \text{sen}\rho\right)}{\cot(\delta + \alpha) + \cot(\beta + \phi)} \quad (7.31)$$

$$N_c = \frac{[1 + \cot\beta \cot(\beta + \phi)] \left[1 + \frac{r}{b} \text{sen}\rho\right]}{\cot(\delta + \beta) + \cot(\beta + \phi)} \quad (7.32)$$

$$N_q = \frac{\frac{r}{h} \left[1 + \frac{r}{b} \text{sen}\rho\right]}{\cot(\delta + \alpha) + \cot(\beta + \phi)} \quad (7.33)$$

$$r = h(\cot\delta + \cot\beta) \quad (7.34)$$

em que:

r – distância entre a ferramenta e o plano de fratura, na superfície do solo;

ρ – ângulo entre a borda da ferramenta e o plano de fratura, observado lateralmente em relação à direção do deslocamento;

δ – ângulo de ataque da lâmina da ferramenta;

α – ângulo de atrito solo-metal;

β – ângulo de cisalhamento do solo, definido pela equação 7.28;

ϕ – ângulo de atrito interno do solo;

Da mesma forma em que no modelo descrito pelas equações de 7.13 a 7.29, o modelo relativo às equações de 7.30 a 7.34 não consideram o efeito da adesão solo-metal como uma das forças concorrentes para a resistência total ao deslocamento da ferramenta. A partir do equilíbrio dinâmico das forças que atuam no sistema representado na figura 7.31(B), pode-se incluir⁸⁷ no modelo apresentado na equação 7.30 a influência da componente adesiva $a_d A_0$, conforme segue:

$$H = (D_u g h^2 N_d + c h N_c + q h N_q) \frac{b}{\text{sen}(\delta + \alpha)} + \frac{a_d h [1 - \cot\delta \cot(\beta + \phi)] b}{\cos(\delta + \alpha) + \text{sen}(\delta + \alpha) \cot(\beta + \phi)} \quad (7.35)$$

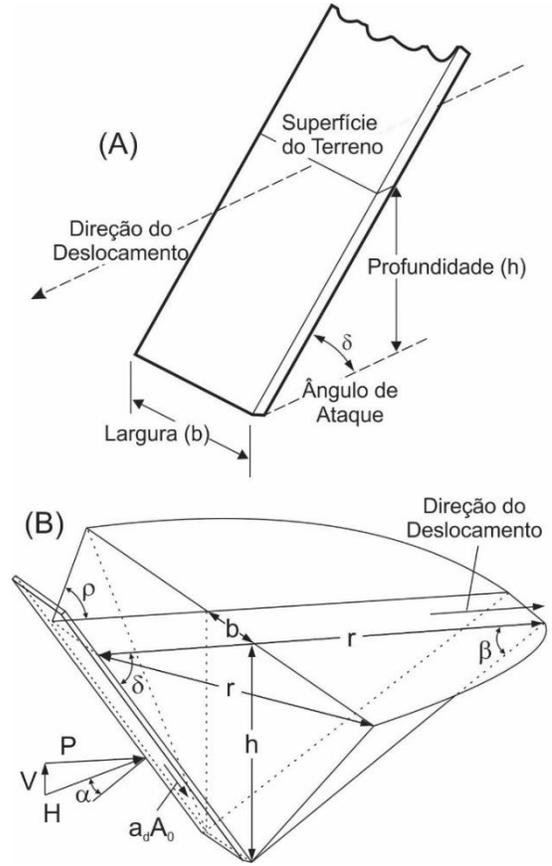


Figura 7.31. Geometria básica de um equipamento agrícola de mobilização de solo; vista frontal (A) e traseira (B), com representação tridimensional do bloco de solo mobilizado. Adaptado de Godwin (2007) e Mckyes & Desir (1984).

Com a introdução deste componente, a força de resistência ao deslocamento da ferramenta dentro do solo seria:

$$P = (D_u g h^2 N_d + c h N_c + q h N_q + a_d h N_a) b \quad (7.36)$$

em que:

$$N_a = \frac{1 - \cot\delta \cot(\delta + \alpha)}{\cot(\delta + \beta) + \cot(\beta + \phi)} \quad (7.37)$$

⁸⁷ Segundo Mckyes & Desir (1984).

BIBLIOGRAFIA CONSULTADA

- AZADEGAN, B., MASSAH, J. **Effect of temperature on adhesion of clay soil.** Iasi: Agronomical Research in Moldavia, v.45, n.2, p.21-27, 2012.
- BHUSHAN, B. **Adhesion and stiction: Mechanisms, measurement techniques, and methods for reduction.** Durhan: Journal of Vacuum Science and Technology B. n.21, v.6., p.2262-2296, 2003.
- DESBIOLLES, J.M.A., GODWIN, R.J., KILGOUR, J., BLACKMORE, B.S. **A novel approach to the prediction of tillage tool draught using a standard tine.** Silsoe: Journal of Agricultural Engineering Research, n.66, p.295-309, 1997.
- FOUNTAIN, E.R. **Investigations into the mechanism of soil adhesion.** Journal of Soil Science, v.5, n.2, p.251-263, 1954.
- GHARAHBAGH, E.A., ROSTAMI, J. **Study of soil abrasion testing and soil abrasivity index for application in mechanized soft ground tunneling.** In: PROCEEDINGS OF NORTH AMERICAN TUNNELING. Englewood: Society for Mining, Metallurgy and Exploration. 2012, p.23-30
- GILL, W.R., VANDEN BERG, G.E. **Soil dynamics in tillage and traction.** Agriculture Handbook 316. USDA, 1968. 511p.
- GODWIN, R.J. **A review of the effect of implement geometry on soil failure and implement forces.** Soil & Tillage Research, n.97, p.331-340, 2007.
- GODWIN, R.J., SPOOR, G. **Soil failure with narrow tines.** Journal of Agricultural Engineering Research, n.22, p.213-228, 1977.
- GUPTA, C.P., SURENDRANATH, T. **Stress field in soil owing to tillage toll interaction.** Amsterdam: Soil & Tillage Research, n.13, p.123-148, 1989.
- HARSONO, S.S. **Tillage implement effects on wet stick soil.** Timisoara: Research Journal of Agricultural Science, v.4, n.43, p.86-94, 2011.
- HENDRICK, J.G., BAILEY, A.C. **Determining components of soil-metal sliding resistance.** St Joseph: Transactions of the ASAE, v.25, n.4, p.845-849, 1982.
- JIA, X. **Theoretical analysis of the adhesion force of soil to solid materials.** Biosystems Engineering, v.87, n.4, p.489-493, 2004.
- KHAN, M. A., QAISRANI, R., JIAN-QIAO, L. **The techniques of reducing adhesion and scouring soil by bionic – review of literature.** Laval: Advances in Natural Science v.3, n.2, p.41-50, 2010.
- KUSHWAHA, R.L. **Investigation of wear of agricultural tillage tools.** Journal of the society of tribologists and lubrication engineers, v.47, n.3, p.219-222, 1991.
- MACHADO, A.L.T., SANTO, A.C., BATISTA, V.J., REIS, A.V., FERREIRA, O.G.L., OLDONI, A. **Metodologia para avaliação do desgaste em ferramentas simétricas de mobilização do solo.** Campina Grande: Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.13, n.5, p.645-650, 2009.
- McKYES, E. **Soil cutting and tillage.** Amsterdam: Elsevier, 1985, 215p.
- McKYES, E., DESIR, F.L. **Prediction and field measurements of tillage tool draft forces and efficiency in cohesive soils.** Amsterdam: Soil & Tillage Research, n.4, p.459-470, 1984.

- MIALHE, L.G. **Máquinas agrícolas para plantio**. Campinas: Millenium, 2012, 623p.
- NICHOLS, M.L. **Methods of research in soil dynamics as applied do implement design**. Auburn: Alabama Experiment Station, 1937, 28p.
- PAYNE, P.C.J. **A field method of measuring soil metal friction**. Journal of Soil Science, v.7, n.2, p.235-241, 1956(a).
- PAYNE, P.C.J. **The relationship between the mechanical properties of soil and the performance of simple cultivation implements**. Journal of Agricultural Engineering Research, v. 1, n. 1, p. 23-50, 1956(b).
- PERDOK, U.D., KOUWENHOVEN, J.K **Soil tool interaction and field performance of implements**. Amsterdam: Soil & Tillage Research, v.30, n.2-4, p.283-326, 1994.
- QAISRANI, R., JIAN-QIAO, L., KHAN, M.A., RASHID, I. **Soil adhesion preventing mechanism of bionic bulldozing plates and mouldboard ploughs**. Laval: Advances in Natural Science v.3, n.2, p.100-107, 2010.
- QUIRKE, S. SCHEFFLER, O., ALLEN, C. **An Evaluation of the Wear Behaviour of Metallic Materials Subjected to Soil Abrasion**. Soil & Tillage Research, n.1 1, p.27-42, 1988.
- REECE, A. R. **The fundamental equation of earthmoving mechanics**. Symposium on Earthmoving Machinery, Automotive Division. Proceeds of the Institution of Mechanical Engineers, 179:8-14, part 3F, London, 1965.
- REN, L., TONG, J., LI, J., CHEN, B. **Soil adhesion and biomimetics of soil-engaging components: a review**. Silsoe: Journal of Agricultural. Engineering Research, v.3, n.79, p.239-263, 2001.
- RICHEY, C.B., JACOBSON, P., HALL, C.W. **Agricultural engineers' handbook**. New York: MacGraw Hill, 1961, 880p.
- RIPOLI, T.C.C. Ferramenta. **Enciclopédia Agrícola Brasileira. São Paulo: USP**, v. 1, p. 220, 1995.
- ROWE, R.J., BARNES, K.K. **Influence of speed on elements of draft of a tillage toll**. St. Joseph: Transactions of the ASAE, n.4, v.1, p.55-57, 1961
- SALOKHE, V.M., GEE-CLOUGH, D., SUHARNO. **Field testing of enamel coated mouldboard plough**. St Joseph: ASAE Paper 901552, 1990, 6p.
- SÖHNE, W. **Einige grundlagen für eine landtechnische bodenmechanik**. Düsseldorf: Gundlagem der Landtechnik, n.7, p.11-27, 1956.
- SONI, P., SALOKHE, V. **Influence of dimensions of UHMW-PE protuberances on sliding resistance and normal adhesion of Bangkok clay soil to biomimetic plates**. Changchun: Journal of Bionic Engineering, v.3, n.2, p.63-71, 2006(a).
- SONI, P., SALOKHE, V. **Theoretical Analysis of Microscopic Forces at Soil-tool Interfaces: A Review**. Agricultural Engineering International: the CIGR Ejournal. Manuscript PM 06 010, v.8, 2006(b).
- SPOOR, G., GODWIN, R.J. **An experimental investigation into deep loosening of soil by rigid tines**. Journal of Agricultural Engineering Research, n.23, p.243-258, 1978.
- STAFFORD, J.V. & TANNER, D.W. **Effect of rate on soil shear strength and soil-metal friction II. Soil-metal friction**. Amsterdam: Soil & Tillage Research, n.3, p.245-260, 1983(a).

STAFFORD, J.V. & TANNER, D.W. **Effect of rate on soil shear strength and soil-metal friction II. Soil-metal friction.** Amsterdam: Soil & Tillage Research, n.3, p.321-330, 1983(b).

SUN, D.A., MATSUOKA, H., MORICHI, K., TANAKA, Y., & YAMAMOTO, H. **Frictional behaviour between clay and steel by direct shear type apparatus** In: DEFORMATION CHARACTERISTICS OF GEOMATERIALS. Lisse: AA Balkema, 2003, p.239-245.

SWICK, W.C., PERUMPRAL, J.V. **A model for predicting soil-toll interaction.** Journal of terramechanics, n.1, v.25, p.43-56, 1988.

TONG, J., REN, L., CHEN, B., QAISRANI, A.R. **Characteristics of adhesion between soil and solid surfaces.** Journal of Terramechanics, n.2, v.31, p.93-105, 1994.

UNITED NATIONS EDUCATIONAL SCIENTIFIC AND CULTURAL ORGANIZATION. **O planeta Terra em nossas mãos.** UNESCO, Earth Sciences for Society Foundation, Leiden, 16p. 2007.

UPADHYAYA, S.K., MA, T.X., CHANCELLOR, W.J., ZHAO, Y.M. **Dynamics of soil-tool interaction.** Amsterdam: Soil & Tillage Research, n.9, p.187-206, 1987.

VILDE, A., TANAS, W. **Detemination of the soil friction coefficient and specific adhesion.** Lubin: TEKA - Komisji Motoryzacji i Energetyki Rolnictwa, n.5, p.212–216, 2005.

ALTERAÇÕES DIMENSIONAIS E DINÂMICAS NAS FERRAMENTAS E RESPECTIVOS EFEITOS NA MOBILIZAÇÃO DO SOLO

A ciência clássica dá a impressão do solo ser suporte imutável, estático, o que de fato nunca foi e nunca será... Modificando somente um único fator do complexo ecológico que ele é, modificam-se todos os demais fatores automaticamente... Quando estamos cientes disso podemos manejar todos os fatores. Se interviermos inconscientemente, as modificações sobrevirão do mesmo modo, mas nem sempre como esperamos. Há por isso a "luta contra a natureza", que parece ingrata e traiçoeira.

Ana Primavesi

As interações entre as ferramentas de cultivo e o solo apresentam particular importância quando da sua mobilização com finalidades de produzir as melhores condições físicas na região onde se localiza o sistema radicular das plantas cultivadas, em benefício do seu desenvolvimento e produtividade. Tais operações são as que, reconhecidamente, demandam maior quantidade de energia nas atividades agrícolas. Com o objetivo

de desenvolver conhecimentos que concorram para a minimização dos dispêndios de potência e de custos, são investigados, com muita frequência, o efeito de alterações nas formas e dimensões das ferramentas e na dinâmica de seu emprego, principalmente no que se refere à velocidade de deslocamento.

A teoria em que se baseiam os estudos sobre as falhas que ocorrem no solo estão relacionadas com os estudos sobre a capacidade de carga por eles suportada e que foi desenvolvida por de Terzaghi⁸⁸. A maneira como as ferramentas de mobilização dos solos provocam tais falhas está relacionada com particularidades de cada um deles em produzir rachaduras que determinarão uma “frente de falha” ou “onda de choque” que se propagará pelo meio criando uma zona de impacto, como descrita no capítulo 7, figuras 7.29 e 7.30. Estudos⁸⁹ destas características remetem a observações que consideram a propagação, dependendo do caso, em duas ou em três dimensões. Estas considerações parecem ser suficientes para explicar o fenômeno em função do tipo de ferramenta que se emprega. A ação de ferramentas com estruturas maiores é melhor representada quando se considera somente duas dimensões, enquanto que estruturas mais alongadas (ou estreitas) seriam melhor representadas num sistema tridimensional.

8.1 Ocorrência de falhas na mobilização do solo por ferramentas agrícolas

As falhas (ou fraturas) provocadas no solo pelas ferramentas de mobilização são classificadas de acordo com a reação à tensão a ele imposta. Suas causas se devem principalmente ao cisalhamento, podendo ainda ter características de fluxo plástico ou à tração. Esta última é menos comum e fica restrita a situações em que, devido a condições de umidade, não se recomenda a realização de operações agrícolas.

É importante notar, conforme esquema da figura 8.1, que a falha por cisalhamento provoca a compressão do solo à frente da lâmina, do que resulta a formação de blocos de solo por ruptura, do tipo geral, ao se vencer sua resistência. A face inferior de cada bloco apresenta conformação de uma espiral logarítmica. São impelidos para a superfície pela ação da lâmina que, no seu movimento progressivo, passa a agir sobre solo firme até rompê-lo novamente e reiniciar o processo. Este fenômeno assemelha-se à predição de comportamento do solo descrito⁹⁰ no Apêndice 2 e representado na figura A13. No caso do fluxo plástico não se delimitam claramente os planos de fratura, mas sim uma região de falha generalizada por toda a massa de solo à frente da lâmina. Ocorre, além disso, um limite de profundidade em relação à largura da ferramenta, a partir do qual a fratura deixa de ocorrer na direção do movimento e para cima, sendo contida no interior da massa de solo e direcionada lateralmente ao deslocamento, o que diminui sensivelmente a ação de mobilização (ou de falha). A figura 8.1(b) ilustra esta condição. A profundidade de ação da ferramenta que promove o movimento ascendente do solo (d_c) é denominada *profundidade crítica*.

Outra possibilidade de mobilização do solo se dá pelo uso de ferramentas que não se enquadram no modelo “lâmina plana inclinada”. Estudos que revelam a interação solo-ferramenta nestas condições são mais raros. A figura 8.2 mostra esquematicamente como seria a propagação da falha no plano horizontal quando se utiliza uma enxada tipo “asa de andorinha” na operação de cultivo. Nota-se que há uma linha de propagação de fratura (frente de falha) e fraturas (falhas)

⁸⁸ Ver Apêndice 2.

⁸⁹ Karmakar et al (2005).

⁹⁰ A teoria geral de mecânica de solos desenvolvida por Terzaghi para aplicações na engenharia civil é utilizada com frequência nos trabalhos relativos à mobilização de solo agrícola por ferramentas simples (placas planas

inclinadas). No entanto, alguns autores consideram que ela não se aplica às operações com ferramentas mais complexas, principalmente quando as condições de umidade podem variar intensamente como é comum na agricultura (Utomo & Dexter, 1981; Rajaram & Erbach, 1996)

disseminadas por todo o bloco de solo e que a velocidade de propagação é relativamente rápida.

8.2 Relação de forças que atuam nas ferramentas

De acordo com inúmeros autores o comportamento do solo em relação à fratura de cisalhamento, quando da atuação das ferramentas simples, resulta em forças horizontais que adquirem características ondulatórias. No entanto, os resultados das pesquisas mostram que tais ondulações não apresentam regularidade no comprimento de onda, o que é compreensível em função da variabilidade do meio. Exemplo típico do fenômeno ondulatório detectado para o caso da ação de lâmina plana inclinada está mostrado na figura 8.3. Nota-se que a variação da força de tração pode ser de $\pm 50\%$ em torno da força média. Relatos frequentes indicam que o comprimento de onda pode variar de 10 a 400mm e apresentar características irregulares para uma mesma operação. As causas para estas variações são o tipo e a condição de solo, relacionadas com sua composição granulométrica, umidade e densidade, principalmente.

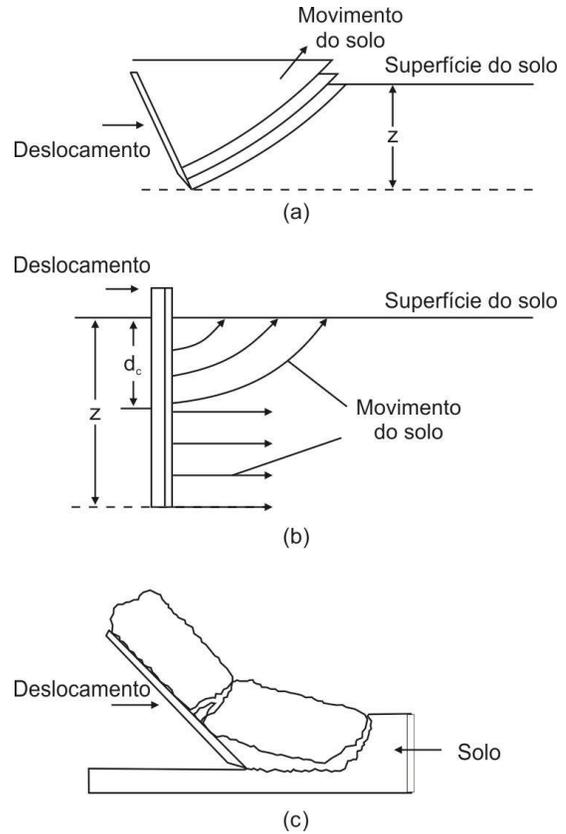


Figura 8.1. Representação esquemática de padrões típicos de falhas causadas por ferramentas agrícolas de mobilização do solo: (a) cisalhamento, (b) fluxo plástico (em que z é a profundidade de trabalho e d_c é a profundidade crítica) e (c) tração. Adaptado de Aluko e Seig (2000).

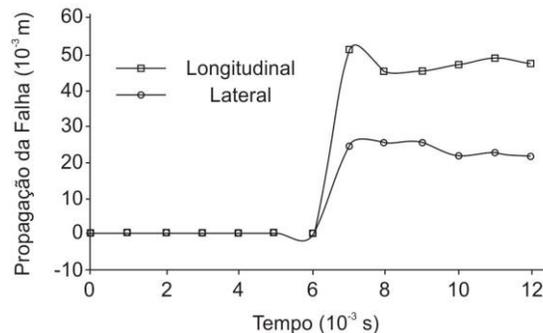
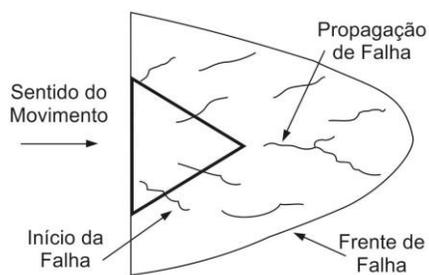


Figura 8.2. Esquema de propagação horizontal de fraturas pelo solo quando utilizada como ferramenta um enxada tipo “asa de andorinha” e respectivas razões de propagação lateral e longitudinal. Adaptado de Karmakar et al (2005).

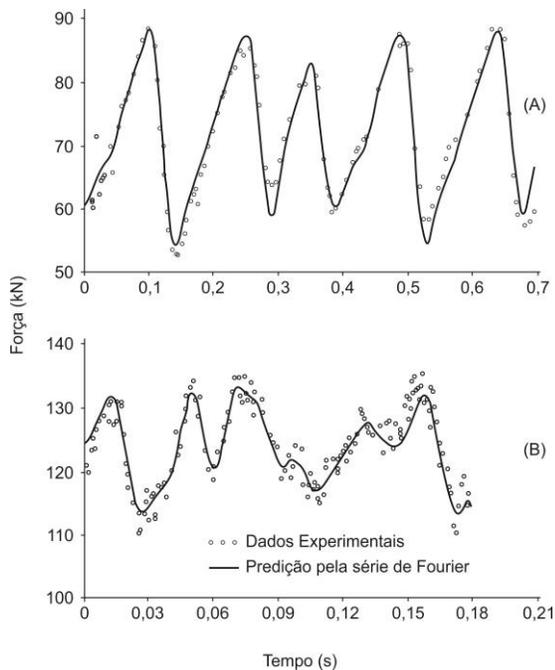


Figura 8.3 Reação da força de tração observada na interação solo-ferramenta para solos diferentes em velocidades de deslocamento distintas: (A) Muito argiloso, $0,22\text{ms}^{-1}$ e (B) Argila arenosa, $1,1\text{ms}^{-1}$. Adaptado de Upadhyaya et al. (1987).

As operações de campo podem sofrer diversas variações no decorrer dos trabalhos de

mobilização, com objetivos de alterar o resultado final, no que diz respeito à condição de solo. Dentre as mais comuns, estão alterações da velocidade de deslocamento, largura da ferramenta e da profundidade de trabalho. Ao que se verifica na prática, equivocadamente, há impressão dos usuários de que a velocidade tenha importância maior do que realmente representa quando se trata do incremento de força necessária à tração dos equipamentos agrícolas. Como se nota, pelos resultados apresentados na figura 8.4, as alterações na largura da ferramenta interferem mais intensamente na força de tração do que aquela decorrente da velocidade de trabalho.

Trabalhando com as informações obtidas nos dados que originaram a figura 8.4, pode-se estabelecer algumas relações entre os efeitos da velocidade e da profundidade de trabalho na força de tração exigida e na potência dispendida para o deslocamento da ferramenta dentro do solo. A tabela 8.1 mostra os valores obtidos para alguns parâmetros a partir das regressões matemáticas apresentadas pelo autor do estudo.

Tabela 8.1 Comportamento estimado da força de tração exigida pelas ferramentas L01, L05 e L20 e da potência* dispendida por elas quando se alteram velocidade e profundidade de trabalho. Adaptado de Manuwa (2009).

Incrementos (%)	L01	L05	L20	L01	L05	L20
Velocidade	392,9			892,9		
Força de Tração	20,8	11,0	5,8	108,9	44,1	22,3
Potência	374,7	336,0	315,6	1765,3	1186,9	992,3
Coef. Variação	1,5	5,9	0,0	2,2	2,3	6,8
Profundidade	357,1			714,3		
Força de Tração	126,2	117,7	91,3	602,9	542,9	372,1
Coef. Variação	2,3	5,1	4,7	5,4	11,9	11,5

* A potência foi estimada em função do produto entre a força de tração e a velocidade de deslocamento.

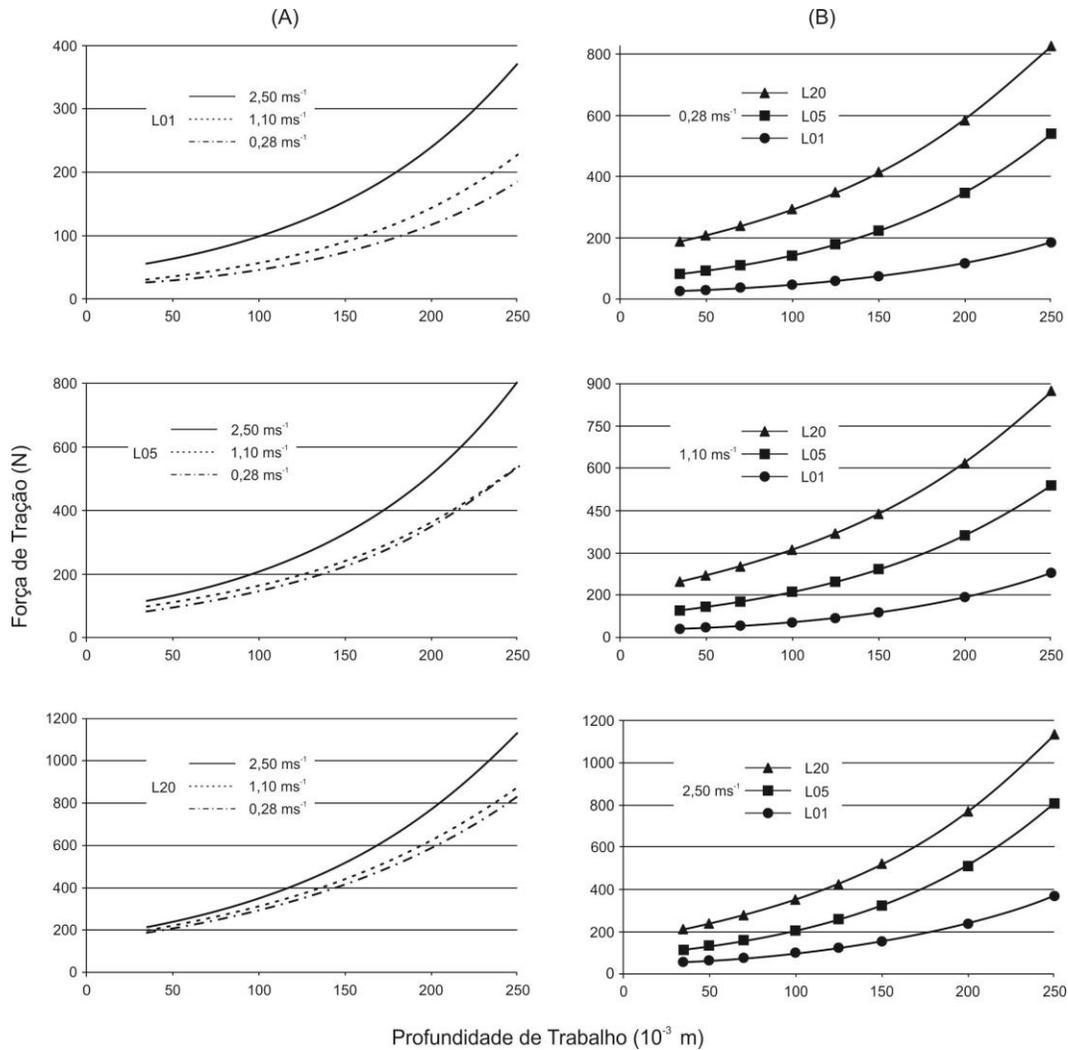


Figura 8.4. Força de tração necessária para o deslocamento de ferramentas no solo, em condições experimentais (em canal de solo), quando são alteradas a velocidade de deslocamento (A) e largura da lâmina (B). Larguras das lâminas utilizadas no ensaio: L01 – 10^{-2} m; L05 – $5 \cdot 10^{-2}$ m e L20 – $2 \cdot 10^{-1}$ m. Adaptado de Manuwa (2009).

As informações apresentadas na tabela 8.1 mostram que com a elevação da velocidade ocorrem importantes incrementos de potência necessária para promover o deslocamento de ferramentas no interior do solo (como seria esperado em função do cálculo deste parâmetro). A profundidade de trabalho, por sua vez, tem efeito maior sobre a exigência tratoria. É possível também afirmar com base nas informações, que os parâmetros estudados crescem menos

com o aumento de largura de trabalho quando considerados os aumentos de velocidade e de profundidade. Ou seja, para um incremento de 20 vezes na largura de trabalho, observa-se aumento de 5,8% e 22,3% na força de tração, para os dois casos estudados de aumento de velocidade (392,9% e 892,9%). Embora seja possível estudar o comportamento das ferramentas e se ter uma boa ideia das forças que agem sobre ela, é difícil prever, teoricamente, o resultado da

ação de mobilização em termos de qualidade final do trabalho para necessidades agrícolas⁹¹. No entanto, estudos experimentais fornecem uma boa aproximação dos padrões de perturbação para padrões esperados de falha, tais como profundidade crítica e distância de ruptura à frente.

8.3 Padrões de perturbação impostos ao solo por ferramentas agrícolas

O sucesso dos trabalhos de mobilização do solo na agricultura depende de diversos fatores que devem ser considerados simultaneamente e não se restringem à exigência tratorria da ferramenta a ser utilizada na sua execução. A eficiência do processo deve considerar também o consumo de energia e o resultado final da operação e, de maneira geral, os fatores mais importantes para realização de trabalho exemplar estão relacionados com a razão entre a largura das lâminas e a profundidade em que serão posicionadas, assim como com o ângulo de ataque⁹².

8.3.1 Ferramentas estreitas

Quando a relação entre a profundidade (h) de trabalho e a largura (b) da ferramenta excede o valor de 5 unidades ($h/b > 5$) e o ângulo de ataque é menor que 90° , a perturbação causada no solo apresenta⁹³ um padrão de fraturas semelhante àquelas cuja representação encontra-se na figura 8.5.

A tabela 8.2 dá uma ideia geral dos parâmetros a , b e c , representados na figura 8.5, segundo os autores do estudo. Como ferramenta de perturbação do solo foi usado um subsolador equipado com torpedo de 0,10 m de diâmetro. À

medida que a razão h/b aumenta, a tendência é de que haja uma menor perturbação próxima da superfície. Em profundidade, as tensões transferidas para o solo provocam deslocamentos laterais e à frente do sentido do deslocamento da ferramenta, produzem resultados aquém daqueles desejados para os objetivos agrícolas. A figura 8.6 mostra como seria o comportamento do solo quando mobilizado por ferramentas com diferentes formas ou atuando com variações das relações entre profundidade e largura. Pode ser notado que em todos os casos o ângulo de ataque é perpendicular ao solo e ao sentido do deslocamento. A figura 8.6(a) mostra que a largura é francamente maior que a profundidade (ferramenta *larga*). Nestas condições a perturbação ocorre predominantemente à frente da lâmina (f) e o efeito lateral (s) é pouco pronunciado, em relação à largura da faixa mobilizada.

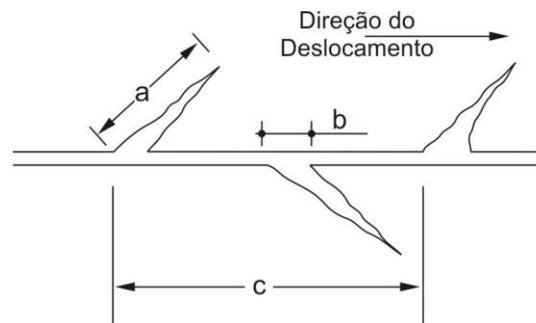


Figura 8.5. Vista, no plano horizontal, das fraturas (perturbação) causadas por lâminas cuja relação profundidade/largura (h/b) é muito alta. Adaptado de Godwin et al. (1981).

A figura 8.6(b) representa a condição onde a profundidade de atuação é maior que a largura da lâmina, porém numa proporção que varia entre 1 e 5 o que caracterizaria a ferramenta como estreita. Percebe-se que o efeito da perturbação no sentido lateral é mais proeminente

⁹¹ Godwin & O'Dogherty (2007)

⁹² Parâmetros basicamente definidos na figura 7.30.

⁹³ De acordo com Godwin et al. (1981).

quando comparado com a largura mobilizada, embora o efeito à frente do deslocamento seja similar ao da situação anterior (8.6a).

A figura 8.6(c) mostra uma situação extrema, onde a profundidade de trabalho é exageradamente maior do que a largura da lâmina - a relação h/b excede, em muito, o valor 5. A ferramenta seria classificada como *muito estreita*. Conforme mostrado na figura, a partir de uma determinada posição na profundidade de trabalho (denominada como *profundidade crítica*), o efeito do deslocamento da ferramenta dentro do solo deixa de agir no sentido horizontal para cima e somente desloca o solo para os lados e para frente. Nestas condições, em função das tensões existentes no interior do solo, devido às suas características físicas (coesão, umidade, peso próprio, etc.) o efeito da perturbação é minimizado e o resultado, do ponto de vista dos objetivos agrícolas da mobilização, ficaria aquém do desejado. Considerando que a profundidade de trabalho é um dos parâmetros que

mais exerce influência sobre a demanda de força de tração, essa condição é altamente indesejável quando se pretende realizar operações mecanizadas de forma eficiente.

Quando a ferramenta utilizada na mobilização apresenta um ângulo de ataque diferente de 90° (que pode ser maior ou menor, dependendo do referencial) a projeção da região perturbada varia de maneira semelhante ao que foi visto anteriormente, porém o volume de solo mobilizado tem relação direta com o ângulo de ataque. A figura 8.7 mostra uma aproximação do que se pode esperar quando se utilizam ferramentas inclinadas em relação ao sentido de deslocamento, quando comparado ao efeito causado pela mesma ferramenta com ângulo de 90° . Observa-se que com ângulo de ataque é superior à 90° , os efeitos da perturbação causada são minimizados. No entanto, quanto menor for esta inclinação, maior será o volume de solo perturbado.

Tabela 8.2. Dimensões geométricas (m) das fraturas (perturbações) no solo com diferentes composições granulométricas*, conforme representação na figura 8.5. Adaptado de Godwin et al. (1981).

Tipo de Solo	Profundidade de Operação	Parâmetros			Umidade % (base seca)
		<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	
Muito Argiloso	0,50	0,34-0,36	0,04-0,06	0,14-0,16	32
Franco Argilo Arenoso	0,58	0,15-0,16	0,02-0,03	0,16-0,18	22
Argila	0,49	0,09-0,12	0,02-0,05	0,10-0,12	49
Argila	0,60	0,10-0,17	0,002-0,007	0,10-0,20	70

* A classificação dos diferentes solos foi baseada no triângulo textural apresentado na figura 3.1.

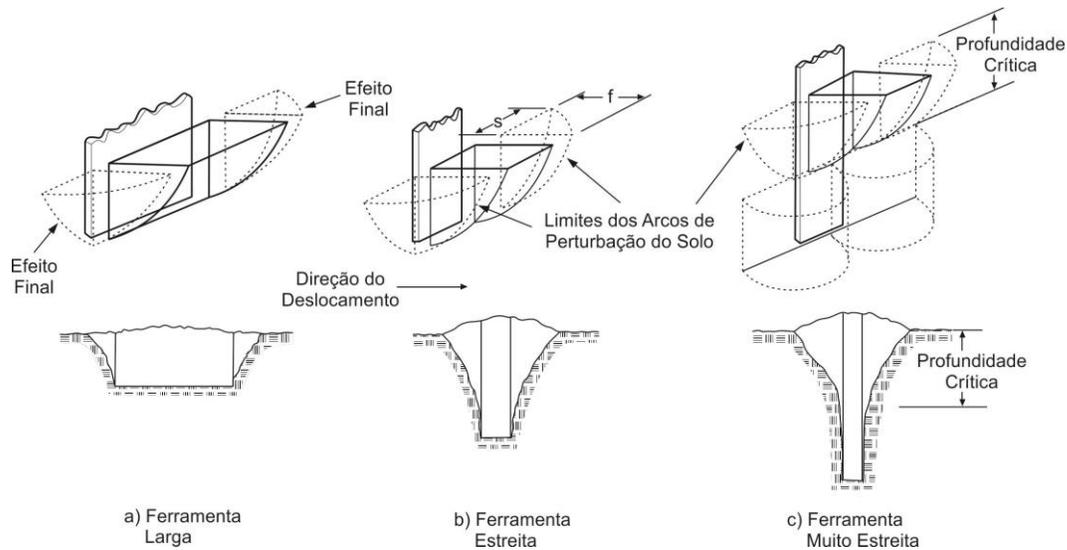


Figura 8.6. Efeito da relação entre profundidade de trabalho e largura da ferramenta na mobilização do solo e nas fraturas causadas na linha de ação. Adaptado de Smith et al (1989).

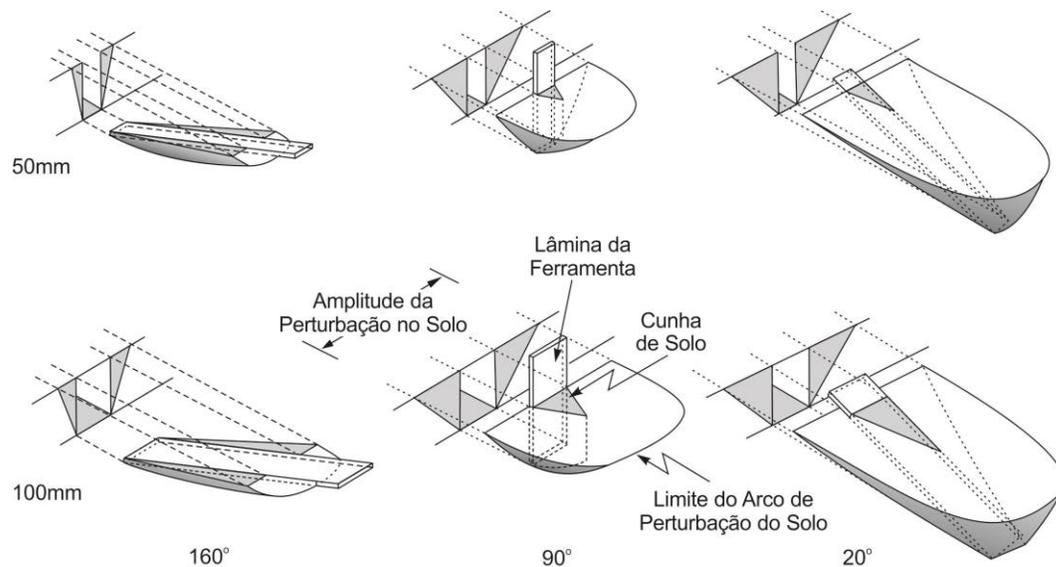


Figura 8.7. Efeito da variação do ângulo de ataque para ferramentas de diferentes larguras atuando na mesma profundidade. Adaptado de Payne e Tanner (1959).

Nota-se, pela figura 8.7, que a profundidade de trabalho foi mantida constante de modo a tornar os resultados comparáveis, apesar da variação do comprimento das lâminas. Os resultados da ação de mobilização causada quando se altera o ângulo de ataque e a relação entre a largura da lâmina e a profundidade de trabalho (b/h) mostram padrões de reação do solo que es-

tão mostrados na figura 8.8. Fica claro que à medida que o ângulo de ataque diminui (ficando mais agudo) a distância horizontal ente o ponto de emergência da ferramenta e a borda dianteira do arco de perturbação do solo aumenta. Também há indicação de que, para ferramentas deste tipo, a exigência tratória cresce proporcionalmente com aumento do ângulo de ataque. Por sua vez, quanto mais agudo é o ângulo de ataque, menor

é a projeção adiante (no sentido horizontal) da borda do arco de perturbação, medida a partir da ponta da lâmina dentro do solo, sendo que ela atinge seu maior alcance próximo de 90°. Esta geometria pode, de acordo com os resultados

apresentados, ser determinada por interpolação dos dados nas respectivas curvas, para cada tipo de solo, uma vez que estes são resultados de informações adimensionais em ambas as coordenadas cartesianas.

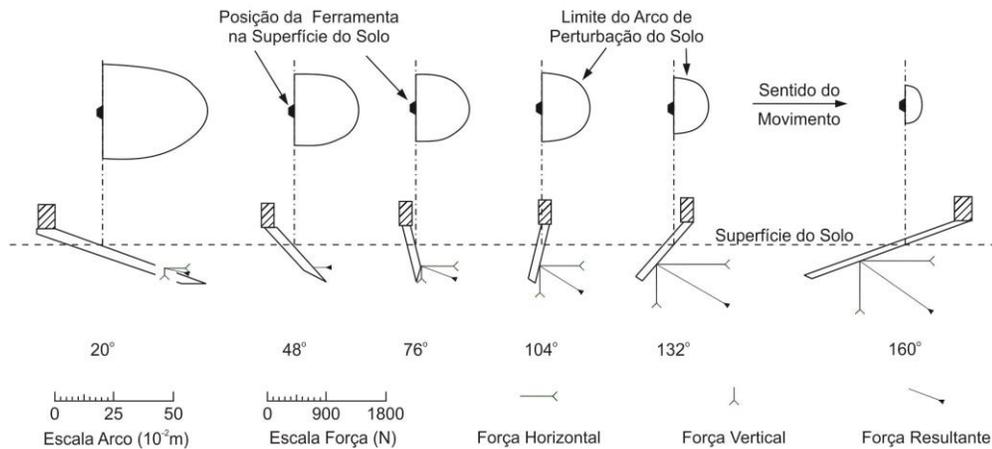
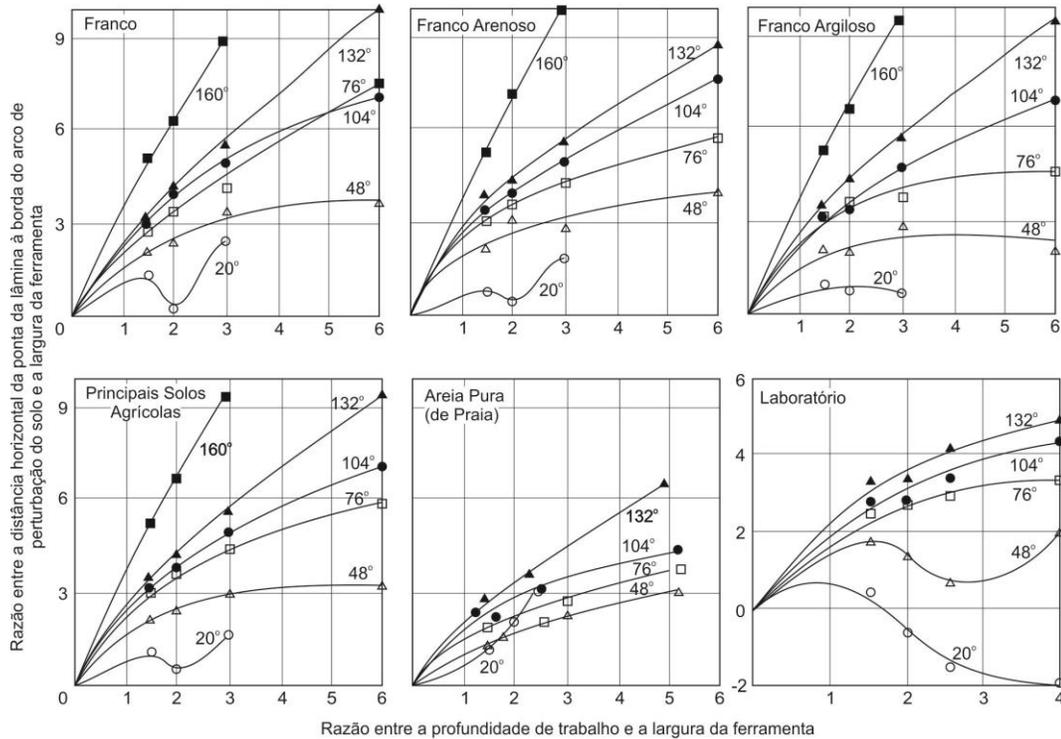


Figura 8.8. Comportamento de vários meios (solos) em relação às alterações das variáveis largura, profundidade de trabalho e do ângulo de ataque das ferramentas. Os desenhos da parte inferior representam o resultado da utilização de uma ferramenta de 5.10^{-2} m de largura atuando na profundidade de 15.10^{-2} m e delimitam o arco de perturbação causado no solo, assim como as forças a que ela estaria submetida. Adaptado de Payne & Tanner (1959).

Em linhas gerais pode-se concluir⁹⁴ que as ferramentas com características que as classificam como *estreitas*, quando deslocadas sob o solo, provocam o surgimento de uma cunha (formada pelo próprio solo) na frente da lâmina, a qual atua como parte integrante da ferramenta, deslocando-o para os lados e para cima, abrindo caminho. O material sob ação da ferramenta separa-se do maciço ao seu redor, ao longo de uma superfície inclinada. Continuamente ele desliza, emergindo na superfície do terreno como uma onda, o que caracteriza a borda do arco de perturbação que será fraturada pela compressão. A distância entre o arco de perturbação e o ponto em que a ferramenta eclode do solo está diretamente relacionada com a profundidade de trabalho. É possível afirmar que a exigência tratória é diretamente proporcional à profundidade de trabalho e à largura da ferramenta.

8.3.2 Associação de ferramentas estreitas

O advento do trator como fonte de potência na agricultura possibilitou o emprego de equipamentos cada vez maiores e mais eficientes na execução de operações agrícolas. Desta forma, o trabalho que a princípio era realizado manualmente com equipamentos geralmente compostos por uma única ferramenta, passou a ser executado por instrumentos maiores, formados pela associação de diversos destes dispositivos e que, em alguns casos, executam várias operações simultaneamente.

No caso de ferramentas compostas por hastes associadas num mesmo chassi, realizando operação de mobilização, observa-se interferên-

cia do trabalho realizado por uma única ferramenta no trabalho da outra imediatamente colocada ao seu lado ou posicionada em sucessão à primeira, quando se toma como referência o sentido do deslocamento do conjunto. Portanto, pode-se afirmar⁹⁵ que a posição relativa entre as hastes no corpo do equipamento agrícola tem efeito importante no desempenho, uma vez que é possível que a exigência tratória de algumas hastes seja diminuída por atuar nas mesmas regiões de solo ou em regiões anteriormente trabalhadas por outra parte do equipamento, como mostrado na figura 8.9.

A perturbação real observada quando ocorre associação de ferramentas pode ser vista no perfil apresentado na figura 8.10. Nota-se que as zonas de interferência dependem fundamentalmente do arranjo dado às hastes. À medida que aumenta o espaçamento (d) entre elas, o fundo da área perturbada apresenta (no centro do intervalo entre as ferramentas e com dimensões diretamente proporcionais) uma região de solo não desagregado em forma de camalhão. Observando o solo trabalhado (desagregado) da superfície, não é possível notar tal condição, o que daria ao observador a impressão de que maior largura de trabalho (com o afastamento relativo entre as hastes) seria vantajosa. No entanto, fica claro que há prejuízo da qualidade do trabalho.

Como forma de aumentar a área vertical (perfil) do solo perturbado, utiliza-se um dispositivo composto de aletas laterais nas ponteiras das hastes. Este recurso permite aumentar a largura do fundo do sulco e com isso tornar a operação mais eficiente no sentido de mobilizar maior volume de solo com cada uma das hastes.

⁹⁴ Payne (1956).

⁹⁵ Godwin & O'Dogherty (2007)

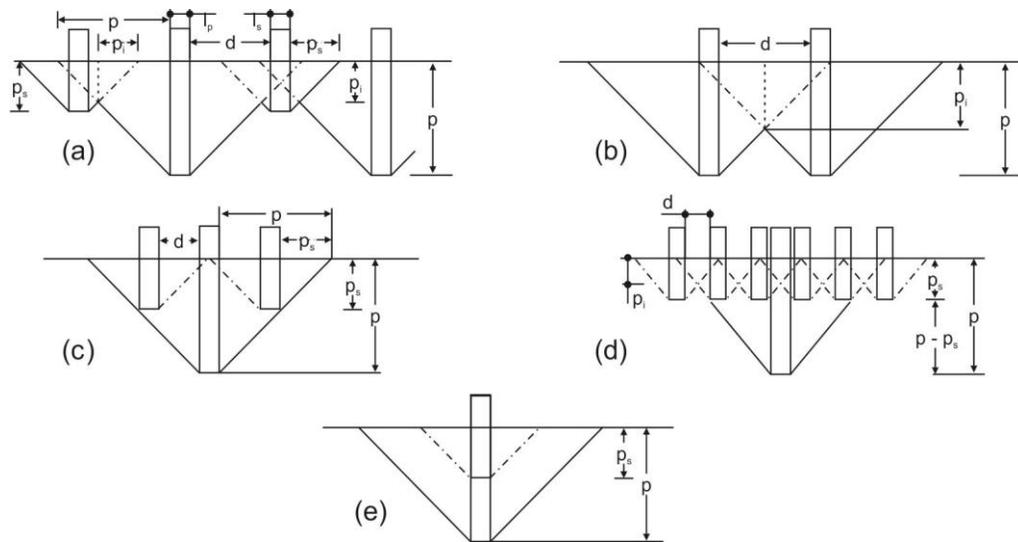


Figura 8.9. Perturbações provocadas no solo por arranjos entre hastes: (a) caso geral; (b) par de hastes lado a lado e profundidade equivalente; (c) par de hastes lado a lado, à mesma profundidade seguidas por haste central, à profundidade maior; (d) múltiplas hastes lado a lado, seguidas por haste central à profundidade maior; (e) par de hastes, em linha, sendo que a frontal atua em menor profundidade. p – profundidade de trabalho da haste principal; p_s – profundidade de trabalho da haste secundária; p_i – região de interferência entre a perturbação das hastes adjacentes, d – distância entre hastes; l_p – largura da ferramenta principal; l_s – largura da ferramenta secundária. Adaptado de Godwin et al (1984).

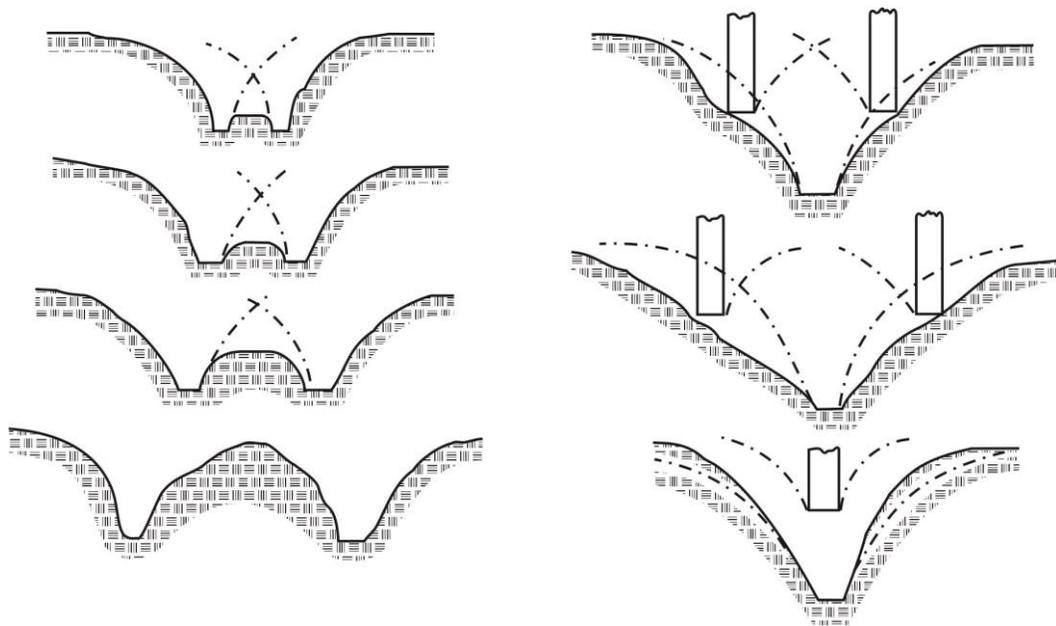


Figura 8.10. Solo perturbado por hastes operando em associação lado a lado (à esquerda) com espaçamento crescente (de cima para baixo) à profundidade de 165mm e em sucessão (à direita) operando à profundidades de 68mm e 150mm. As hastes operando a menor profundidade estão posicionadas lado a lado. As linhas tracejadas representam a região que seria perturbada por ferramentas individuais, sem interferência. Adaptado de Godwin et al (1984).

A figura 8.11 mostra o esquema de uma haste utilizando aletas laterais na sua ponteira. Os equipamentos que apresentam tais características (também chamados de “alados”, uma vez que as aletas se assemelham a asas), de maneira geral apresentam maior exigência tratória, o que poderia ser entendido como uma desvantagem em relação aos convencionais. No entanto, a resistência específica do solo, que é a relação entre a força exigida para realizar tração e a área do perfil perturbado ($N.m^{-2}$), é menor estes casos quando comparados com as operações em que se utiliza ferramenta convencional. A figura 8.12 mostra o resultado da aplicação de ponteiros alados em relação a ponteiros convencionais na área de solo perturbado (secção vertical).

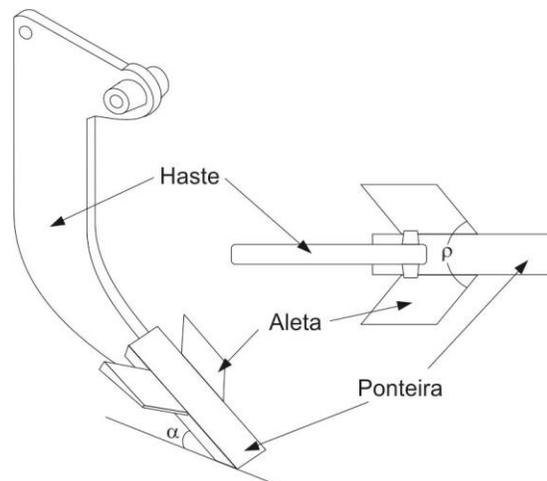


Figura 8.11. Esquema de uma haste utilizando ponteira com aletas: vistas de perfil (à esquerda) e superior (à direita). α – ângulo de ataque; ρ – ângulo entre asas.

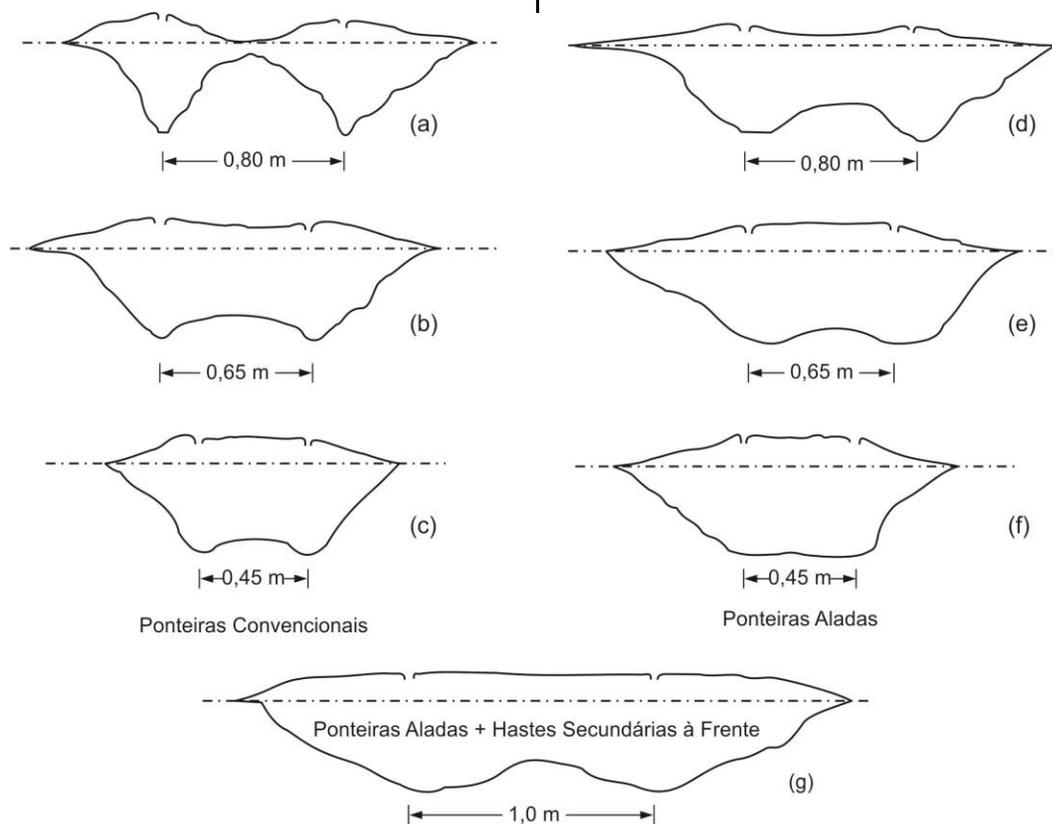


Figura 8.12. Perfil final da área perturbada por ferramentas cujas hastes apresentaram espaçamentos variáveis e tinham configuração de ponteiros convencionais (a, b e c) e com aletas (aladas – d, e e f) e um arranjo de ponteiros alados e hastes secundárias em menor profundidade, operando à frente das principais (g). Adaptado de Godwin & Spoor (1978).

A observação da figura 8.12 sugere que a operação de mobilização do solo por equipamentos que utilizam associação de hastes aladas com hastes convencionais operando em diferentes profundidades e posicionadas sequencialmente em relação ao deslocamento provoca perturbação mais uniforme e numa área maior do que quando são utilizadas somente hastes aladas (comparação

entre 8.12d e 8.12g, embora sejam espaçamentos diferentes). A comprovação deste fato pode ser verificada nos esquemas mostrados na figura 8.13 que apresenta resultados comparativos para várias associações de haste, em operação à mesma profundidade. As medições realizadas durante a operação resultaram nos valores mostrados na tabela 8.3.

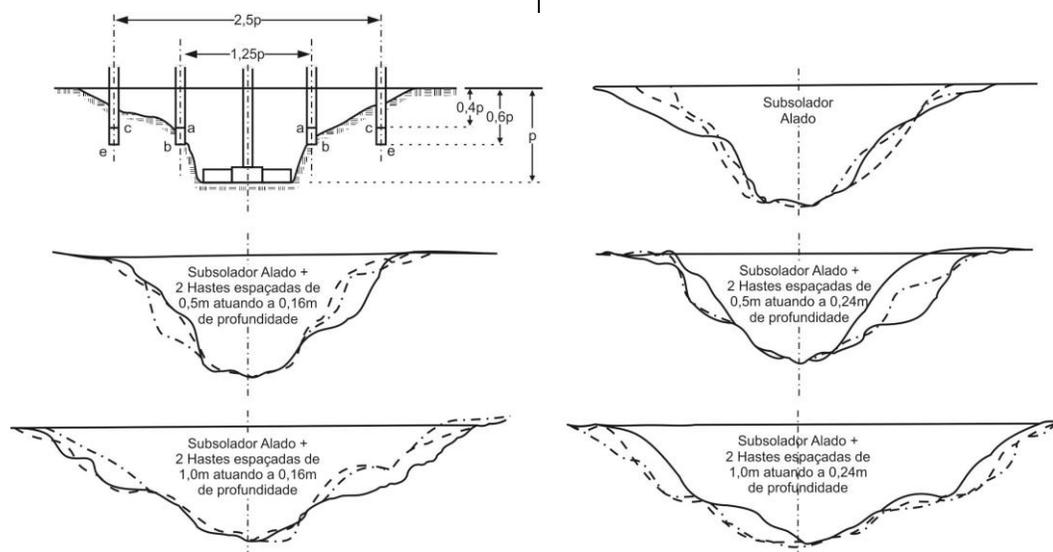


Figura 8.13. Comparação entre resultado obtido para o perfil de perturbação do solo em operações realizadas por subsolador com uma única haste com aletas (acima à direita) e quando associados a duas hastes convencionais em posição avançada em relação ao deslocamento e operando em menor profundidade, com variação de espaçamento em relação à haste principal. As diferentes linhas representam o resultado obtido para três passadas distintas. Adaptado de Godwin & Spoor (1978)

Tabela 8.3. Relações de forças, áreas mobilizadas e resistência específica do solo, em função do arranjo entre hastes, na operação de subsolagem. O esquema de arranjo das hastes está mostrado na figura 8.13. Adaptado de Spoor & Godwin (1978).

Espaçamento (m)	Posição da Ponteira Profundidade (m)	Força Total (kN)	Força na Ponteira Principal (kN)	Força nas Ponteiras Secundárias (kN)	Área de Solo Mobilizado (m ²)	Resistência Específica do Solo (kNm ⁻²)
	Somente Ponteira Principal	23,94	23,94a	-x-	0,242a	99a
0,5	0,16	21,41	16,18b	5,23	0,238a	90a
0,5	0,24	20,86	12,25c	8,61	2,83b	74b
1,0	0,16	20,80	15,23b	5,57	0,360c	58c
1,0	0,24	23,48	14,84bc	8,64	0,418d	56c

Letras diferentes significam diferenças estatísticas a 95% de probabilidade.

As informações e os resultados de pesquisas até aqui relatados podem indicar o arranjo relativo para o espaçamento entre as hastes em função do posicionamento das ponteiras na profundidade de trabalho, conforme o descrito na tabela 8.4.

Nas condições de trabalho agrícola, o ângulo de ataque próximo de 25° (representado por α na figura 8.11) é o que proporciona maior eficiência em relação à exigência tratorria, considerando as tensões e o atrito solo-metal. Não é possível estabelecer um ângulo entre as asas (representado por ρ na figura 8.11) assim como o seu posicionamento em relação à extremidade anterior da ponteira, que proporcione efeito de destaque quanto à mobilização do solo ou qualquer dos outros parâmetros anteriormente citados.

Tabela 8.4. Posição relativa entre espaçamento e profundidade (p) da ponteira para hastes que suportam ferramentas estreitas nas operações agrícolas. Adaptado de Spoor & Godwin (1978).

Configuração da Ponteira/Arranjo	Espaçamento das Hastes em Função da Profundidade (p)
Com aletas (alada)	1,5 a 2,0 p
Com Aletas/Hastes Secundárias	2,0 a 2,5 p

Para ponteiras convencionais as reações do solo e as relações de forças que atuam na ferramenta são similares ao que se verifica para as ponteiras aladas. No entanto, para estes casos, a situação que resultou em menor resistência específica foi quando o espaçamento entre hastes em relação à profundidade de trabalho (p), medida a partir da ponta da ponteira, ficou entre $1,4 \pm 0,25p$. A figura 8.14 mostra os resultados

do trabalho de duas hastes operando lado a lado, com a variação a distância entre elas.

Analisando a figura 8.14 nota-se que, apesar da força de tração exigida pelo conjunto ser menor quando a distância entre hastes diminui, a área do perfil do solo perturbado diminui de forma desproporcional, o que seria indesejável. Ocorre, no entanto, um máximo relativo de perturbação para um dado valor de distância entre hastes. Nesta situação a força de tração exigida pelo equipamento tende a se estabilizar. Este seria, pois, o ponto de mínima resistência específica do solo, indicando a maior eficiência do conjunto.

Em se tratando de ferramentas *estreitas* com hastes rígidas retas operando de maneira singela ou em associação com outras hastes, pode-se concluir que existe uma profundidade de trabalho que é considerada crítica. A partir desta posição a perturbação do solo deixa de ser efetiva (ou diminui de intensidade, consideravelmente). Tal dimensão está relacionada tanto com parâmetros físicos da ferramenta como com as condições do solo. Aqueles relativos à ferramenta são: largura, inclinação (tanto da haste como da ponteira) material utilizado na sua confecção, existência ou não de aletas nas ponteiras, dentre outras com menor importância; as condições de solo dizem respeito principalmente a: umidade, densidade e composição física.

Quanto às condições dinâmicas de operação, são muito importantes as relações entre a largura efetiva das ponteiras das hastes (incluindo possíveis aletas) e a profundidade de operação, as distâncias entre as hastes e a velocidade de deslocamento.

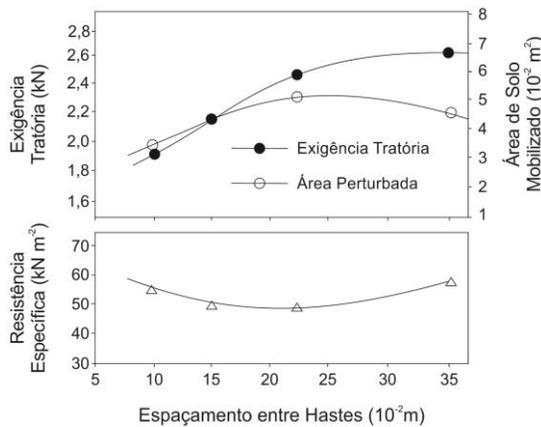


Figura 8.14. Resultados obtidos para ferramentas com duas hastes, operando com ponteiras convencionais, à profundidade de $16,5 \cdot 10^{-2}m$. Adaptado de Godwin et al (1984).

Este grande número de variáveis passíveis de influenciar o comportamento de ferramentas atuando na mobilização do solo torna a previsibilidade da sua reação algo difícil de ser obtido na prática, o que reduz sensivelmente a possibilidade de sucesso da modelagem do fenômeno. Pode-se inferir, portanto, que o trabalho de campo com tais ferramentas seria uma atividade mais próxima de uma arte do que de uma técnica, principalmente quando a complexidade das ferramentas é aumentada.

8.3.3 Ferramentas curvas

A figura 8.15 mostra esquematicamente uma ferramenta curva e o resultado de sua ação no solo. Foram realizados ensaios⁹⁶ em canal de solo com uma parede de vidro de modo que o movimento do solo em função do deslocamento da ferramenta fosse registrado em filme de alta resolução. As observações mostraram que o fenômeno tem três momentos importantes:

- ✓ A forma como o solo é “admitido” pela ferramenta, ou seja, o que acontece no instante do corte pela borda da lâmina e instantaneamente depois;
- ✓ O fluxo da massa de solo pela superfície curva;
- ✓ Sua “expulsão”, ou o momento em que o solo deixa o contato com a ferramenta e volta para o fundo do sulco resultante da mobilização.

Apesar desta constatação, fica claro que os efeitos de continuidade dos três momentos (admissão, fluxo e saída) são interativos e como resultado disso influenciam uns nos outros. A forma como o solo é cortado (ou seja, como ele é admitido no processo, região representada pela marcação *Ad*, na figura 8.15C, E e G) provoca o aparecimento de fissuras na massa que será movimentada pela superfície da lâmina. O corte pode ser contínuo (figura 8.15B), resultar de falhas por cisalhamento (figura 8.15D), ou ocorrer mediante formação de trincas abertas (figura 8.15F). O resultado da operação de corte do solo é determinante na regularidade do seu fluxo e particularmente importante na saída (representada pela marcação *Sa* na figura 8.15C, E e G). Estes fenômenos, assim como as demais situações que tratam da mobilização de solo, apresentam relação íntima com as suas características físicas, como granulometria, umidade, coesão e porosidade, dentre outras.

A forma como a massa de solo perde contato com a ferramenta e retorna para o fundo do sulco determina o resultado agrônomo esperado da operação de mobilização. Representa-se genericamente, na figura 8.15H, I, J e K, o que foi observado no experimento em questão, onde se

⁹⁶ Koolen (1972)

pode destacar quatro condições distintas. A deposição do material que deixa a ferramenta está relacionada principalmente com o tamanho dos torrões formados. Estes, por sua vez têm sua gênese intimamente relacionada ao processo de fissuras formadas no momento do corte (linhas tracejadas na figura 8.15C, E e G, que são desenhos baseados em instantâneos dos filmes efetuados durante as observações), uma vez que o processo de fluxo (entre o corte e a saída) exerce pouca interferência nestas estruturas. No caso do corte contínuo (que causa pequena incidência de rupturas ou falhas na massa de solo), o tamanho do torrão formado será proporcional à resistência do solo ao cisalhamento, no momento da saída. Assim, condições como representado em 8.15B e C, podem resultar torrões com geometria variada e dependem das condições de operação e do solo enquadrarem-se nos esquemas ilustrados na figura 8.15H, I, J e K. No entanto, se o processo de corte for mais irregular ou altamente agressivo como representado em 8.15D, E, F e G, ou quando o processo de fluxo provocar falhas na massa de solo, os torrões obtidos serão determinados pelas falhas existentes (o que também é influenciado pelas características físicas do material) e podem se enquadrar nos esquemas ilustrados na figura 8.5H, I e J. Quase sempre o tamanho do torrão coincide com a sequência de falhas causadas na operação de corte. Ao deixar o contato com a

ferramenta e se quebrar (separar-se da massa de fluxo), o torrão inicia uma queda livre, adquire movimento rotativo (conferindo-lhe velocidade angular) que será determinado pelo comprimento da peça. As características de tal rotação, portanto, estarão relacionadas com as falhas produzidas no processo, com a plasticidade do solo, ou ambas simultaneamente. Ao final da queda ocorre o choque com o fundo do sulco formado pela operação ou com os outros torrões caídos anteriormente. A acomodação final de cada torrão, mais uma vez, será determinada pela geometria das peças. Além disso, dependendo da coesão do solo, o choque poderá causar o desabamento do torrão que, então, será desagregado em pequenos pedaços.

A observação de tais fenômenos pode contribuir para o entendimento do processo de cultivo (no sentido de combate a plantas invasoras e demais atividades agrícolas, florestais e pastoris em áreas onde a planta cultivada está presente) e lavra (no sentido amplo de mobilização de solo em caráter periódico), principalmente no que se refere à aração, quer seja realizada por arados de discos ou de aivecas. Esta operação é considerada como uma das que demanda as maiores quantidades de energia e dispêndio de recursos financeiros, o que contribui com a majoração dos custos de nas atividades produtivas grão-pastoris e florestais.

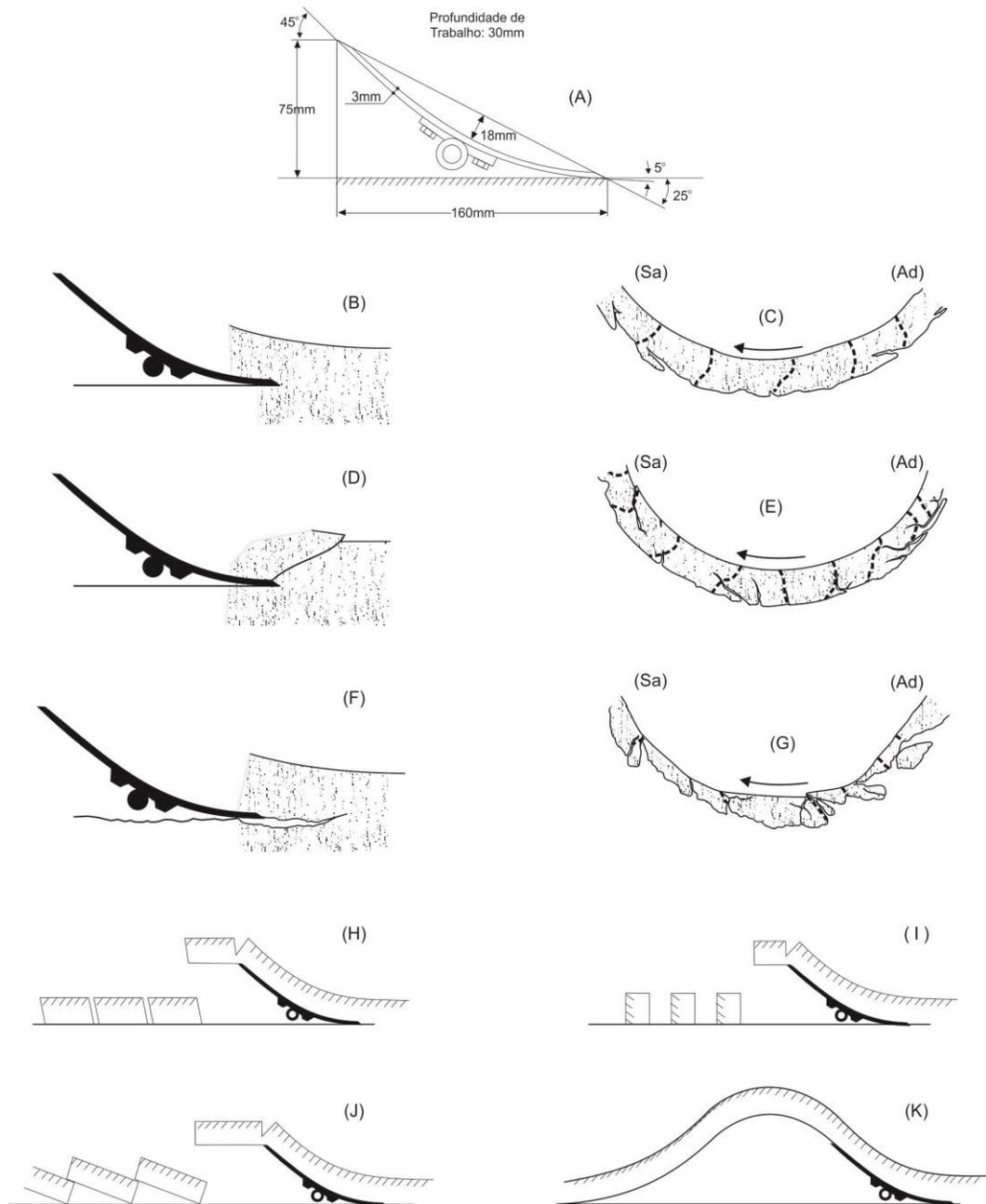


Figura 8.15. Representação de uma ferramenta curva e suas dimensões (A), condições e resultado geral da operação de corte efetuada pela ferramenta em questão (B, D e F), desenhos baseados em filmagem do movimento típico do solo ao ser mobilizado pela lâmina curva (C, E e G) e esquema general do comportamento esperado para o processo de saída do solo e retorno ao sulco resultante da ação da ferramenta (H, I, J e K). Adaptado de Koolen (1972 e 1977).

BIBLIOGRAFIA CONSULTADA

- ALUKO, O.B. & SEIG, D.A. **An experimental investigation of the characteristics of and conditions for brittle fracture in two-dimensional soil cutting.** Soil and Tillage Research, n.57, p.143-157, 2000.
- GODWIN, R.J. & O'DOGHERTY, M.J. **Integrated soil tillage force prediction models.** Journal of Terramechanics, n.44, 3-14, 2007.
- GODWIN, R.J., SPOOR, G. **An experimental investigation into the deep loosening of the soil by rigid tines.** Journal of Agricultural Engineering Research, n. 23, p.243-256, 1978.
- GODWIN, R.J., SPOOR, G., LEEDS-HARRISON, P.B. **An experimental investigation into the soil disturbance and force mechanics aspects of mole ploughs.** Journal of Agricultural Engineering Research, n. 26, p.477-497, 1981.
- GODWIN, R.J., SPOOR, G., SOOMRO, M.S. **The effect of tine arrangement on soil forces and disturbance.** Journal of Agricultural Engineering Research, n. 30, p.47-56, 1984.
- KARMAKAR, S., KUSHWAHA, R.L., STILLING, D.S.D. **Soil failure associated with propagation for an agricultural tillage toll.** Soil and Tillage Research, n.84, p.119-126, 2005.
- KOOLEN, A.J., **Mechanical behavior of soil by treatment with curved blade having a small angle of approach.** Journal of Agricultural Engineering Research, v. 17, n. 4, p. 355-367, 1972.
- KOOLEN, A. J. **Soil loosening processes in tillage analysis, systematics and predictability.** H. Veenman & Zonen BV, 1977.
- MANUWA, S.I. **Performance evaluation of tillage tines operating under diferente dephs in a Sandy clay loan.** Soil and Tillage Research, n.103, p.405, 2009.
- PAYNE, P.C.J. **The relationship between the mechanical properties of soil and the performance of simple cultivation implements.** Journal of Agricultural Engineering Research, v. 1, n. 1, p. 23-50, 1956.
- PAYNE, P. C. J. & TANNER, D. W. **The relationship between rake angle and the performance of simple cultivation implements.** Journal of Agricultural Engineering Research, v. 4, n. 4, p. 312-325, 1959.
- PRIMAVESI, A. **Manejo ecológico do solo: a agricultura em regiões tropicais.** São Paulo: Nobel, 2002, 555p.
- RAJARAM, G. & ERBACH, D.C. **Soil failure by shear versus modification by tillage: a review.** Journal of Terramechanics, v.33, n.6, p.265-272, 1996.
- SMITH, D. L. O.; GODWIN, R. J.; SPOOR, G. **Modeling soil disturbance due to tillage and traffic.** In: **Mechanics and Related Processes in Structured Agricultural Soils.** Springer Netherlands, p. 121-136, 1989.
- SPOOR, G., GODWIN, R.J., **An experimental investigation into the deep loosening of soil by rigid tine.** Journal of Agricultural Engineering Research, n.23, p.243-258, 1978.
- TERZAGHI, K. **Soil mechanics in engineering practice.** New York, John Wiley & Sons, 1967. 729p.
- UPADHYAYA, S.K., MA, T.X. CHANCELLOR, W.J., ZHAO, Y.M. **Dynamics of Soil-Tool Interaction.** Amsterdam: Soil & Tillage Research, n.9, p.187-206, 1987.
- UPADHYAYA, S.K., MA, T.X., CHANCELLOR, W.J., ZHAO, Y.M. **Dynamics of soil-toll interaction.** Soil and Tillage Research, n.9, p.187-206, 1987.
- UTOMO, W.H. & DEXTER, A.R. **Soil friability.** Journal of Soil Science, n.32, p.203-213, 1981.

APÊNDICE

APÊNDICE 1 - FIGURAS

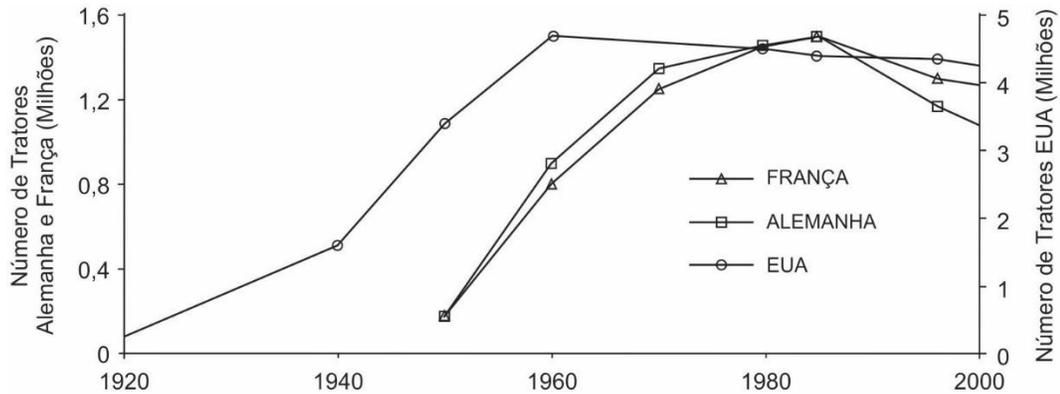


Figura A1. Evolução na frota de tratores na Alemanha, França e EUA, entre 1920 e 2000. Adaptado de PAWLAK, 2002 e WHITE, 2010.

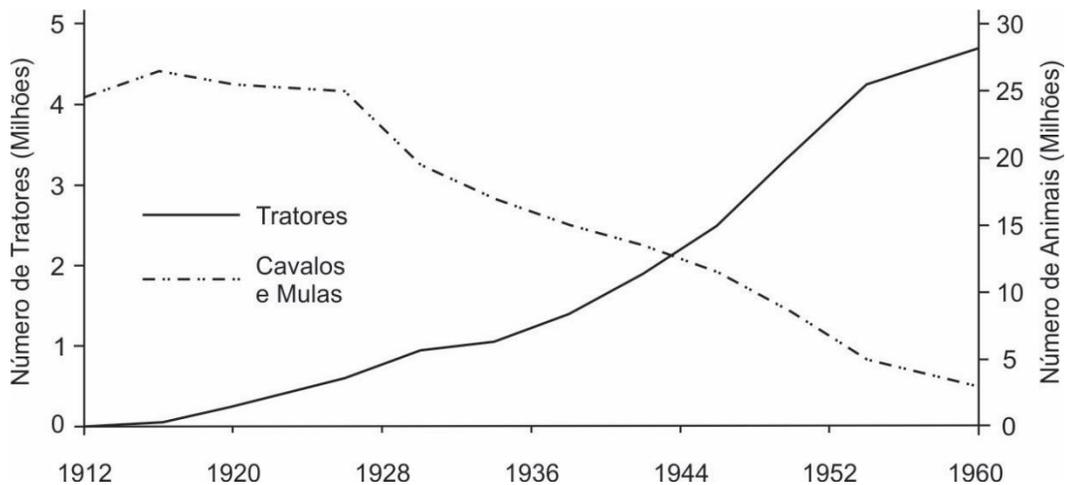


Figura A2. Evolução da frota de tratores e do plantel de animais de trabalho, nos EUA, desde a popularização do uso do trator. Adaptado de WHITE, 2010.

PAWLAK, J. **Farm machinery market in the second half of the XX century.** Agricultural Engineering International: the CIGR Journal of Scientific Research and Development. Paper. Vol. IV. July, 2002. 10p.

WHITE, W. J. **Economic history of tractors in the United States.** 2010. Disponível em <https://eh.net/encyclopedia/economic-history-of-tractors-in-the-united-states/>. Acesso em 22 jan. 2016.

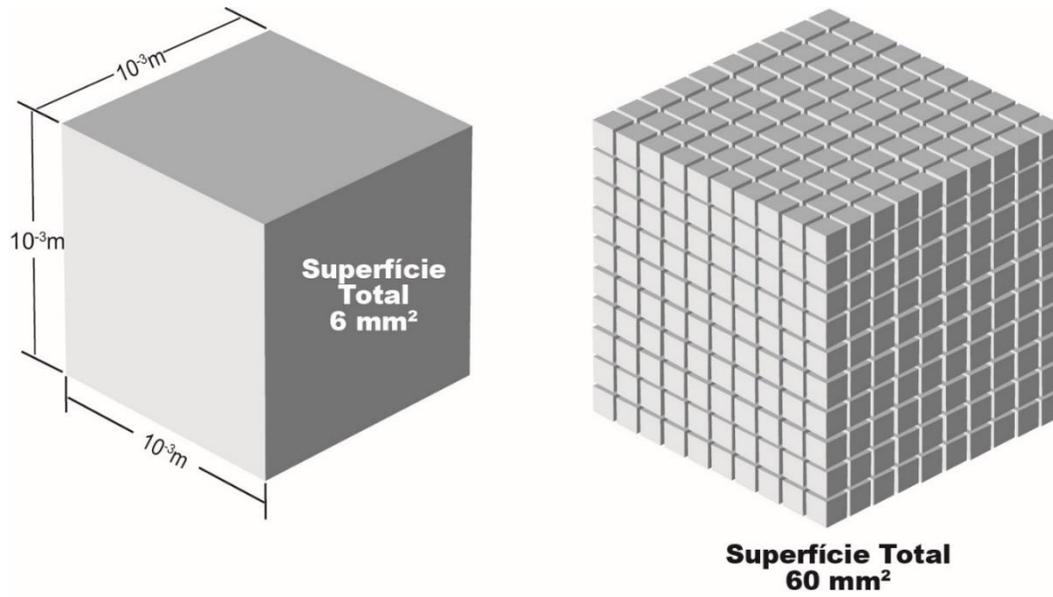


Figura A3. O aumento da área superficial é diretamente proporcional ao número de partículas que ocupa um dado volume. No cubo da esquerda, com arestas de 1mm , o volume é de 1mm^3 , enquanto que sua área superficial é de 6mm^2 . Dividindo-se as arestas deste cubo em 10 partes iguais tem-se 1000 cubos que ocupam o mesmo volume. Como cada um deles terá seis faces com $0,01\text{mm}^2$ cada uma, o total de área superficial será de 60mm^2 .

APÊNDICE 2 – METODOLOGIAS, TÉCNICAS E TEORIAS

MÉTODO DE OBTENÇÃO DO MÓDULO DE POISSON

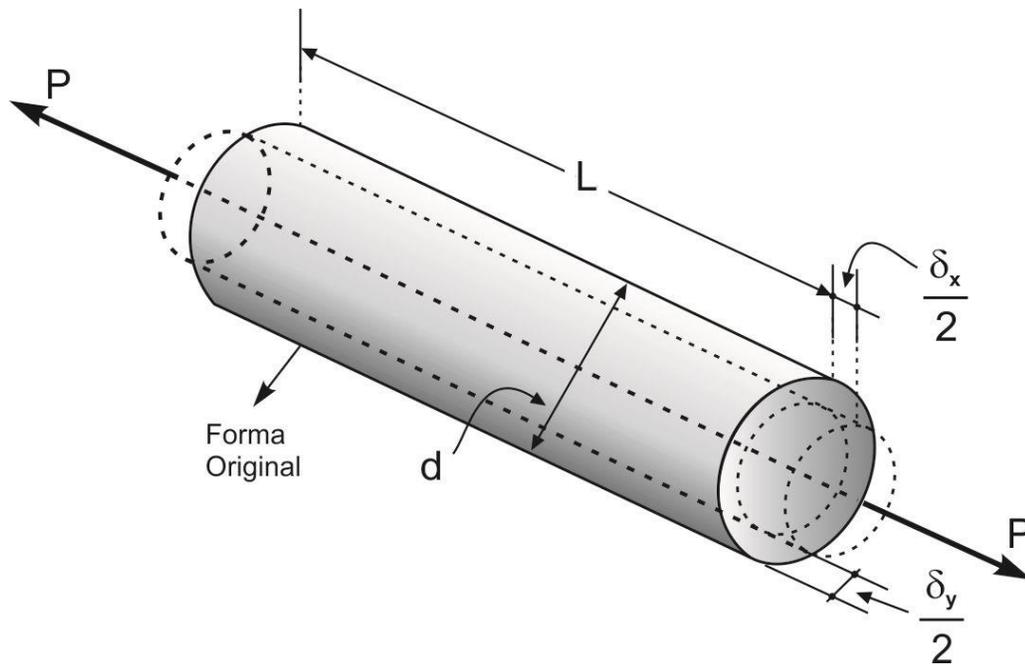


Figura A4. Esquema utilizado para ilustrar a determinação do Módulo de Poisson (ν): cilíndrico metálico sujeito a uma força de tração P que provoca variação de comprimento δ_x e de diâmetro δ_y .

Quando uma força de tração é aplicada em um corpo rígido, como o cilindro representado na figura A4, ocorre alongamento no sentido em que a tração ocorre e contração na direção perpendicular a ela. Considere-se que estas deformações (ϵ) longitudinal (ao longo do comprimento) e lateral (no diâmetro) sejam calculadas de acordo com as equações A1 e A2. Denomina-se *Módulo de Poisson* (alguns chamam de *coeficiente*) a relação entre tais deformações, conforme equação A3.

$$\epsilon_x = \frac{\delta_x}{L} \quad (\text{A.1})$$

$$\epsilon_y = \frac{\delta_y}{d} \quad (\text{A.2})$$

$$\nu = \frac{\epsilon_y}{\epsilon_x} \quad (\text{A.3})$$

BEER, F. P., JOHNSTON, JR, E. R., DEWOLF, J. T. **Resistência dos materiais: mecânica dos materiais**. São Paulo: McGraw-Hill, 2006. 758p.

MÉTODO DE DETERMINAÇÃO DA MASSA ESPECÍFICA DO SOLO

A figura A5 mostra os passos básicos para determinação da massa específica do solo - método do picnômetro.

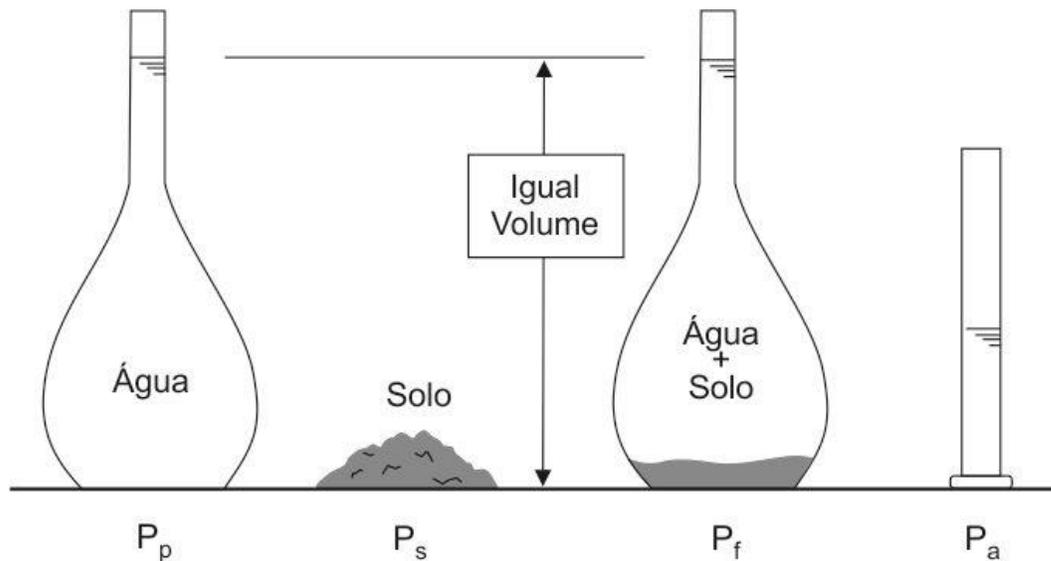


Figura A5. Esquemas de picnômetros utilizados na determinação da massa específica dos sólidos do solo: P_p – massa do picnômetro cheio com água pura; P_s – massa do solo; P_f – massa do picnômetro contendo o solo referente à massa P_s e P_a – massa de água deslocada pelo solo contido no picnômetro.

A massa de água que foi deslocada pelo volume de solo contido no picnômetro pode ser obtida pela relação:

$$P_a = P_p + P_s - P_f \quad (\text{A.4})$$

Conhecendo-se a densidade absoluta (também conhecida como massa específica, D_a) da água à dada temperatura (conforme descrito na tabela A1), pode-se determinar o seu volume (V_a). Então:

$$D_a = \frac{P_a}{V_a} \rightarrow V_a = \frac{P_a}{D_a} \quad (\text{A.5})$$

De maneira análoga, a massa específica dos sólidos (D_s) do solo pode ser obtida pela relação:

$$D_s = \frac{P_s}{V_s} \quad (\text{A.6})$$

Sendo o volume de água deslocada igual ao volume dos sólidos do solo introduzido no picnômetro, pode-se concluir que:

$$D_s = \frac{P_s}{P_a} \cdot D_a = \frac{P_s \cdot D_a}{P_p + P_s - P_f} \quad (\text{A.7})$$

Tabela A1. Peso específico e viscosidade da água, nas condições normais de temperatura e pressão.

Tempertura (°C)	Densidade absoluta (D_a) (kg/m^3)	Viscosidade dinâmica (10^{-3} N.s/m^2)	Viscosidade cinemática ($10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$)	Densidade relativa
0 (gelo)	917,0	-	-	0,9170
0 (água)	999,8	1,781	1,785	0,9998
4	1000,0	1,558	1,558	1,0000
5	1000,0	1,518	1,519	1,0000
10	999,7	1,307	1,308	0,9997
15	999,1	1,139	1,140	0,9991
20	998,2	1,002	1,003	0,9982
25	997,0	0,890	0,893	0,9970
30	995,7	0,798	0,801	0,9967
40	992,2	0,653	0,658	0,9922
50	988,0	0,547	0,553	0,9880
60	983,2	0,466	0,474	0,9832
70	977,8	0,404	0,413	0,9788
80	971,8	0,354	0,364	0,9728
90	965,3	0,315	0,326	0,9653
100	958,4	0,282	0,294	0,9584

VARGAS, M. **Introdução à mecânica dos solos**. São Paulo: EDUSP/MCgraw-Hill, 1977. 509p.

VENANCIO, S. **Abastecimento de água**. 2009. Disponível em: <http://www.dec.ufcg.edu.br/saneamento/Agua02.html>. Acesso em 16/11/2011

ALGUMAS CONSIDERAÇÕES SOBRE TENSÃO SUPERFICIAL, CAPILARIDADE E ADESÃO

Tensão Superficial

Tensão superficial é o fenômeno que ocorre numa superfície líquida em que a atração entre moléculas produz efeito similar ao de uma película. A associação de moléculas na superfície confere ao líquido a capacidade de suportar ou exercer cargas o que explica a formação de gotas num conta-gotas ou das bolhas de sabão. A figura A7(A) representa um recipiente aberto à atmosfera, contendo água. Os pequenos círculos pretos (pontos pretos) representam moléculas em tres posições diferentes em relação ao nível do líquido. Considerando a posição (a), a resultante das forças de atração que atuam na molécula em referência é nula, uma vez que ela está circundada por uma infinidade de outras moléculas (os pequenos círculos vazios) que exercem forças mútuas de tração e repulsão. À medida que a posição da molécula central se aproxima da superfície do líquido (b) será cada vez menor o número de moléculas acima dela e, portanto, a atração para baixo começa a resultar em força vertical direcionada para o fundo do recipiente (F_i). Quando a molécula em questão estiver exatamente na superfície do líquido, praticamente só existirão moléculas abaixo dela e neste ponto (c) ocorre a maior força de atração vertical (F_s) para dentro do recipiente. Assim, a camada superficial estabelece uma fina película (unimolecular) dando origem ao fenômeno conhecido como tensão superficial (T_s).

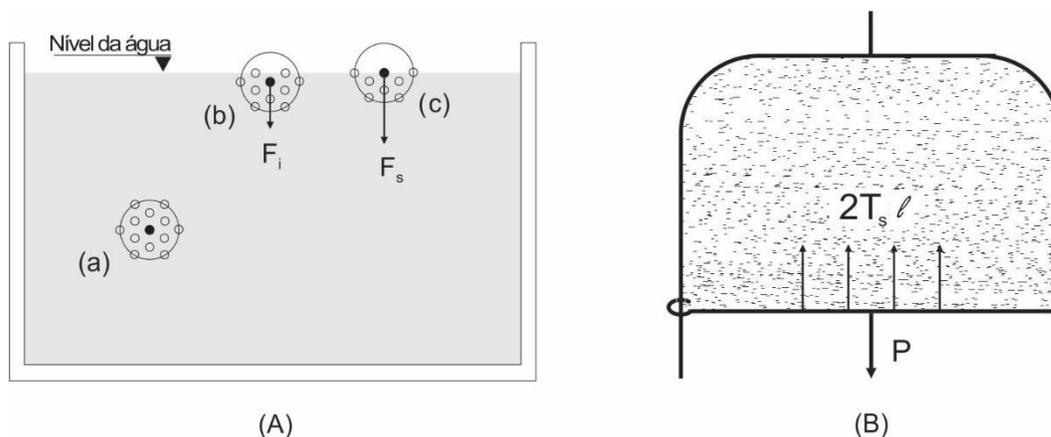


Figura A6. (A) Representação esquemática do fenômeno de atração entre moléculas que dá origem ao fenômeno de tensão superficial (T_s). A linha que envolve as moléculas e tem seu centro coincidente com o do ponto preto, quando entendida de forma tridimensional recebe o nome de *esfera de influência* da molécula central; (B) Uma estrutura em forma de “U” limitada por uma corredeira móvel do mesmo material é imersa numa solução de água e sabão e, em seguida, dela retirada. Forma-se uma película (com estrutura semelhante a uma bolha de sabão) capaz de suportar (até certo ponto) o peso (P) da corredeira.

A tensão superficial é uma grandeza vetorial cuja magnitude depende exclusivamente da natureza (pureza) e da temperatura do líquido. Sua direção será sempre tangente à superfície de separação entre o líquido em questão e o gás ao seu redor (que poderá inclusive ser seu próprio vapor) e perpendicular à linha que estabelece limite da película superficial. O sentido da força por ela gerada é relativo à tendência de contração da película (ou membrana) superficial. O módulo do vetor T_s pode ser descrito em função da força ou da energia nele contida, dependendo do conceito utilizado. No primeiro caso seria a razão entre a força e o comprimento (extensão) do meio em que ela atua (F/l), e no segundo, a razão entre o trabalho da força elástica e consequente variação por ela causada na área da película (ou membrana) estabelecida (W/dx). Desta forma a sua equação dimensional será:

$$[F] = L M T^{-2} \text{ e } [W] = L^2 M T^{-2}$$

$$T_s \approx \frac{F}{l} \rightarrow [T_s] = M T^{-2}$$

$$T_s \approx \frac{W}{l dx} \rightarrow [T_s] = M T^{-2}$$

Na figura A7(B) a força que mantém suspensa a corrediça móvel, será dada por:

$$P = 2T_s l \rightarrow T_s = \frac{P}{2l} \tag{A.8}$$

Em tal situação observa-se que a película formada dentro da estrutura assemelha-se a uma fina camada com a aparência de uma bolha de sabão. A realidade é que, apesar de extremamente estreita, tal película é consideravelmente mais espessa que as moléculas do líquido que a compõe. Então, a exemplo da bolha de sabão, também tal camada é composta por um volume líquido. Este, estará confinado entre duas películas formadas pela tensão superficial sobre as moléculas atraídas para o interior da massa líquida. Como cada película exerce seu papel na sustentação da corrediça móvel, o cálculo da intensidade da força que equilibra o peso deverá ser multiplicado por 2.

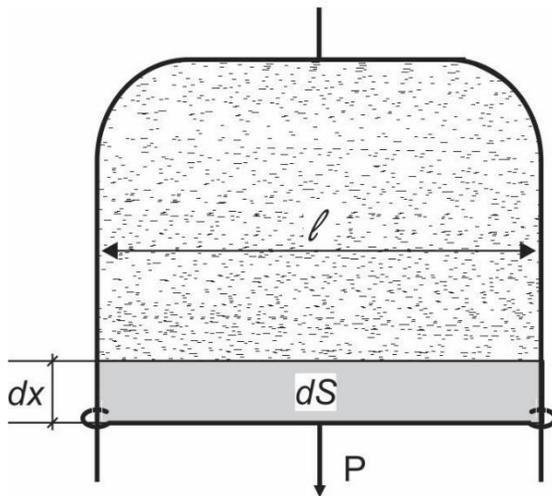


Figura A8. Representação da variação dS da área da película de sabão na estrutura metálica formada por cabos de arame, pelo deslocamento da corrediça móvel de uma distância dx .

O cálculo da tensão superficial que considera o trabalho dW , resultado da ação da força elástica P impondo um deslocamento dx da corrediça móvel (figura A8), cuja consequência é a variação dS da área da película, será:

$$T_s = \frac{P}{2l} \rightarrow T_s = \frac{P dx}{2l dx} \rightarrow T_s = \frac{dW}{2dS}$$

Diferente do que ocorre numa membrana elástica, o aumento da área da película pelo deslocamento da corrediça móvel em relação à sua posição inicial não acarreta aumento da força P , pois não ocorre distensão. Como se trata de um volume de líquido confinado entre películas extremamente próximas entre si, o aumento da área ocorre pela migração de moléculas do interior da massa líquida para a superfície das películas.

MOLHABILIDADE

O termo *molhabilidade* refere-se à capacidade de um líquido molhar uma superfície sólida. Sua avaliação é realizada mediante a observação do ângulo de contato entre a superfície e o líquido, cuja medida seria aquela mostrada na figura A9. Observa-se que relação entre molhabilidade e ângulo de contato é inversa.

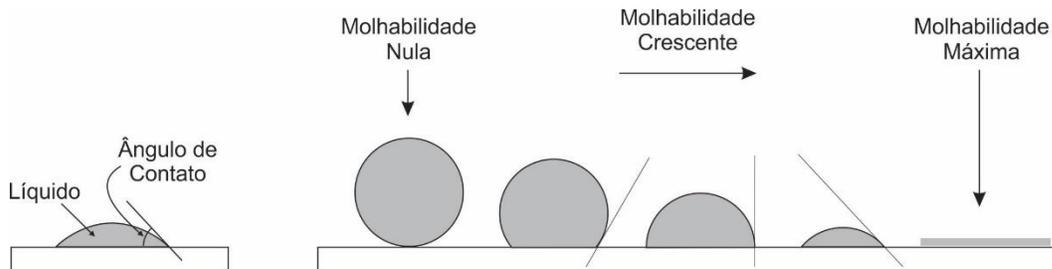


Figura A9. Representação de líquido (em cinza) em contato com uma superfície sólida e as diversas condições de contato entre os materiais, determinando seu ângulo de contato e consequente molhabilidade.

Entre a molhabilidade nula e a máxima existem inúmeras condições que poderiam ser estabelecidas entre os diversos materiais. O exemplo típico de molhabilidade nula poderia ser representado pela condição estabelecida entre o elemento *mercúrio* - Hg e o vidro. Neste caso os materiais se tocariam apenas num ponto, e o líquido se fracionaria em partes formando porções praticamente esféricas. Para o caso de molhabilidade máxima pode-se usar o exemplo entre o petróleo e vidro. Neste caso a película seria formada por uma camada monomolecular.

O ângulo de contato ocorre devido à tensão superficial. Além da já estudada tensão superficial entre a película de separação do líquido e do gás, ainda existem outras duas condições que envolvem este fenômeno, entre o sólido e o líquido e entre o sólido e o gás, como ilustra a figura A10. Estas condições e seus conceitos são utilizados para explicar o fenômeno da *capilaridade*, dentre outros.

A curvatura da superfície de um líquido próxima da parede sólida de um recipiente dependerá das diferenças entre os valores destas tensões superficiais e de suas interações.

Considere-se a figura A10, em que se representa uma parte de um recipiente contendo líquido com a parte superior aberta à atmosfera. As três películas formadas pelas diferentes tensões superficiais estão presentes e em contato na parede do recipiente. Neste ponto de encontro elas devem estabelecer um equilíbrio estático com a presença de quatro forças, das quais três são diretamente relacionadas com as tensões superficiais. A quarta força que resulta desta interação é denominada *força adesiva* ou simplesmente *adesão*. Analisando o equilíbrio no ponto de encontro das películas pode-se observar que:

$$\Sigma F_x = T_{LG} \text{ sen } \theta - A = 0 \quad \rightarrow \quad A = T_{LG} \text{ sen } \theta \quad (\text{A9})$$

$$\Sigma F_y = T_{SG} - T_{SL} - T_{LG} \text{ cos } \theta = 0 \quad \rightarrow \quad T_{SG} - T_{SL} = T_{LG} \text{ cos } \theta \quad (\text{A10})$$

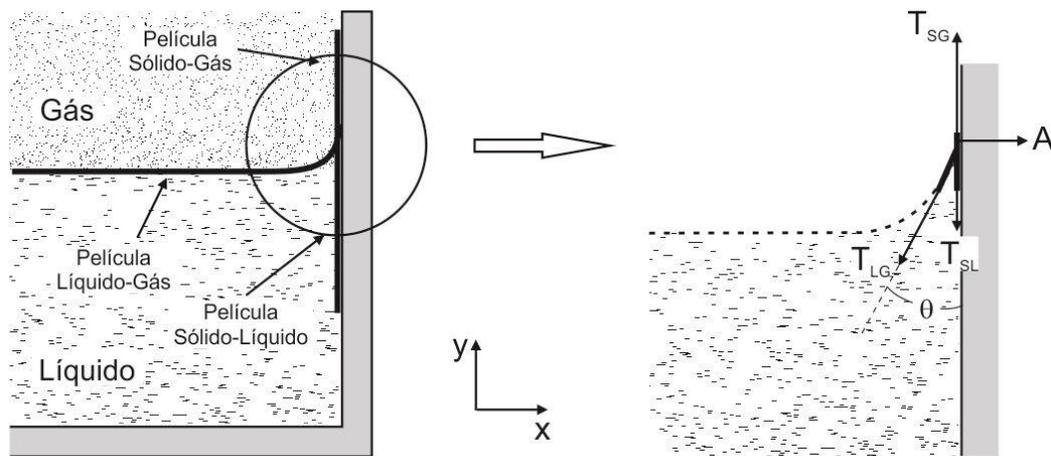


Figura A10. Representação de parte de um recipiente contendo líquido aberto à atmosfera, das tensões e força que agem no ponto de contato limite das três superfícies em contato: T_{SL} – tensão superficial entre o sólido e o líquido; T_{SG} – tensão superficial entre o sólido e o gás; T_{LG} – tensão superficial entre o líquido e o gás e A – adesão. Adaptado de Sears (1966).

A equação A9 ilustra o fenômeno da adesão entre superfícies e a equação A10 mostra que o ângulo de contato (e conseqüente curvatura da superfície de líquido em relação à superfície sólida) depende da diferença existente no valor das tensões entre o sólido e o gás (T_{SG}) e entre o sólido e o líquido (T_{SL}). Quando este valor é positivo, o ângulo de contato está entre 0° e 90° , o que significa que o líquido “molha” o sólido. Assim, quanto maior for a diferença entre tais grandezas, maior será a molhabilidade.

CAPILARIDADE

Quando se introduz um tubo de diâmetro reduzido em um recipiente contendo líquido, observa-se que, devido aos fenômenos relacionados com o ângulo de contato entre as superfícies, pode ocorrer que o nível do líquido dentro dele seja diferente do nível do recipiente. Se o nível dentro do tubo for superior ao do recipiente (o líquido “sobe” pela parede do tubo), o ângulo de contato é inferior a 90° e este é o caso de fenômeno de superfície mais conhecido. Caso contrário o líquido será “empurrado” para baixo e o nível assumirá uma posição inferior àquele existente no recipiente. Em ambos os casos designa-se o fenômeno de *capilaridade*. A figura A11 representa a primeira situação.

Deve-se à capilaridade fenômenos como a absorção de água por uma toalha, a ascensão de fluido pelo pavio de um isqueiro ou de uma vela, a umidade observada nas paredes das construções a partir de sua base, assim como a umidade encontrada nos solos durante os períodos de estiagem e até a translocação de seiva pelo xilema das plantas.

O termo capilaridade é correlato a *capillaris* cuja significação em grego é referente ao cabelo. Trata-se, portanto, de fenômenos observados em tubos de diâmetros com dimensões muito reduzidas. Líquidos, quando em repouso, tendem a estabelecer na sua superfície uma forma curva. A curvatura do líquido no interior dos tubos capilares assume o aspecto de uma calota esférica por ser esta a forma que estabelece a menor relação superfície-volume e recebe o nome de *menisco*.

Para o caso em questão, a película que se forma na camada limitante entre o líquido, o sólido e o gás é monomolecular. A figura A11(A) mostra a ação da força (F) que resulta da tensão superficial atuando em todo o perímetro do cilindro e, em condição de equilíbrio, sua somatória é de mesma magnitude do peso da coluna líquida. A figura A11(B) mostra as relações dimensionais do tubo imerso no líquido em questão.

Sabe-se que:

$$F = T_S l \rightarrow F = T_S \cdot 2\pi r \quad (A11)$$

O peso da coluna de líquido dentro do cilindro é:

$$W = mg = \mu Vg = \mu h\pi r^2 g \quad (A12)$$

em que:

m – massa do líquido;

g – aceleração da gravidade;

μ – massa específica do líquido;

V – volume do líquido contido na coluna capilar dentro do tubo;

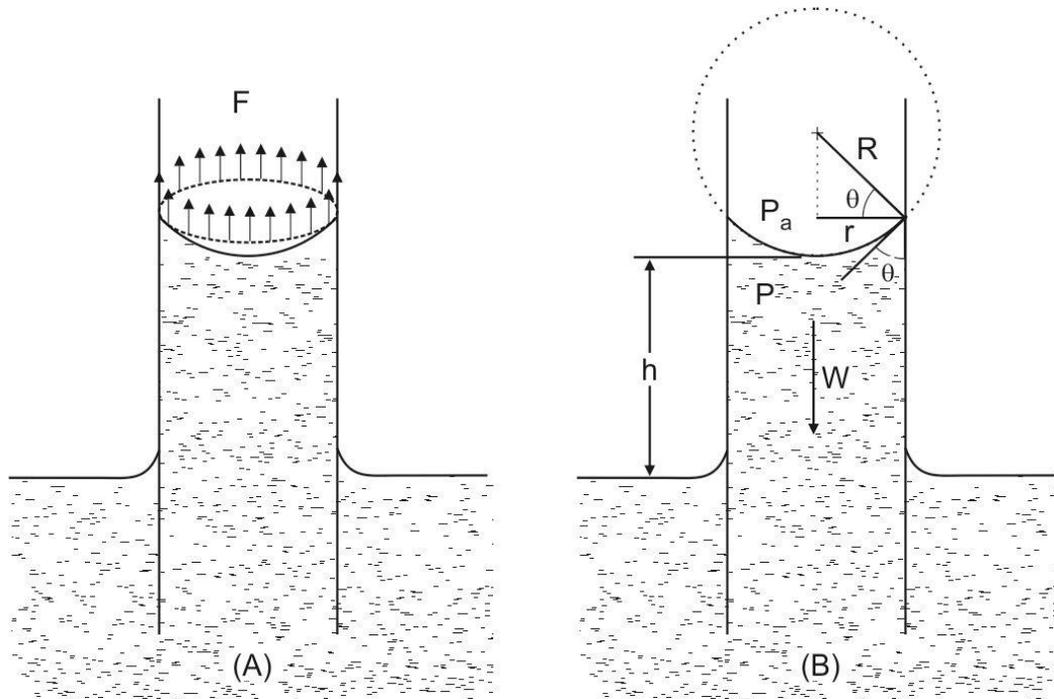


Figura A11. Representação de um tubo capilar imerso num líquido, resultando na ascensão de uma coluna de altura h . Em (A) mostra-se a ação da tensão superficial ao longo da linha de contato entre o líquido e o tubo. Em (B): R - raio do menisco; r - raio do tubo; θ - ângulo de contato; P_a - pressão atmosférica; P - pressão no interior da coluna líquida; W - peso da coluna de líquido.

Na situação de equilíbrio:

$$F = W \rightarrow T_s \cdot 2\pi r = \mu h \pi r^2 g \rightarrow h = \frac{2T_s}{\mu g r} \quad (\text{A13})$$

Como a tensão superficial em questão é aquela que faz com que o líquido molhe o sólido (vidro), na equação A13, T_s pode ser substituída pela diferença entre T_{SG} e T_{SL} , conforme discutido na equação A10, donde:

$$h = \frac{2T_{SG} \cos \theta}{\mu g r} \quad (\text{A14})$$

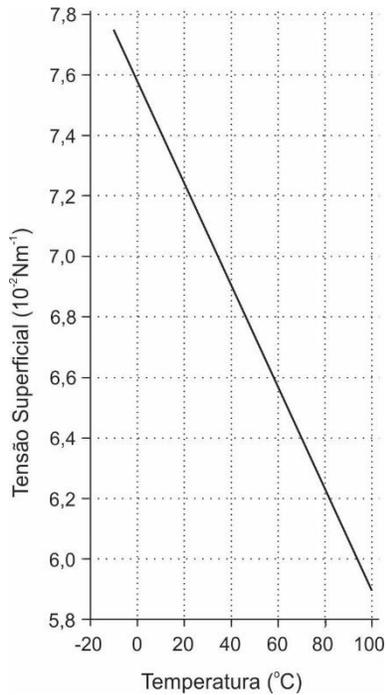
Considerando as pressões envolvidas no fenômeno, fica claro que a pressão atmosférica é maior que a pressão no interior do líquido, por isso ele ascende pelas suas paredes. Na situação de equilíbrio tem-se:

$$P = P_a - \frac{W}{A} \quad (\text{A15})$$

Sendo A a área da secção transversal do tubo capilar e substituindo a equação A12 em A15, tem-se:

$$P = P_a - \mu hg \rightarrow \mu hg = \Delta P \quad (\text{A16})$$

Observa-se que as equações A14 e A16 possuem um conjunto comum de variáveis. Isolando-se estas variáveis e substituindo A16 em A14 tem-se:



$$\Delta P = \mu hg = \frac{2T_{SG} \cos \theta}{r} \quad (\text{A17})$$

A observação da figura A11 mostra que:

$$\cos \theta = \frac{r}{R} \quad (\text{A18})$$

Substituindo a equação A18 em A17 tem-se:

$$\Delta P = \frac{2T_{SG}}{R} \quad (\text{A19})$$

Figura A12. Variação da tensão superficial da água em função da variação de temperatura. Adaptado de Atkins & Paula (2006)

ANHANATI, S. L. **Física**. 2012. Disponível em: http://alfaconnection.net/pag_avsf/fisicoquimica.htm. Acesso em: 26/10/2012.

ATKINS, P.; PAULA, J. **Atkins's physical chemistry**. Oxford: Oxford University Press, 2006, 1064p.

SEARS, F. W. **Física: mecânica, movimento vibratório, calor**. Rio de Janeiro: Ao Livro Técnico S.A., 1966. 678p.

MÉTODO DE DETERMINAÇÃO DA ACELERAÇÃO GRAVITACIONAL RELATIVO À LATITUDE E ALTITUDE

Estudos de gravimetria⁹⁷ tendo como base as leis da mecânica clássica mostram que a gravidade terrestre seria determinada de acordo com a latitude, utilizando-se a equação A.14 e variaria com a altitude conforme a equação A.15.

$$g_{e,\lambda} = g_0(1 + \beta \text{sen}^2 \lambda) \quad (\text{A.14})$$

em que:

$g_{e,\lambda}$ – gravidade efetiva observada na latitude considerada;

g_0 – valor da gravidade observada ao nível do mar, na linha do equador;

β – constante de valor $5,300 \cdot 10^{-3}$ que considera a rotação terrestre em torno de seu eixo (e o conseqüente achatamento de sua forma);

λ – latitude do local considerado, medida em graus.

$$\Delta g_{e,z} = \frac{2g_0(1 + \beta \text{sen}^2 \lambda)z}{R} \quad (\text{A.15})$$

em que:

$\Delta g_{e,z}$ – gravidade efetiva observada na altitude considerada;

z – altitude do local considerado em metros;

R – $6,371 \cdot 10^6$ m, equivalente ao raio do planeta Terra, supostamente esférica, com o mesmo volume do elipsoide de revolução.

Portanto, a gravidade terrestre a ser considerada num local de latitude λ e altitude z seria determinada pela expressão:

$$g_{\lambda,z} = g_{e,\lambda} + \Delta g_{e,z} \quad (\text{A.16})$$

Substituindo A.14 e A.15 em A.16, resulta a equação geral que calcula a gravidade terrestre em qualquer ponto do planeta em relação à latitude e à altitude.

⁹⁷ Lopes (2008).

$$g_{\lambda,z} = g_0(1 + \beta \text{sen}^2 \lambda) \left(1 - \frac{2z}{R}\right) \quad (\text{A.17})$$

Como exemplo prático pode-se citar as condições encontradas em locais com centros de pesquisa agropecuária no Brasil. A tabela A.2 mostra os valores que mostram a variação da aceleração da gravidade em quatro localidades em função de sua latitude e altitude:

- ✓ Fazenda experimental Vale do Curu, da Universidade Federal do Ceará, em Pentecoste - CE;
- ✓ Campus da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” da Universidade de São Paulo, em Piracicaba – SP;
- ✓ Campus experimental de Registro, da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, em Registro - SP;
- ✓ Centro de Ciências Rurais da Universidade de Santa Maria, em Santa Maria – RS.

Tabela A.2. Valores determinados de aceleração gravitacional de quatro localidades e respectivas diferenças em relação ao padrão considerado para latitude 45° ao nível do mar.

Localidade	Latitude	Altitude (m)	Gravidade (m.s ⁻²)*	Variação (%)
Padrão	45°00′	0	9,8062	-
Pentecoste	03°47′S	60	9,7803	-0,264
Piracicaba	22°42′S	547	9,7863	-0,203
Registro	24°29′S	14	9,7892	-0,174
Sta Maria	29°42′S	100	9,7927	-0,138
Ushuaia - AR	54°49′S	0	9,8149	+0,089
Polos	90°00′	0	9,8321	+0,264

* Calculado pela equação 5.19

A análise da tabela A.2 mostra que, à medida que a latitude aumenta ocorre também o aumento da gravidade. Exemplos da localização aproximada correspondente à latitude de 45°, onde seria válido o padrão geralmente adotado para a gravidade (aproximando para 9,81m.s⁻²) a uma altitude próxima do nível do mar, na costa ocidental da América do Sul, o local estaria situado no sul da Argentina, entre as cidades de Camarones e Comodoro Rivadavia e na América do Norte na divisa dos Estados Unidos e Canadá, entre os estados do Maine (EUA) e New Brunswick (Ca). Na costa oriental da América do Sul não existe comunidade à beira mar em tal latitude (a localidade de Coihaique, no Chile, que mais se aproxima da posição geográfica situa-se à altitude média de 300m em relação ao nível do mar). Na América do Norte, a posição oriental correspondente aproxima-se de Lincon City, no estado do Oregon, EUA. Verifica-se, portanto que para medições de maior precisão cuja grandeza depende da aceleração gravitacional deve-se considerar que tal valor não é uma constante.

MÉTODO TEÓRICO DE DETERMINAÇÃO DA CAPACIDADE DE CARGA SUPOSTA POR UM SOLO – FÓRMULA GERAL DE TERZAGHI

A teoria proposta por Terzaghi et al. (1996) tem o objetivo de determinar a capacidade de carga que um solo é capaz de suportar e refere-se à condição de *ruptura geral*. A característica deste comportamento do solo, em relação às falhas por ruptura, trata de pequenas profundidades, sendo contínua e sua linha de ação vai do limite do corpo apoiado (no caso de edificações seriam as fundações) até a superfície do terreno. Verifica-se, neste caso, que nas regiões adjacentes ao fenômeno ocorre importante elevação do terreno. A figura A13 mostra a curva tensão-recalque de onde se pode concluir que o solo resiste ao aumento da tensão sem apresentar deformação importante, até que se rompe de maneira abrupta, praticamente a um só tempo.

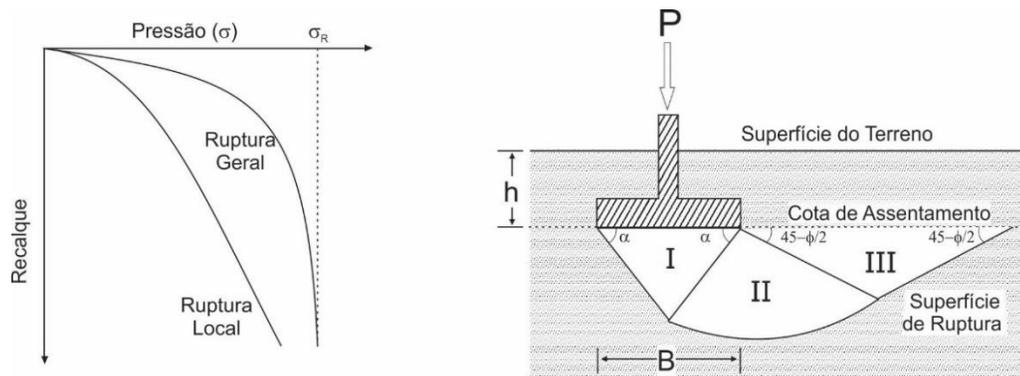


Figura A13. Curva hipotética tensão-recalque de um solo com o comportamento para ruptura geral e local e representação esquemática de superfície ruptura quando submetido à ação de uma placa superficial, segundo teoria de Terzaghi. Adaptado de Alonso (2010)

A equação proposta por Terzaghi et al (1996) para cálculo da relação tensão-recalque considera que:

- O comprimento da placa (H) a que se submete a força P (elemento de fundação) é bem maior que a sua largura B (a relação H/B é maior que 5);
- A cota de assentamento h tem dimensão inferior (ou no máximo igual) à largura B da placa. Esta consideração significa que a resistência ao cisalhamento da camada de solo acima da cota de assentamento da sapata pode ser desconsiderada;
- O solo em questão caracteriza-se por apresentar ruptura do tipo *geral*.

Como apresentado na figura A13, pode-se notar três áreas distintas e cuja conformação assemelha-se àquela apresentada nas figuras 7.29 e 7.30 do capítulo 7.

Área I – uma região de secção triangular, em forma de cunha, formada pelo de solo à frente da placa, em cuja superfície a ruptura acontece segundo um ramo reto;

Área II – esta região é delimitada pela linha potencial de fratura e apresenta uma geometria descrita por uma espiral logarítmica;

Área III – o limite da linha de fratura potencial torna-se uma reta.

A equação que determina a capacidade de carga do solo (σ_R), segundo ruptura geral, é:

$$\sigma_R = cN_cS_c + \frac{1}{2}\gamma B\gamma S_\gamma + qN_qS_q \quad (\text{A.18})$$

em que:

c – coesão do solo abaixo da base da fundação;

γ – peso específico do solo abaixo da base da fundação (usar γ_{sub} no caso de solos saturados);

B – largura da placa utilizada no carregamento do solo;

q – tensão de sobrecarga (o mesmo que tensão efetiva no solo na cota de assentamento ou o valor de γh);

S_c, S_γ, S_q – valores atribuídos de acordo com a forma da placa utilizada para aplicação de tensão ao solo. Denominados de *fatores de forma*, estes valores estão descritos na tabela A3;

N_c, N_γ, N_q – valores atribuídos em função do ângulo de atrito apresentado pelo solo. Denominados *fatores de carga* estão descritos na tabela A3 e na figura A14.

Tabela A3. Fatores de Forma (S) e de Carga (N) para cálculo de capacidade de carga por ruptura geral.

Forma da Placa	Fatores de Forma			Ângulo de Atrito	Fatores de Carga		
	S_c	S_γ	S_q		N_c	N_γ	N_q
Corrida	1,0	1,0	1,0	0	5,7	0	1,0
Quadrada	1,3	0,8	1,0	5	7,3	0,5	1,6
Circular	1,3	0,6	1,0	10	9,6	1,2	2,7
Retangular	$1,0+0,3B/L$	$1,0-0,2B/L$	1,0	15	12,9	2,5	4,4
				20	17,7	5,0	7,4
				25	25,1	9,7	12,7
				30	37,2	19,7	22,5
				35	57,8	42,4	41,4

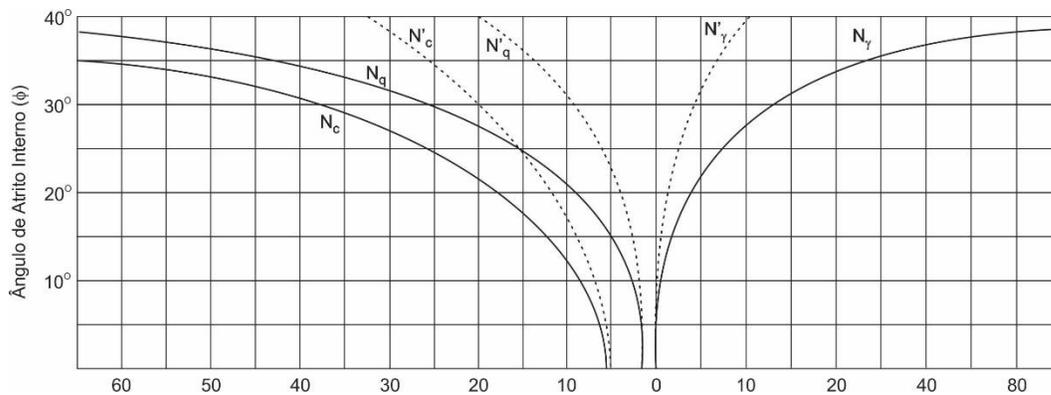


Figura A14. Ábaco para determinação de fatores de carga (N), utilizados na equação A18, de acordo com teoria proposta por Terzaghi et al. (1996).

ALONSO, U.R. **Exercícios de fundações**. Rio de Janeiro: Edgard Blücher, 2ed., 2010. 216p.

TERZAGHI, K., PECK, R.B., MESRI, G. **Soil Mechanics in Engineering Practice**. New York: John Wiley and Sons, 3ed. 1996, 644p.