

# Metodologia de pesquisa em manejo do solo: estrutura e porosidade do solo

por Pedro Luiz de Freitas<sup>1</sup> e Philippe Blancaneaux<sup>2</sup>

## INTRODUÇÃO

A avaliação da estrutura de um solo, definida como a forma que partículas minerais e orgânicas e espaços vazios estão arrançados em um perfil, em relação a sua potencialidade para o crescimento de raízes e para a atividade biológica, é discutida considerando a dinâmica de formação das unidades estruturais e a relação com outros parâmetros do solo. Vários métodos são apresentados, incluindo a caracterização morfológica a campo, o estudo micromorfológico em laboratório, a determinação da estabilidade, distribuição de tamanho, e densidade de agregados e da dispersão da argila em água.

A porosidade, ou a fração do solo ocupada por água e ar, é também discutida como um complemento à caracterização estrutural do solo, considerando duas classes distintas: os microporos (0,2 a 30 microns) e os macroporos (50 a 300 microns). Métodos para a determinação da distribuição de tamanho de poros são apresentados, com base na curva de retenção de água, na intrusão de mercúrio e no estudo morfológico do solo.

## ESTRUTURA DO SOLO

### - Definição

A estrutura de um solo é definida como a forma que partículas minerais e orgânicas e espaços vazios

estão arrançados em um perfil, em relação a sua potencialidade para o crescimento de raízes e para a atividade biológica (Freitas, 1988). A estrutura complementa a noção de textura e é essencialmente ligada ao estado dos colóides do solo, os quais podem ser dispersados ou floculados em agregados elementares.

### - Fatores de formação das unidades estruturais

A formação e destruição da estrutura é um processo dinâmico e sua manutenção é, sem dúvida, um dos maiores objetivos do manejo do solo. Entre os fatores envolvidos neste processo temos a presença de sistemas radiculares, os quais podem ter um efeito desagregante, pela penetração e crescimento secundário das raízes, no caso de dicotiledôneas, ou agregante, pelo envolvimento e compressão de partículas minerais e pequenos agregados, no caso de monocotiledôneas. Raízes podem também atuar na estabilização ou colapso de agregados, causando sua desidratação e contração diferencial pela absorção de água.

A atividade biológica tem um papel reievante na agregação, quer seja através dos microorganismos que agem envolvendo partículas ou produzindo agentes cimentantes, em especial os polissacarídeos, ou pela mesofauna do solo. Não existe dúvida, por exemplo, do efeito benéfico de minhocas que agem disseminando microorganismos, perfurando canais e, em alguns casos, formando agregados estáveis.

Dentre os fatores físicos que afetam a estrutura temos a variação da umidade. Quando um solo seca, a desidratação dos agentes cimentantes e a consolidação da argila podem promover uma

<sup>1</sup> Engenheiro Agrônomo, Ph.D., Pesquisador da SNLCS/ EMBRAPA.

<sup>2</sup> Pedólogo (Doutor), Pesquisador da ORSTOM, França, Consultor da SNLCS/EMBRAPA.

densificação maior que a causada por qualquer agente externo em condições naturais. O umedecimento, por outro lado, pode causar o aumento da pressão de ar dentro do agregado e sua implosão. Tais efeitos dependem do tipo de solo, de seu estado de agregação, da umidade quando seco, da intensidade do processo de molhamento e da temperatura (Harris et al., 1966).

A formação genética das unidades estruturais do solo tem seu efeito favorecido por um duplo processo: a floculação dos colóides e a cimentação das partículas pelos colóides floculados. Um bom agente cimentante deve encontrar-se sob uma forma floculada, sendo que esse estado deve ser tanto mais estável quanto possível. Uma classificação, baseada essencialmente na cimentação e na eficácia relativa dos diferentes complexos coloidais do solo, foi apresentada por Duchaufour (1965), como segue:

a) Argilas (sozinha ou ligada aos óxidos de ferro): é a origem das estruturas ditas por fragmentação resultantes dos processos de retração no período seco. Essas estruturas são menos estáveis que aquelas ligadas a presença simultânea de cimentos húmidos e podem ser destruídas pelo umedecimento rápido.

b) Cimentos húmicos: agem em conjunto com a argila formando complexos argilo-húmicos, cuja estabilidade é função da polimerização dos ácidos húmicos. Esses complexos constituem um agente cimentante muito estável presente nos agregados elementares de tamanho inferior a 1 mm. Se a atividade biológica for intensa, o cimento argilo-húmico reúne estes agregados em unidades maiores (grumos), que podem vir a formar estruturas muito aeradas (estrutura esponjosa). Apesar de menos estáveis, essas estruturas são constantemente reedificadas na medida que a atividade biológica se mantém elevada.

c) Óxidos de ferro e alumínio: o papel destes elementos depende da forma, como segue:

- Forma coloidal, ligada a complexos argilo-húmicos: os íons de alumínio e ferro neutralizam as cargas negativas dos colóides (argila e húmus) e favorecem sua floculação. Quando a

concentração dos íons é alta nos complexos argilo-húmicos, formam-se agregados estáveis, mesmo em meio muito ácido e pobre em bases (Emerson et al., 1959). Os solos ácidos portanto tem uma estrutura variável segundo a abundância e a forma do ferro e do alumínio.

- Forma coloidal livre ou complexada pelos ácidos húmicos: essa forma condiciona uma estrutura laminar, cimentando grãos de areia dos horizontes B spódicos, por exemplo, originando uma estrutura concrecionada pouco endurecida.
  - Forma cristalina ou endurecida: quando os elementos precedentes são fortemente individualizados e no estado cristalino, constituem um cimento endurecido que forma um revestimento em torno dos grãos. Neste caso, os agregados formados são pouco porosos e muito duros; são concreções que podem existir no estado isolado ou em forma de massa endurecida.
- d) Carbonato de cálcio: o calcário fino, precipitado pela insolubilização do bicarbonato de cálcio pode ter um papel importante na formação dos agregados, formando com o húmus películas em torno dos grãos maiores (grumos das rendzimas). Estes agregados podem evoluir até uma forma endurecida por cristalização (calcita, apatita, etc.) que constitui as concreções ou crostas.

Chega-se assim a uma classificação genética, que apresenta aspectos, propriedades e estabilidade muito diferentes segundo os casos, os quais podem evoluir no tempo e no espaço. Pode-se distinguir três tipos fundamentais:

- a) Estruturas construídas: resultantes da atividade biológica que intervem diretamente pela ação mecânica e indiretamente pelo fornecimento de cimentos húmicos. Os grumos resultantes são de forma irregular, porosos, aerados e geralmente estáveis.
- b) Estruturas fragmentares: formadas a partir da fissuração de uma massa argilo-siltosa pouco humificada por um fenômeno de retração. Os

elementos resultantes tem uma forma angular e são instáveis.

- c) Estruturas concrecionadas: provenientes da precipitação de origem físico-química de hidróxidos fortemente cristalizados em torno de grãos grosseiros, energicamente soldados. As concreções geralmente são duras e debilmente porosas, em oposição aos grumos mais friáveis e porosos.

### RELAÇÃO COM OUTROS PARÂMETROS

A importância da estrutura é considerável, uma vez que influencia diretamente várias propriedades do solo. Baseando o estudo da estrutura na definição de uma ótima condição estrutural, encontrada em um solo recém-arado, após ter sido mantido por um longo período sob densa vegetação de gramíneas,

encontramos condições como boa aeração e drenagem, facilidade de cultivo (friabilidade), resistência à erosão, muito baixa dispersão da argila e, principalmente, um ótimo ambiente para crescimento e funcionamento de raízes (Low, 1972).

Mesmo um solo altamente produtivo, cultivado por muitos anos, pode se tornar infértil pela degradação de suas propriedades físicas, resultando em uma condição estrutural onde os agregados são escassos, frágeis e mal distribuídos. Esta condição impede o movimento e a retenção de água, a aeração, a absorção de água e nutrientes pelas plantas e toda atividade biológica. Nestas condições, mesmo a mais pesada adubação não poder recuperar a produtividade inicial do solo. Um esquema das interrelações funcionais envolvendo os efeitos das práticas de manejo na estrutura do solo, e conseqüentemente na produtividade, é apresentado na Figura 1.

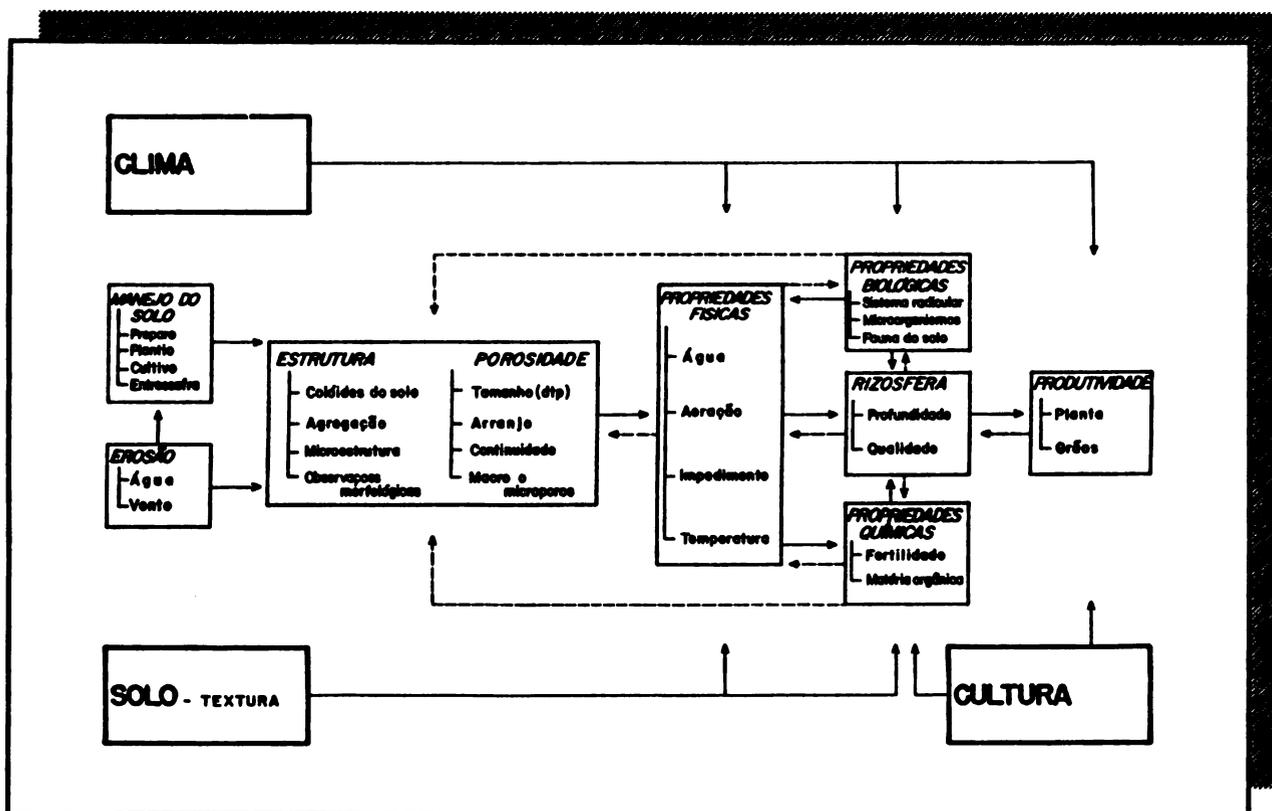


Figura 1. Esquema das interações funcionais envolvendo os efeitos das práticas de manejo na estrutura do solo.

A relação entre a estrutura do solo e outros parâmetros pode ser apresentada pela análise dos processos pedogenéticos, como por exemplo:

- Solos com estrutura estável em grumos apresentam baixa eluviação e elevada permeabilidade.
- Solos com estrutura dispersa, pobres em colóides, apresentam uma permeabilidade média e suscetibilidade à eluviação.
- Solos com estrutura dispersa, ricos em colóides, apresentam baixa permeabilidade e baixa eluviação, consequência da expansão dos colóides na presença de água.

## METODOLOGIAS DE DETERMINAÇÃO

Várias metodologias têm sido desenvolvidas para definir a estrutura do solo. No entanto, é impossível obter uma descrição completa ou um valor absoluto com um só método. Por este motivo, muitos técnicos reconhecem a estrutura do solo através das propriedades correlatas, como densidade, porosidade, permeabilidade, entre outras (Russel, 1949).

Dos vários métodos utilizados para o estudo da condição estrutural, são descritos: a caracterização morfológica a campo, o estudo micromorfológico em laboratório, a determinação da estabilidade, distribuição de tamanho e, densidade de agregados e da dispersão da argila em água. Outros métodos, considerados indiretos, de estudo da condição estrutural podem ser utilizados, tais como: porosidade, densidade do solo, aeração, infiltração, condutividade hidráulica, retenção de água, penetrabilidade, etc. (Low, 1954).

A classificação morfológica da estrutura é feita a campo, a partir da caracterização das unidades estruturais do solo. Essas unidades, ou agregados, são definidas como unidades naturalmente formadas sob o efeito de fatores como o material originário, forças de contração/expansão, animais e raízes, além de processos químicos e físicos de cimentação (Buol et al., 1980).

Os agregados são distintos de outras unidades encontradas no solo, que são (Ranzani, 1969):

- *Torrões* ("clods"): unidades transitórias, formadas por distúrbios como a aração;
- *Fragmentos*: unidades acomodadas por planos temporários, que não persistem após ciclos de umedecimento/secamento.
- *Concreções e nódulos*: unidades fortemente cimentadas por substâncias químicas concentradas.

Segue-se a esta distinção a condição de solos sem estrutura, descrita como grãos simples, quando as partículas de solo não são ligadas entre si, ou maciça, quando as partículas são arranjadas em uma massa coesa.

Em solos agregados a estrutura é classificada morfológicamente segundo a forma, tamanho, arranjo e grau de desenvolvimento dos agregados.

Para descrever a estrutura do solo no campo se propõem a uma avaliação qualitativa, iniciando pela observação da natureza geral da macroestrutura. Para tal, se deve agir no campo durante a observação e a descrição do perfil de modo que a ação de observar a estrutura não venha a promover a sua destruição. Para isso, deve-se procurar calmamente selecionar, separar e distinguir, com os dedos, os agregados.

Uma vez distinta a natureza, observa-se a nitidez da estrutura. Distingue-se assim uma estrutura pouco nítida, nítida ou muito nítida. A seguir observa-se o grau de generalização da estrutura, que pode ser localizada ou generalizada.

Os tipos de estrutura fragmentar são definidos pela forma. A distinção entre os tipos de agregados deve começar pela descrição dos agregados mais aparentes, como segue:

- Forma das faces (planas, curvas ou planas e curvas).
- Forma das arestas (angulares ou subangulares).

- Orientação preferencial de dissociação (orientação segundo um plano horizontal, vertical, ausência de orientação preferencial ou sem dimensões privilegiadas).

Isto permite distinguir os seguintes tipos de estrutura fragmentar:

- *Pequenas placas oblíquas*: as faces são geralmente planas, quase sempre lisas e freqüentemente estriadas; as arestas são agudas; a orientação preferencial é oblíqua (estrutura característica dos horizontes profundos dos vertissolos).
- *Laminar*: as partículas estão arranjadas em torno de um plano horizontal. As unidades estruturais têm aspecto de lâminas de espessura variável, faces planas, e orientação preferencial segundo um plano horizontal.
- *Prismática*: agregados com faces planas, arestas angulares e com orientação preferencial segundo um plano vertical.
- *Colunar*: estrutura prismática com extremidades superiores arredondadas.

- *Em blocos angulares (poliédrica)*: as três dimensões da unidade estrutural são aproximadamente iguais. Agregados apresentam faces numerosas e planas, arestas angulares e sem uma orientação preferencial.
- *Em blocos subangulares*: estrutura em blocos com arestas subangulares.
- *Granular*: apresenta partículas arranjadas em torno de um ponto, como na estrutura em blocos (poliédrica). As faces são curvas, sem arestas, nem orientação preferencial, e são pouco porosos.
- *Em grumos*: os agregados apresentam um conjunto complexo de faces curvas predominantes e de faces planas com superfície irregular, sem orientação preferencial e muito porosos.

Em seguida é determinada a classe de estrutura em função do tamanho das unidades estruturais. O tamanho do agregado é definido pela largura ou espessura, para os tipos alongados ou aplainados, e por uma dimensão média, para os outros tipos de estrutura. Os tipos e classes de estrutura são apresentados no Quadro 1 (Buol et al., 1980; Lemos & Santos, 1982).

Forma e arranjo das unidades estruturais	UNIDADES ARTIFICIAIS		UNIDADES ESTRUTURAIS NATURAIS							
	unidades acomodadas por planos temporários, instáveis	unidades transitórias formadas por distúrbios instáveis	unidades esféricas e poliédricas, com faces curvas e muito angulares e superfícies irregulares, sem orientação preferencial	unidades poliédricas, onde as três dimensões são aproximadamente iguais. Faces numerosas e planas, acomodadas com as unidades vizinhas, sem orientação preferencial	unidades com aspecto de lâminas com faces planas e orientação horizontal	unidades com orientação preferencial segundo um plano vertical. Faces verticais bem definidas				
			muito porosos	pouco porosos	arestas angulares	arestas subangulares	faces planas pouco distintas	faces arredondadas bem distintas		
Tipo	FRAGMENTOS TORÇÕES		EN GRUMOS	GRANULAR	BLOCOS ANGULARES	BLOCOS SUBANGULARES	LAMINAR	PRISMÁTICA	COLUNAR	
Classe (tamanho em mm)	muito pequena < 0,5		muito pequena < 1		muito pequena < 5		muito pequena 0,5 - 4		muito pequena < 10	
	pequena 0,5 - 1	pequena 5 - 10	pequena 1 - 2		pequena 5 - 10		pequena 1 - 2		pequena 10 - 20	
	média 1 - 2	média 10 - 20	média 2 - 5		média 10 - 20		média 2 - 5		média 20 - 50	
	grande 2 - 5	grande 20 - 50	grande 5 - 10		grande 20 - 50		grande 5 - 10		grande 50 - 100	
		muito grande > 50	muito grande > 10		muito grande > 50		muito grande > 10		muito grande > 100	

Quadro 1. Tipos e classes de estrutura.

Por último, é determinado o grau de desenvolvimento, que define a resistência da estrutura, podendo ser fraca, moderada ou forte.

Os agregados definidos anteriormente e que correspondem ao nível mais aparente, podem se reunir em unidades maiores (super) ou subdividir-se em unidades menores (sub). O tipo e tamanho das

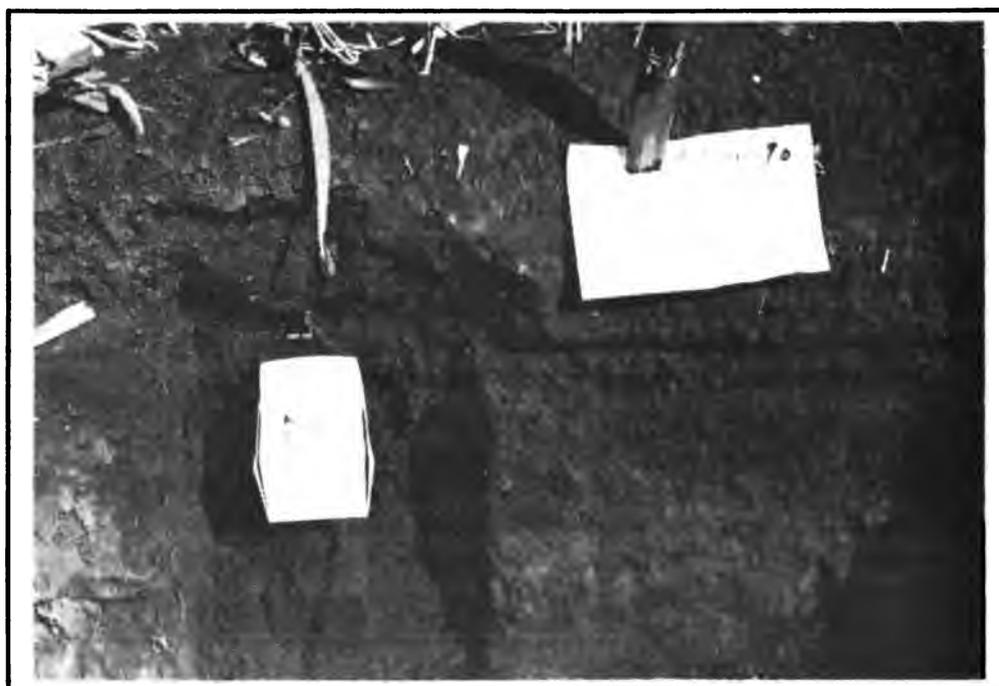
unidades estruturais da super e a sub-estrutura são os mesmos definidos acima. Um exemplo de descrição morfológica da estrutura em um perfil é apresentado no anexo 1.

O estudo micromorfológico do solo inicia-se no campo pela obtenção de amostras indeformadas, acondicionadas em caixetas de Kubiena (Figuras 2 a 4).

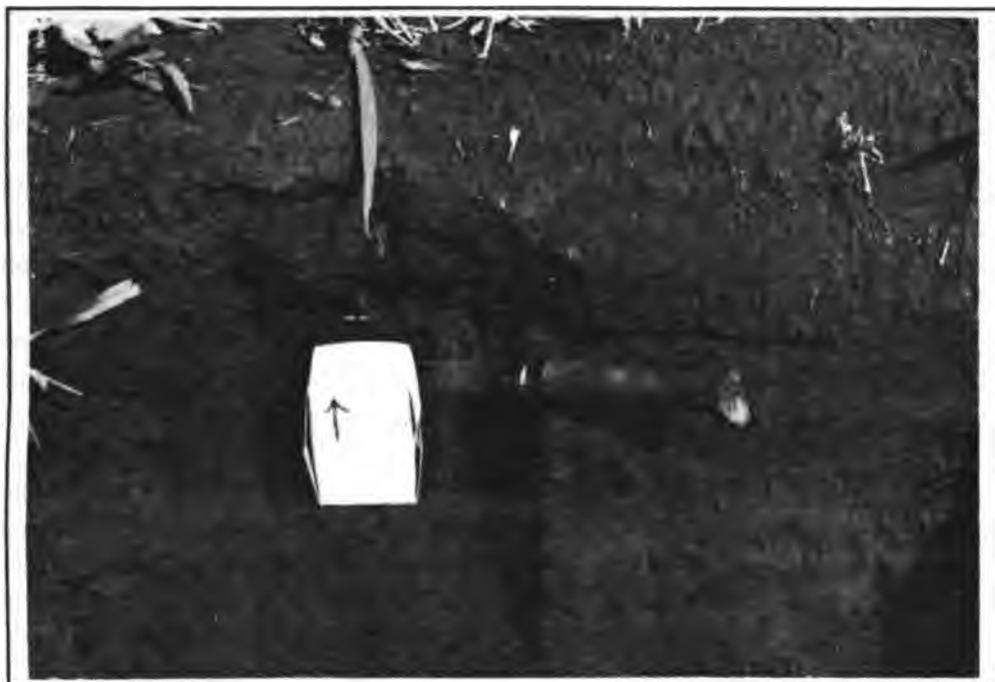


*Figura 2.*

*Estudo micromorfológico do solo: a. separação de um bloco de solo com as dimensões da caixa de Kubiena.*



*Figura 3.*  
*Estudo micromorfológico do solo: b. colocação da parte interna da caixa já orientada.*



*Figura 4.*  
*Estudo micromorfológico do solo: c. retirada do bloco, com a caixeta ajustada, pela parte interna, que será trabalhada para colocação da parte superior da caixeta.*

Em laboratório, estas amostras são secas ao ar, impregnadas a vácuo com resina, e deixadas em repouso para secagem e endurecimento. Após isto as amostras são cortadas e polidas à espessura de aproximadamente 0,3 microns e montadas em lâminas para observação em lupa ou microscópio. O corte do bloco de solo em várias posições permite uma análise tri-dimensional da micro-estrutura e dos vazios (FitzPatrick, 1984).

Os tipos de microestrutura são classificadas segundo a organização das massas de colóides em relação aos grãos. Kubiena (1953) distingue dois tipos fundamentais de microestrutura, designados pelo sufixo *erde* e *lehm*. O primeiro é caracterizado pelo estado floculado dos colóides, apresentando uma ligação íntima da argila e dos óxidos de ferro e alumínio (cor bruna escura e poros numerosos). O segundo corresponde ao estado fundido, onde os óxidos de ferro têm uma tendência a se individualizar em relação à argila, sua cor é ocre ou amarelo-vivo e nota-se a existência de zonas descoloridas, empobrecidas em ferro, geralmente localizadas ao longo das fissuras de retração (Blancaneux, 1985).

Outros tipos de microestrutura caracterizam os horizontes de acumulação e foram descritas

particularmente pelos autores americanos (Soil Survey Staff, 1975), como segue:

- **Microestrutura com revestimento em camadas (clay skin)**

Caracteriza os B texturais, onde o plasma fundido pode ser parcialmente móvel, sendo objeto de migração. O plasma se deposita sob a forma de depósitos sucessivos apresentando zonas escuras (humíferas) ou ferruginosas. As moléculas de argila são orientadas e podem ser observadas no microscópio polarisante; estes revestimentos recobrem a superfície de unidades estruturais, fendas de retração e galerias causadas pelos animais;

- **Microestrutura com revestimentos amorfos**

São as estruturas laminares características dos horizontes de acumulação de alguns podzols. Depósitos coloidais de húmus e de óxidos de ferro e de alumínio cimentam os grãos de areia e acumulam nos vazios. As lâminas orientadas de argila são pouco nítidas neste tipo de microestrutura. As concreções são caracterizadas por uma microestrutura laminar do mesmo tipo, onde os sesquióxidos tomam freqüentemente uma forma cristalina.

#### - Outras microestruturas com revestimentos

Existem microestruturas que não provêm de uma acumulação, mas que dependem de outras causas, como alternâncias de umedecimento e secamento provocando a movimentação e deposição das argilas nas unidades estruturais, seguida de um alisamento destas superfícies por fricção ("slickenside").

Os trabalhos mais recentes sobre microestrutura do solo (Bullock et al., 1985) reconhecem os principais tipos de microestrutura, apresentados no Anexo 2.

A estabilidade de agregados é relacionada com a qualidade estrutural do solo e tem uma relação estreita com a presença de fatores de estabilização, como matéria orgânica, colóides de argila e outros componentes do solo (Harris et al., 1966).

A determinação da estabilidade de agregados avalia a resistência dos agregados ao molhamento e às forças desintegradoras. Quanto menor a estabilidade dos agregados em água, maior ser a suscetibilidade do solo à deterioração estrutural, devido ao impacto de gotas de chuva, à ação dos ventos, à degradação pela ação de ferramentas de preparo e cultivo do solo, ou ao adensamento pela passagem de máquinas agrícolas.

A aplicação de forças desintegradoras, como impacto, abrasão, cizalhamento e aquelas envolvidas no umedecimento, ocorre desde a obtenção da amostra a campo até a determinação propriamente dita (Kemper & Rosenau, 1986). Pelo papel significativo que tem na determinação da estabilidade de agregados, os diversos passos do método são discutidos.

As amostras devem ser coletadas na forma de torrões (Figura 5 a 6) dos horizontes pré-determinados, com umidades pouco abaixo da capacidade de campo. Em laboratório, as amostras são ligeiramente secas ao ar, para eliminar o excesso de umidade, e desagregadas a mão, sem compactar ou esborroar, até passarem em peneira de malha igual ou maior que 8 mm. A amostra é então seca ao ar por 24 horas ou mais e peneirada, visando a obtenção de sub-amostras de tamanho conhecido. O intervalo de tamanho da

sub-amostra a ser submetida ao teste de estabilidade depende do propósito e do método a ser utilizado.

Antes de submeter a sub-amostra ao teste, essa deve sofrer um pré-tratamento a fim de umedecer a amostra. Este pré-tratamento pode ser feito pela imersão da amostra em água, pelo umedecimento sob tensão (capilaridade), por atomização ou por vapor, e pela saturação à vácuo. O primeiro tem sido desaconselhado, já que o umedecimento rápido da amostra pode comprometer sua estabilidade devido ao rompimento dos agregados pela alta pressão interna do ar. O pré-tratamento com atomizador ou com vapor tem sido o mais recomendado por manter a estabilidade da amostra mais próxima daquela encontrada no campo. No caso de solos altamente estáveis, diferenças em estabilidade podem ser detectadas submetendo a amostra ao molhamento rápido por imersão (Kemper & Koch, 1966, citado por Kemper & Rosenau, 1986).

O método mais utilizado é a determinação da distribuição de agregados estáveis em água, inicialmente proposto em 1928 por A.F. Tiulin e modificado por R. E. Yoder em 1936 (Harris et al., 1966; Kemper, 1965 e EMBRAPA, 1979). O método consiste em peneirar uma amostra de solo em um jogo de peneiras de diferentes tamanhos, imersas e agitadas em água, submetendo a um movimento vertical com duração de dois segundos por um determinado período de tempo (de 15 a 30 minutos).

Alguns métodos sugerem o uso de um jogo de peneiras variando de 4 a 0,053 mm. As peneiras de 2 a 0,5 mm são as mais recomendadas. Após o secamento em estufa e pesagem, as frações retidas em cada peneira devem ser dispersadas e novamente peneiradas para determinação do peso de grãos simples, a ser descontado de cada fração.

Um método mais simples e rápido é proposto por Kemper & Koch em 1966 (descrito por Kemper & Rosenau, 1986) utilizando apenas uma peneira de malha de 0,26 mm de abertura, que é agitada em um curso de 1,3 cm com frequência de 35 movimentos/min, onde amostras de agregados no intervalo de 1 a 2 mm são testados. Este método facilita a análise dos dados obtidos.



**Figura 5.**  
*Coleta de amostra em torrões para determinação de estabilidade de agregados, juntamente com coleta de cilindros para densidade.*



**Figura 6.**  
*Acomodação dos torrões em sacos plásticos ou caixas para transporte ao laboratório.*

A forma de aplicar os testes sugeridos e interpretar os resultados é uma decisão do investigador, que deve considerar o fenômeno a ser simulado e o equipamento disponível.

A expressão dos resultados de estabilidade de agregados pode ser feita basicamente por dois índices, que facilita a análise estatística dos resultados (Kemper & Chepil, 1965). São eles:

- **Diâmetro Médio Ponderado (DMP):**

$$DMP = \sum WI \cdot XI$$

onde: WI é a fração da amostra retida em cada classe de peneiras (i) corrigidos para os grãos simples; e, XI é o tamanho médio de cada classe de peneiras.

- **Diâmetro Médio Geométrico (DMG)**

$$DMG = \text{Exp} \frac{\sum (WI \cdot \log (XI))}{\sum WI}$$

onde: WI é o peso seco do solo retido em cada classe de peneiras (i) corrigido para grãos simples; e, XI é o tamanho médio de cada classe de peneiras.

Outra forma de determinação e apresentação do estado de agregação do solo é pela expressão da proporção de agregados retidos em uma determinada peneira. O resultado é expresso em percentagem em peso, após desconto do peso de grãos simples.

Se o princípio destes métodos parece simples, na realidade os resultados obtidos necessitam ser analisados com cautela, por várias razões:

- Os resultados variam em função do estado do solo no momento da análise (época de amostragem, teor de umidade, etc.).
- Variam em função do método utilizado; do meio (concentração), do solvente (água destilada ou não), do tempo e da natureza da agitação, agente utilizado para umedecimento (água, benzeno, álcool, etc.).
- Variam igualmente segundo o experimentador e a maneira como é procedida a manipulação.

- Se faz necessário então definir, para esta análise, um método rigorosamente preciso, que possibilitará a comparação dos resultados obtidos.

A distribuição de tamanho de agregados é relacionada com o fluxo de água, a aeração, o crescimento de raízes, especialmente por sua relação com a macroporosidade. O tamanho dos agregados também é relacionado com a suscetibilidade à erosão, o encrostamento superficial, a difusão de oxigênio e de nutrientes. Sua determinação é feita pela quantidade de agregados retidos em peneiras de malha conhecida após agitação, que pode ser feita em água ou a seco, como segue:

- **Em água**

A mesma metodologia utilizada para medir a estabilidade de agregados em água, pode ser utilizada na determinação do tamanho de agregados, utilizando-se as sub-amostras de tamanho inferior a 4,76, 4,00 ou 2,00 mm. O pré-tratamento deve ser feito em vapor ou com um atomizador.

- **A seco**

Para esta determinação, W.S. Chepil desenvolveu um agitador rotatório para um conjunto de peneiras, como descrito por Kemper & Rosenau (1986) e EMBRAPA (1979). O solo deve ser amostrado com pouca umidade, em profundidades pré-fixadas, evitando-se compressão da amostra ou pulverização pelo ensacamento e transporte. No laboratório a amostra é seca sob condições de umidade e temperatura ambientes. Uma sub-amostra de peso conhecido é transferida para a peneira superior do conjunto de peneira e o equipamento é acionado por um tempo determinado. As frações retidas nas peneiras são então secas em estufa e pesadas. A expressão dos dados pode ser feita pelos índices já descritos (DMP ou DMG).

A densidade de agregados define o estado da microestrutura e da microporosidade do solo e pode ser determinada pela relação peso/volume, com a utilização de substâncias como parafina ou resina

(Blake & Hartge, 1986), ou com o uso de esferas de vidro ("glass beads") (Voorhees et al., 1966). O primeiro utiliza a mesma metodologia preconizada para a densidade do solo com o método do torrão. O segundo consiste em misturar uma amostra de agregados secos ao ar com esferas de vidro de 38 microns em um cilindro de volume conhecido, completando o volume com esferas de vidro e pesando o cilindro. A densidade dos agregados (dag), em gramas/cm<sup>3</sup>, é dada pela expressão:

$$\text{dag} = \frac{\text{Pag}}{\text{Vc} + (\text{Pesf}/\text{desf})}$$

onde: Pag = peso seco dos agregados, em gramas,  
 Vc = volume do cilindro, em cm<sup>3</sup>,  
 desf = densidade das esferas de vidro, em g/cm<sup>3</sup>, determinada no mesmo cilindro e nas mesmas condições do teste de densidade.  
 Pesf = peso das esferas, em g, dado pela expressão:  
 $\text{Pesf} = P(\text{esf} + \text{ag}) - \text{arPag}$   
 onde: arPag é o peso da amostra seca ao ar.

Muitos dos trabalhos realizados sobre densidade do solo se referem, na verdade, ao estado de unidades individuais, ou agregados, construídos artificialmente pela compressão de solo em laboratório. A resistência do solo à penetração de raízes medida nestes trabalhos é, na verdade, mais relacionada com densidade e resistência dos agregados, que a medições a partir de grandes volumes de solo (Rogowski, 1964; citado por Barley & Greacen, 1967).

A argila dispersa em água indica a estabilidade dos micro-agregados e o grau de floculação dos agentes cimentantes no solo. A dispersão da argila é relacionada com a susceptibilidade dos agregados à dispersão pela ação do vento, das gotas de chuva, e a ação de implementos agrícolas, em especial aqueles utilizados no preparo do solo.

Os métodos utilizados na determinação são os mesmos da análise granulométrica, excluindo-se o uso de dispersantes químicos (EMBRAPA, 1979, e Gee & Bauder, 1986), e consistem basicamente na determinação da fração argila (menor que 0,002 mm) através da amostragem de uma alíquota (método de pipeta) ou da determinação da densidade (método do densímetro). O solo utilizado é seco ao ar, peneirado a 2 mm, dispersado em água com agitador elétrico ou rotativo e novamente peneirado para separação da fração areia e agregados acima de 0,053 mm. O tempo de amostragem da fração argila é função da temperatura da solução.

A dispersão da argila em água varia com a metodologia adotada, em especial com a concentração de solo (amostra inicial) na solução e com o método, tempo e condições da agitação da amostra (So & Cook, 1987). Esta dependência obriga a definição e descrição detalhada da metodologia utilizada para discussão e comparação dos resultados obtidos.

A expressão dos resultados pode ser feita pelo teor de argila dispersa em água em uma amostra de solo seco ou pelo grau de dispersão, em função dos teores de argila dispersa em água e argila total no solo.

## POROSIDADE DO SOLO

A porosidade é, por definição, a fração do volume de solo ocupado com água e ar, ou mais especificamente, com a solução e a atmosfera do solo. O comportamento do solo pode ser previsto pela qualificação e quantificação de sua porosidade. As características mais importantes da porosidade são o tamanho, arranjo e a continuidade dos poros.

A porosidade do solo compreende os espaços vazios entre os agregados, ligados por pequenos vazios entre partículas dentro dos agregados. A distribuição por classe de tamanho sugere a classificação da porosidade em duas classes distintas: macro e microporos. Intervalos diferentes para estas duas classes tem sido sugeridos tendo como base o diâmetro equivalente dos poros. São assim considerados microporos, os poros com diâmetros de 0,2 a 30

microns, e macroporos, os poros entre 50 e 300 microns.

Estas classes de poros tem também funções distintas e ocupam posições relativas diferentes no solo (Figura 7). A maior parte da atividade biológica do solo, especialmente o crescimento de raízes, ocorre nos macroporos, os quais são também responsáveis pelo fluxo de água e ar, sendo relacionado com a

infiltração, condutividade e drenagem de água no solo. Microporos, por outro lado, são relacionados com a retenção de água e a difusão de nutrientes no solo, além de comportarem o crescimento de bactérias, fungos, pelos absorventes e pequenas raízes laterais. Isto sugere uma distribuição bimodal, com picos de freqüência para estas duas classes de poros como o requisito mínimo para o crescimento das raízes e a produtividade do solo.

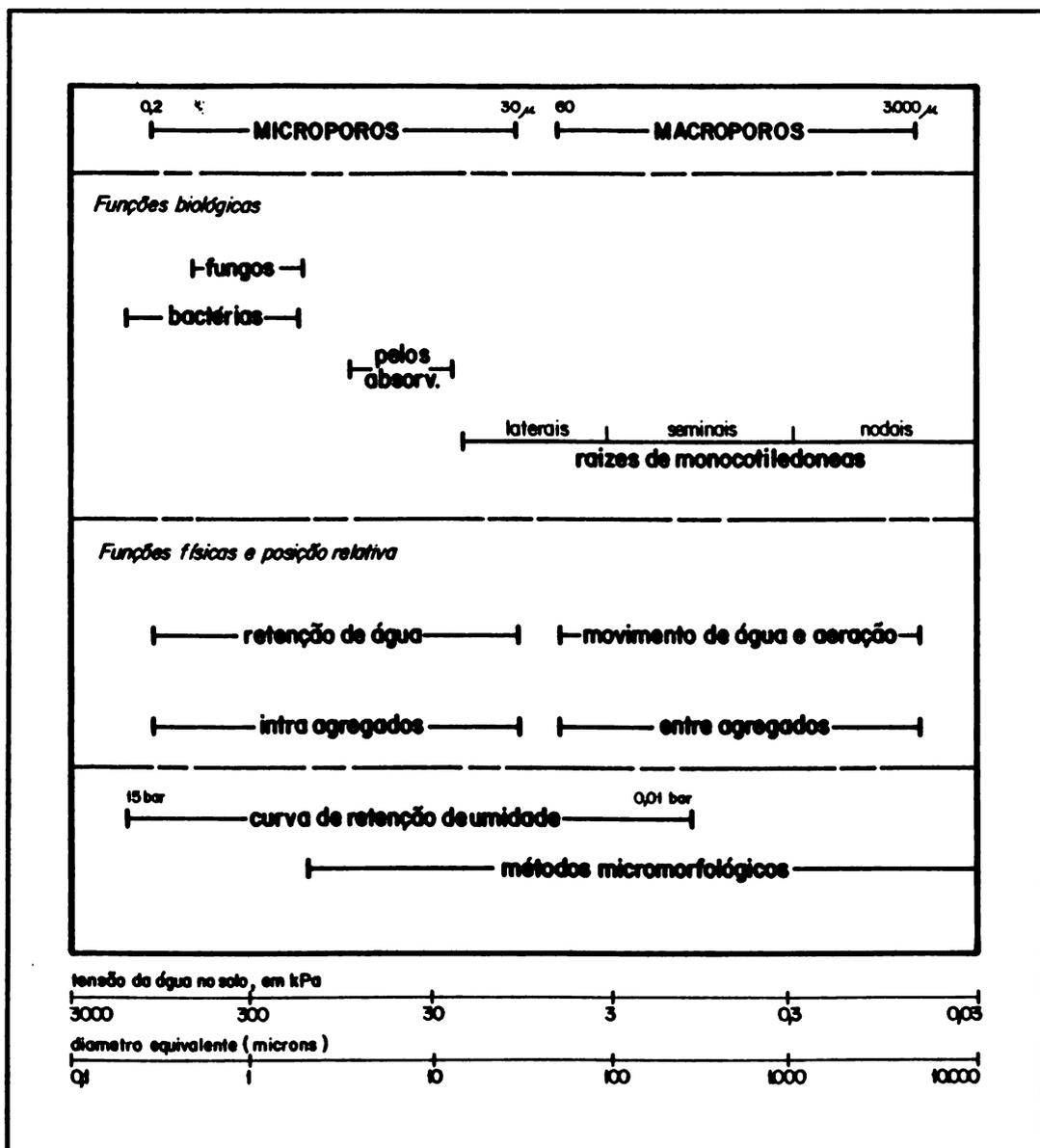


Figura 7. Classificação do espaço poroso do solo, funções biológicas e físicas, posição relativa e métodos de avaliação (baseado em Hamblin, 1985).

Quanto a sua posição relativa, macroporos são espaços entre agregados, originados de vazios que ocorrem quando do arranjo destes ou dos canais feitos por raízes, pequenos animais, forças de expansão/ contração, e pelo cultivo. Microporos são espaços encontrados entre partículas dentro dos agregados e dependem da textura do solo e da densidade dos agregados.

Thomasson (1978) propôs uma classificação similar da porosidade, associando as duas classes de poros com suas principais funções. Na classificação proposta, o autor considerou macroporos como responsáveis pela capacidade de aeração (Ca), onde ocorre o movimento de ar e água. Estes representam poros e fissuras com diâmetro acima de 60 microns, encontradas entre agregados em solos estruturados ou os grande poros entre partículas em solos de textura arenosa. Microporos foram considerados como responsáveis pela água disponível (Ad), os quais suportam o crescimento de plantas em períodos de déficit hídrico e consiste de poros intra-agregados, no intervalo de 0,2 a 60 microns, excluindo assim os poros muito finos. O autor considerou que solos com boas condições estruturais deveriam conter acima de 10 % de Ca e 15 % de Ad.

Diferentes fatores podem influenciar a porosidade. Assim, microporos são altamente susceptíveis à contração por secamento, especialmente no intervalo de 0,01 a 0,2 microns. A contração de microporos significa que o solo está perdendo a capacidade para retenção de água. Macroporos são muito susceptíveis ao cultivo, especialmente em solos sujeitos a forças compactadoras.

A distribuição de tamanho de poros (DTP) é altamente susceptível ao manejo, especialmente os macroporos. Referências sobre efeito do manejo, no entanto, não são consistentes, sendo que o resultado depende do tempo decorrido após a aplicação do tratamento e o período do ano em que as determinações são realizadas. Em um solo arado, por exemplo, mudanças na DTP podem ocorrer durante os dois primeiros meses após o preparo. Por outro lado, mudanças em um solo sob plantio direto tornam-se evidentes apenas após muito anos, dependendo das condições do solo (Hamblin, 1985).

Culturas instaladas também podem interagir com tratamentos de preparo do solo resultando em alterações no solo, tais como a expansão do diâmetro de macroporos e a conseqüente contração de microporos ao redor. Apesar de freqüentemente correlacionada com a textura e a densidade, melhores correlações foram encontradas entre DTP e a estrutura do solo, especialmente com o tamanho, arranjo e estabilidade de agregados.

A continuidade dos poros é outra característica a ser considerada. Os espaços entre agregados só serão efetivos como condutores de fluidos e significantes para plantas se eles forem conectados com outros espaços, formando poros contínuos. Isto é constatado em estudos onde a superfície do solo é arada ou perturbada, resultando na alteração do arranjo de poros. Dois efeitos podem ser observados neste caso: a interrupção física da continuidade vertical dos poros e a ocorrência de porosidade e DTP diferentes entre a camada arável e a camada abaixo. A continuidade de poros pode ser atribuída também a fatores físicos, como processos de contração/expansão, ou a fatores biológicos, como raízes e pequenos animais.

#### - Metodologias de determinação

A distribuição de tamanho de poros (DTP) pode ser determinada considerando os poros do solo como um feixe de tubos capilares, onde a tensão superficial atua na interfase vidro-líquido-ar. Nestes tubos, a altura da elevação do líquido acima da superfície (pressão atmosférica) é inversamente proporcional ao diâmetro do tubo. A altura de elevação do líquido (Hc) no tubo pode ser, desta forma, relacionada ao seu gradiente de pressão (p) e ao diâmetro do tubo (d), da seguinte forma:

$$H_c = \frac{\Delta p}{\gamma} = \frac{\sigma \cos \theta}{\gamma d}$$

onde:  $\gamma$  é o peso específico do líquido,  
 $\sigma$  é a tensão superficial do líquido, em N/m,  
 $d$  é o diâmetro do tubo capilar, em m,  
 $\alpha$  é o ângulo de contato entre o líquido e o tubo.

Esta analogia vem sendo considerada na determinação da DTP a partir da curva de retenção de água no solo. Aplicando uma pressão  $p$  no solo, a água, cuja tensão superficial é igual a 0,073 N/m, a 20°C, e o ângulo de contato é zero, é retida por poros cujo diâmetro é menor que aquele calculado pela equação:

$$d = \frac{300}{\Delta p}$$

onde:  $d$  é o diâmetro dos poros, em microns, e  $\Delta p$  é a pressão aplicada, em kPa.

Cuidados devem ser tomados com a contração da amostra pela aplicação da pressão, que causa a perda de estabilidade dos poros e a consolidação do solo, ainda a pressões tão baixas como 30 kPa. A susceptibilidade da amostra de solo à consolidação é função do conteúdo de argila e sua densidade ou resistência, sendo que a contração pode ocorrer em solos com qualquer conteúdo e tipo de argila (Lawrence, 1977).

Uma outra técnica baseada na analogia descrita é a intrusão de mercúrio, pela qual os diâmetros equivalentes de poros são estimados pela intrusão de volumes conhecidos de mercúrio em uma amostra de solo seco. Esta técnica se utiliza das propriedades do metal, que é um líquido não polar à temperatura ambiente e com um ângulo de contato maior que 90°. A pressão aplicada pode chegar a 400 MPa, permitindo a avaliação de poros tão pequenos quanto 0,01 microns.

A alta pressão necessária para penetração do mercúrio e a necessidade de assumir valores de tensão superficial e ângulo de contato são as principais limitações do método Lawrence (1977).

Um método direto de determinação da DTP e o estudo micromorfológico do solo. Esta técnica, descrita anteriormente, permite o exame e medição direta do volume e da DTP (Bullock et al., 1985).

Para facilitar a observação das lâminas delgadas, técnicas de análise automática de imagens podem ser utilizadas. A técnica consiste em detectar imagens com uma câmera de alta resolução diretamente de um

microscópio ou de fotos de lâminas delgadas. O sinal é codificado e transmitido para um computador, que analisa a imagem recebida a partir de seus contrastes de cor. Os poros podem então ser contados e classificados por área, perímetro ou comprimento. Esta técnica, ainda em desenvolvimento, permite a caracterização da macroporosidade do solo.

A associação de métodos para determinação da porosidade, permite o estudo de poros com diâmetro equivalente variando entre 0,02 microns e 10 mm ou mais, que constitui o intervalo mais importante para a caracterização estrutural do solo. Neste intervalo podem ser utilizados simultaneamente a curva de retenção e o estudo micromorfológico.

As observações morfológicas, macro e microscópicas, devem ser feitas juntamente com a quantificação da porosidade. Tais observações servem para mostrar a maneira pela qual os constituintes estão associados, dando importância às relações mútuas ou as relações com outros constituintes da fase sólida (argila, óxidos, matéria orgânica, etc.). As análises morfológicas permitem igualmente precisar a natureza do espaço poroso (fissuras, vazios, canais, pedotubos, etc.). O conjunto destes resultados permite o entendimento dos diferentes níveis de organização ou o estado estrutural do solo, como, por exemplo, no caso dos latossolos:

- Em uma escala macroscópica (a campo) pode-se observar freqüentemente uma rede de fissuras cuja periodicidade pode ser decimétrica.
- Observando-se com uma lupa, pode-se observar as fissuras que delimitam os elementos estruturais, geralmente na forma de blocos subangulares.
- Na escala da lâmina delgada pode-se identificar a organização microestrutural característica.
- Sob microscópio eletrônico, pode-se observar o resultado do empilhamento dos cristais de argila e óxidos dentro dos macroagregados.

Este conjunto de dados físicos e morfológicos permite definir os grandes tipos de organizações dos solos e permite seguir as variações dessas organizações em relação com o comportamento do solo.

**AGRADECIMENTOS**

*Aos Drs. José Elvir Denardin e Rainoldo A. Kochhann pelo convite para apresentar o presente trabalho. A CNPT/EMBRAPA e ao CIMMYT, na pessoa do Dr. Patrick Wall, que tornaram possível a presença dos autores na reunião. Ao desenhista Marcos Aurélio Gonçalves pela ajuda com as figuras.*

**LITERATURA CITADA**

- BARLEY, K.P. & GREACEN, E.L. 1967. Mechanical resistance as a soil factor influencing the growth of roots and underground shoots. *Ad. Agron.* 19:1-43.
- BLAKE, G.R. & HARTGE, K.H. 1986. Particle density. In: KLUTE, A.K. (ed.). *Methods of soil analysis; part 1 - Physical and mineralogical methods.* 2.ed. Madison, ASA/SSSA. p.337-382. (ASA/SSSA. Agronomy, 9).
- BLANCANEUX, P. 1985. Organisation et comportement hydrologique de deux couvertures pédologiques sur granito-gneiss de la région de Grégoire en Guyane Française. Paris, ORSTOM. 319p. (Tese de Doutorado). T.D.M. 37.
- BULLOCK, P.; FEDOROFF, N.; JONGERIUS, A.; STOOPS, G. & TURSINA, T. 1985. Handbook for soil thin section description. England, Intern. Soc. Soil Sci. & Waine Res. Publications. 152p.
- BUOL, S.W.; HOLE, F.D. & McGRACKEN, R.J. 1980. Soil genesis and classification. 2.ed. Ames, Iowa St. Univ. 406p.
- DUCHAUFOR, P. 1965. Précis de pédologie. 2.ed. Masson, Paris.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos. 1979. Manual de métodos de análise de solo. Rio de Janeiro, EMBRAPA-SNLCS. n.p.
- EMERSON, W.W. 1959. The structure of soil crumbs. *J. Soil Sci.* 10:235-244.
- FITZPATRICK, E.A. 1984. Micromorphology of soils. Londres, Chapman and Hall. 433p.
- FREITAS, P.L. de. 1988. Effects of soil structure on root growth and function. Ithaca, Cornell University. 313p. (Tese de Doutorado).
- GEE, G.W. & BAUDER, J.W. 1986. Particle size analysis. In: KLUTE, A.K. (ed.). *Methods of soil analysis; part 1 - Physical and mineralogical methods.* 2.ed. Madison, ASA/SSSA. p.383-411. (ASA/SSSA. Agronomy, 9).
- HAMBLIN, A.P. 1985. The influence of soil structure on water movement, crop root growth and water uptake. *Ad. Agron.* 38:95-158.
- HARRIS, R.F.; CHESTERS G. & ALLEN, O.N. 1966. Dynamics of soil aggregation. *Ad. Agron.* 18:107-169.
- KEMPER, W.D. 1965. Aggregate stability. In: KLUTE, A.K. (ed.). *Methods of soil analysis; part 1 - Physical and mineralogical methods.* 2.ed. Madison, ASA/SSSA. p.511-519. (ASA/SSSA. Agronomy, 9).
- & CHEPIL, W.S. 1965. Size distribution of aggregates. In: KLUTE, A.K. (ed.). *Methods of soil analysis; part 1 - Physical and mineralogical methods.* 2.ed. Madison, ASA/SSSA. p.499-510. (ASA/SSSA. Agronomy, 9).
- & ROSENAU, R.C. 1986. Aggregate stability and size distribution. In: KLUTE, A.K. (ed.). *Methods of soil analysis; part 1 - Physical and mineralogical methods.* 2.ed. Madison, ASA/SSSA. p.425-442. (ASA/SSSA. Agronomy, 9).
- KUBIENA, W.L. 1953. The soils of Europe; illustrated diagnosis and systematics. London, Edit. Anglaise: Thomas Murby.
- LAWRENCE, G.P. 1977. Measurement of pore sizes in fine-textured soils: a review of existing techniques. *J. Soil Sci.* 28:527-540.
- LEMONS, R.C. de & SANTOS, R.D. dos. 1982. Manual de métodos de trabalho de campo. 2.ed. Campinas, SBCS. 46p.
- LOW, A.J. 1954. The study of soil structure in the field and the laboratory. *J. Soil Sci.* 5:57-78.
- 1972. The effect of cultivation on the structure and other physical characteristics of grassland and arable soils (1945-1970). *J. Soil Sci.* 23:363-380.
- RANZANI, G. 1969. Manual de levantamento de solos. 2.ed. São Paulo, E. Blucker. 167p.
- RUSSELL, M.B. 1949. Methods of measuring soil structure and aeration. *Soil Sci.* 68:25-35.
- SO, H.B. & COOK, G.D. 1987. Measuring dispersion of clay soils. In: *Effects of Management Practices on Soil Physical Properties: WORKSHOP, Queensland, 1987. Proceedings...*, Brisbane, Queensland, Department of Primary Industries. p.102-105.
- SOIL SURVEY STAFF. 1975. Soil taxonomy. Washington, U.S.Govt. Printing Office. 754p. (SCS/USDA. Agric. Handbook, 436).
- THOMASSON, A.J. 1976. Towards an objective classification of soil structure. *J. Soil Sci.* 29:338-346.
- VORHEES, W.B.; ALLMARAS, R.R. & LARSON, W.E. 1966. Porosity of surface soil aggregates at various moisture contents. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 30:163-167.

**Anexo 1. EXEMPLO DE DESCRIÇÃO MORFOLÓGICA DA ESTRUTURA DE UM PERFIL DE SOLO**

**PERFIL: LSG6**  
**CULTURA: FEIJÃO IRRIGADO**  
**LOCAL: Área Experimental - SNLCS/Goiânia**

**TRATAMENTO: GRADE PESADA (Profundidade: 10 cm)**  
**COLETADO POR: P. Blancaceaux; L.T.C. Silva & P.L. de Freitas**  
**DATA: 29 de outubro de 1990**

horizonte:	Ap1	Ap2	ABp
profundidade:	0 - 8 cm;	8 - 28 cm;	28 - 50 cm;
umidade:	ligeiramente úmido;	ligeiramente úmido;	ligeiramente úmido;
cor:	bruno avermelhado escuro (2,5YR 3/4);	vermelho escuro (2,5YR 3/6);	vermelho escuro (2,5R 3/6);
manchas:	sem manchas;	sem manchas;	sem manchas;
matéria orgânica:	diretamente discernível com fragmentos milimétricos de matéria	diretamente discernível com matéria orgânica carbonizada;	não diretamente discernível;
hidróxidos:	em forma difusa no conjunto do horizonte;	em forma difusa no conjunto do horizonte;	em forma difusa no conjunto do horizonte;
elem. grosseiros:	ausentes;	ausentes;	ausentes;
textura:	argila (areia fina de quartzo e mica);	argila (areia fina de quartzo e mica);	argila (areia fina de quartzo e mica);
estrutura:	fragmentar, nítida, generalizada, pequena, em blocos subangulares com sub-estrutura em grumos, fraca;	fragmentar, muito nítida, generalizada, média, em blocos angulares, forte;	fragmentar, muito nítida, generalizada, média, em blocos angulares, sub-estrutura em blocos subangulares, moderada;
porosidade:	material poroso, poros tubulares finos, com tendência de orientação horizontal, sem fissuras;	agregados com numerosos poros, finos, tubulares, com orientação vertical;	material poroso, poros tubulares, sem orientação predominante;
revestimentos argilosos:	delgados de compressão;	poucos;	ausentes;
consistência:	semi-rígida, pouco cimentado, plástico, adesivo, friável, frágil, com revestimento argilosos;	semi-rígida, pouco cimentado, plástico, adesivo, friável, pouco frágil;	semi-rígida, adesivo, plástico friável, frágil, pouco cimentado;
raízes:	numerosas, finas e médias, desviadas horizontalmente no limite inferior do horizonte;	poucas, finas verticais e horizontais, no conjunto do horizonte;	algumas raízes finas localizadas com orientação vertical;
ativ. biol.:	forte;	forte;	média.
obs.:		horizonte mais compacto que o anterior devido ao tratamento;	
transição:	transição muito nítida, ondulada.	transição gradual, ondulada.	

## Anexo 2. PRINCIPAIS TIPOS DE MICROESTRUTURA<sup>1</sup>

### grãos simples

grãos do tamanho de areia, material pequeno ou não fino em espaços intergranulares; grãos soltos ou com contatos parciais.

### single grain structure

### estrutura de grãos unidos (ponte)

grãos do tamanho de areia, unidos por material fino, normalmente argila.

### bridged grain structure

### estrutura de grãos recobertos

grãos do tamanho de areia, recobertos com um filme de material fino.

### pellicular grain structure

### estrutura de grãos com microagregados

grãos do tamanho de areia, entre os quais existem microagregados de material fino.

### intergrain micro-aggregate structure

### estrutura de grãos com poros vesiculares

grãos do tamanho de areia, com várias vesículas, além dos vazios individualizados ("simple packing grains").

### intergrain vesicular pore structure

### estrutura de grãos com canais

grãos do tamanho de areia, interconectados por um sistema de canais.

### intergrain channel structure

### estrutura de grãos compacta

grãos do tamanho de areia, sendo a maioria ligados de tal forma que o padrão dominante dos poros é predominantemente intergrãos.

### compact grain structure

### estrutura com vazios isolados

agregados não separados (compacto). Massa é interrompida por vazios não interconectados e por alguns canais e câmaras.

### vughy structure

### estrutura esponjosa

agregados não separados, com poucos ou nenhum agregado totalmente separado. Frequentes espaços abertos, fortemente conectados.

### spongy structure

### estrutura com canais

agregados não separados; espaços vazios dominantes são canais.

### channel structure

### estrutura em câmaras

agregados não separados; espaços vazios dominantes são câmaras.

### chamber structure

### estrutura vesicular

agregados não separados; espaços vazios dominantes são vesiculares.

### vesicular structure

### estrutura em grumos

agregados mais ou menos arredondados, frequentemente rugosos, não acomodados entre si. Interior dos agregados pode ser composto por grânulos pequenos, mais ou menos unidos.

### crumb structure

### estrutura granular

grânulos são separados por espaços de arranjo composto, não acomodados, contendo poucos ou nenhum espaço vazio ou unidades pequenas reconhecíveis.

### granular structure

<sup>1</sup> Baseado em Bullock, P.; Fedoroff, N.; Jongerius, A.; Stoops, G. & Tursina, T. *Handbook for soil thin section description*. England, ISSS & Waine Res. Publications, 1985.

