

SEÇÃO I - FÍSICA DO SOLO

DISTRIBUIÇÃO DE FREQUÊNCIA DE TAMANHO DA FRAÇÃO AREIA E COMPACIDADE RELATIVA DE SOLOS DESENVOLVIDOS DE SEDIMENTOS DO GRUPO GEOLÓGICO BARREIRAS⁽¹⁾

W. A. P. ABRAHÃO⁽²⁾, L. M. COSTA⁽²⁾, J. W. V. MELLO⁽²⁾ & J. C. L. NEVES⁽²⁾

RESUMO

A condição de adensamento do solo tem importância para orientar o manejo de uma área. Em solos derivados de sedimentos recentes, a propensão ao adensamento pode estar relacionada com as características herdadas das condições de sedimentação. Em uma topossequência de solos desenvolvidos de sedimentos arenosos do grupo geológico Barreiras, no município de Caravelas (BA), selecionaram-se oito perfis de solos, sendo cinco deles sob *Eucalyptus*, abrangendo Gley Pouco Húmico, Podzol Hidromórfico, Podzólico Amarelo e Plintossolo. Foi determinada a densidade aparente, a qual foi posicionada entre a densidade aparente mínima e a máxima, definindo-se, assim, a compactidade relativa para cada um dos 41 horizontes. A areia foi fracionada em 21 classes de tamanho, mediante peneiramento, determinando-se o diâmetro médio, o desvio-padrão gráfico inclusivo, a assimetria gráfica inclusiva e a curtose gráfica. Observou-se que o maior teor de areia fina e mal selecionada facilitou o arranjo mais compacto das partículas, provocando aumento na compactidade relativa nos horizontes de maior resistência à penetração.

Termos de indexação: densidade aparente, distribuição de tamanho de partícula, sedimentologia, compactidade relativa.

SUMMARY: SAND SIZE FREQUENCY DISTRIBUTION AND RELATIVE DENSITY OF SOILS DEVELOPED FROM BARREIRAS GEOLOGICAL GROUP

The packing condition of the soil is important for providing direction for land management. In soils developed from recent sediments, the tendency to packing may be related to inherited characteristics from sedimentation conditions. In a soil topossequence from sandy sediments of Barreiras geological group, in Caravelas city - Bahia, eight soil profiles were selected, five of them from a eucalypt plantation. The soils were allocated in five great groups: Fluvaquent (P1),

⁽¹⁾ Trabalho apresentado na 87^a Reunião Anual da Soc. Americana de Ciência do Solo, St. Louis, Missouri, 1995. Recebido para publicação em outubro de 1996 e aprovado em janeiro de 1998.

⁽²⁾ Professor do Departamento de Solos, Universidade Federal de Viçosa. CEP 36571-000 Viçosa (MG).

Duraquod (P2, P8), Haploorthod (P3), Hapludult (P4, P5, P7) and Plintaquult (P6) according to the 7th approximation of USA soil taxonomy. Soil bulk density was determined in 41 horizons along with minimum and maximum soil bulk densities. Values of soil bulk densities were located between the two other densities, thereby obtaining the relative densities. The sand was subdivided into 21 size classes by standard sieves and the data were used to determine mean size, inclusive graphic standard deviation, inclusive graphic skewness and graphic kurtosis. It was observed that higher fine sand content combined with unsorted sand grains enhanced closer packing of soil particles, inducing increments of relative density in soil horizons more resistant to penetration.

Index terms: bulk density, particle size distribution, sand size, sedimentology, relative density.

INTRODUÇÃO

A expansão da atividade florestal e agrícola no Brasil tem colocado em produção áreas que apresentam limitações para tais usos. A adoção de técnicas convencionais em ambientes propensos ao desequilíbrio pode promover alterações nas características que foram atribuídas originalmente aos processos dinâmicos da gênese do solo.

No Município de Caravelas, sul da Bahia, têm-se observado áreas que apresentam solos com horizontes subsuperficiais adensados que dificultam o aprofundamento de raízes e se tornam alagadas em anos com maior pluviosidade.

Uma das características peculiares dos solos desenvolvidos a partir de sedimentos do grupo geológico Barreiras é o seu adensamento natural. Segundo Hillel (1980), os horizontes, ou mesmo camadas do solo, podem-se tornar naturalmente adensados, como consequência de sua composição textural, seu regime de umidade ou da maneira pela qual foram formados. Solos arenosos, apesar de apresentarem menor tendência à compactação que os argilosos, quando contêm altas proporções de areia fina, são facilmente compactados (Lopes, 1989), o que é, ainda, mais agravado, quando os tamanhos dos grãos de areia apresentam-se mais amplamente distribuídos, levando ao quadro de compactidade máxima mesmo a baixos valores de umidade (Panayiotopoulos & Mullins, 1985). Dessa forma, os estudos das características da distribuição de frequência de tamanho de grãos de areia podem auxiliar na explicação dos fenômenos de adensamento, facilidade de translocação de colóides, retenção de umidade, efeito *mulch* e outras características do solo.

Freqüentemente, tem-se empregado o valor da densidade aparente como avaliador da dificuldade de penetração de raízes, do grau de arejamento e da permeabilidade de horizontes do solo. Entretanto, como a densidade aparente varia, apreciavelmente, com a textura, estrutura, teor de matéria orgânica (Costa, 1985), bem como com o teor e tipo de minerais densos no solo, torna-se difícil comparar, em materiais que diferem nessas propriedades, o grau de adensamento com base apenas na densidade aparente.

Para solos que apresentam maiores teores de argila, Silva et al. (1996) propõem o uso de uma medida de densidade aparente relativa com base na densidade aparente do solo e na densidade aparente máxima conseguida na célula de consolidação de Rowe (Rowe & Barden, 1966); entretanto, para solos arenosos, que se compactam melhor com vibração do que com compressão, propõe-se posicionar a densidade aparente do solo entre os valores de densidade aparente mínima e densidade aparente máxima, seguindo as normas brasileiras para a determinação da compactidade relativa em solos não-coesivos (ABNT, 1990; 1991).

Este trabalho teve por objetivo testar a hipótese de que os solos desenvolvidos em ambientes de sedimentação recente apresentam horizontes adensados, decorrentes da suscetibilidade herdada de características da fração areia e das propriedades sedimentológicas inerentes ao ambiente de sedimentação.

MATERIAL E MÉTODOS

No distrito de Juerana, município de Caravelas (BA), foram selecionados oito perfis, incluindo Podzólicos Amarelos, Podzóis Hidromórficos, Plintossolo e Gley pouco Húmico, em uma toposequência com depressões nas suas extremidades (Figura 1), incluindo solos com horizontes subsuperficiais adensados que foram evidenciados por observações de campo.

O clima da região é tropical úmido sem estação seca (Af), segundo classificação de Köppen. A precipitação média anual é da ordem de 1.750 mm, bem distribuída durante o ano, com desvio pluviométrico médio anual entre 15 e 20% e temperatura média anual de 23°C (Nimer, 1989).

O material de origem dos solos são os sedimentos inconsolidados do Grupo Geológico Barreiras, com predomínio da fração arenosa, onde se destaca o quartzo como mineral dominante, e na fração argila predomina a caulinita, com teores muito baixos de óxido de ferro.

A análise das feições geomorfológicas da região revela a existência de depressões fechadas que estão

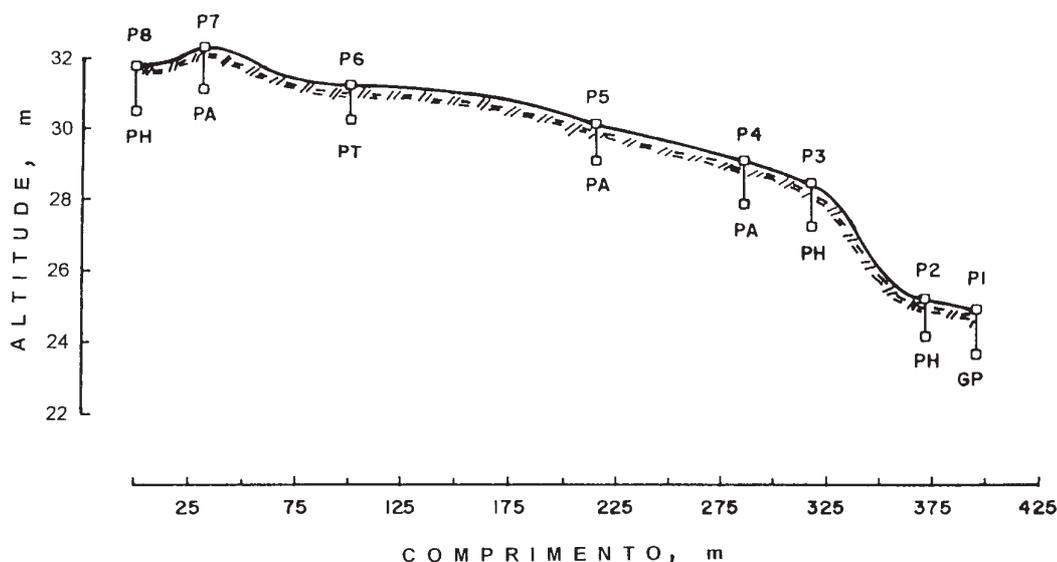


Figura 1. Localização dos perfis na topossequência. PH = Podzol Hidromórfico, PA = Podzólico Amarelo, PT = Plintossolo, GP = Gley pouco Húmico.

associadas à pequena espessura da cobertura de sedimentos cenozóicos sobre estratos de calcário não-aflorantes da Formação Caravelas (Carvalho & Garrido, 1966), exibindo feições denominadas pseudocársticas por IBGE (1987), mas que melhor se enquadram como carste encoberto (Guerra, 1993) ou, ainda, como feições paleocársticas (Oliveira & Spadini, 1994).

Após a abertura das trincheiras, os perfis foram descritos conforme Lemos & Santos (1984) e classificados de acordo com a 3ª aproximação do Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (EMBRAPA, 1988). Em cada um dos horizontes, foram coletadas amostras de solo para as seguintes análises:

Carbono orgânico - Determinado pelo método Walkley-Black (EMBRAPA, 1979).

Análise textural - Os teores das frações argila, silte e areia foram determinados, usando o método da pipeta com concentração de $0,01 \text{ mol dm}^{-3}$ de NaOH na proveta de sedimentação, conforme EMBRAPA (1979).

Distribuição de frequência de tamanho de grãos da fração areia - A partir de 100 g de material de solo, procedeu-se à desagregação física mediante movimentos leves, com pistilo de madeira, de forma a não quebrar os grãos de areia, seguida de dispersão com NaOH $0,1 \text{ mol dm}^{-3}$. Após sucessivas repetições do processo, obtiveram-se amostras de areia lavada de cada horizonte estudado. Essa areia, após secagem, foi pesada e passada por um conjunto de 22 peneiras, de diâmetros de malha que variaram de 0,053 a 2 mm. Cada conjunto de seis peneiras foi agitado mecanicamente por dois períodos de 180 segundos cada, intercalados por agitação manual de 90 segundos (Suguio, 1973). A areia retida em cada uma das peneiras, exceto na de 2 mm, foi pesada, sendo

calculadas as frequências simples e a acumulada, correspondentes a cada peneira. O diâmetro (D), em milímetro, correspondente a cada peneira, foi transformado para a escala ϕ (phi) de Krumbein (1934), em que $\phi = -\log_2 D(\text{mm})$.

Para obtenção dos valores de ϕ correspondentes aos percentis utilizados nas fórmulas de cálculo dos parâmetros estatísticos, propostos por Folk & Ward (1957), preferiu-se fazer interpolações com base em equações de regressão linear que envolviam dois pontos, entre os quais está o percentil de interesse, reproduzindo, assim, algebricamente, o que seria o processo gráfico. Com esses valores, calcularam-se o diâmetro médio (Mz), o desvio-padrão gráfico inclusivo (σ_I), a assimetria gráfica inclusiva (SK_I) e a curtose gráfica (KG), a partir das fórmulas apresentadas no quadro 1.

Densidade aparente do solo (Da) - Determinada pelo método do anel volumétrico (50 cm^3) e, nos horizontes cimentados dos perfis P2 e P8, determinada pelo método do torrão parafinado (EMBRAPA, 1979).

Densidade aparente mínima (Dmin) - Foi determinada conforme adaptação da norma brasileira MB-3324 (ABNT, 1990) aplicável a solos não-coesivos. Cerca de 300 g de material de solo não peneirado foram secos ao ar e tiveram a umidade higroscópica determinada. Após homogeneização, verteu-se, manualmente, por meio de um funil, o material em um molde cilíndrico de $97,63 \text{ cm}^3$, com movimentos em espiral e em fluxo constante, de forma a obter um depósito com camadas de espessura uniforme e o mais solto possível. A altura de queda, em relação ao topo do material depositado, foi de, aproximadamente, 1 cm. Com esse processo, preencheu-se o molde, tendo sido deixado um excesso de 1 a 2 cm acima da borda, que, em seguida, foi removido com uma espátula,

tomando o cuidado de não provocar rearranjo das partículas. Após esse procedimento, o conjunto foi pesado, sendo determinada a sua massa. Em seguida, vertia-se o material no saco plástico, o qual continha outra porção da mesma amostra, homogeneizava-se o material e procedia-se à próxima repetição para cada um dos horizontes estudados. Com o peso médio de cinco repetições, pôde-se calcular a densidade aparente mínima (D_{min}), de acordo com a equação:

$$D_{min} (\text{kg dm}^{-3}) = \frac{\text{massa de solo solto (kg)}}{\text{volume do molde (dm}^3)}$$

Densidade aparente máxima (D_{max}) - Seguindo uma adaptação da norma brasileira MB-3308 (ABNT, 1991), que normatiza a determinação de índice de vazios mínimos de solos não-coesivos, procedeu-se ao ensaio para obtenção dos valores de densidade aparente máxima dos materiais de solo. Reutilizando as amostras usadas para a determinação de D_{min} , preencheu-se o molde em três camadas, cada uma de, aproximadamente, 3 cm de espessura, tendo sido colocado sobre cada camada um peso de 510 g, correspondendo aos mesmos 5,025 kPa de pressão usados por Larios (1994), em seus estudos de compactação de areia. O conjunto foi submetido a um vibrador de peneiras por, aproximadamente, 30 segundos, por camada adicionada. Uma vez preenchido todo o cilindro, eliminou-se o excesso e, em seguida, pesou-se o conjunto para obter o valor da massa de solo submetida à compactação que preenchia o volume do molde. Com tais valores, foi possível obter a densidade aparente máxima (D_{max}), por meio da equação:

$$D_{max} (\text{kg dm}^{-3}) = \frac{\text{massa de solo compactado (kg)}}{\text{volume do molde (dm}^3)}$$

Compacidade Relativa - Com o propósito de avaliar o posicionamento da densidade aparente do solo em relação à D_{min} e D_{max} , calculou-se a compacidade relativa, conforme a equação proposta na norma brasileira MB-3388 (ABNT, 1991):

$$CR = \frac{D_{max} (D_a - D_{min})}{D_a (D_{max} - D_{min})} \times 100,$$

em que

CR = compacidade relativa (%);

D_a = densidade aparente (kg cm^{-3});

D_{max} = densidade aparente máxima (kg cm^{-3}) e

D_{min} = densidade aparente mínima (kg cm^{-3}).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Ao longo de cada perfil, observa-se que as variações nos valores de D_a correspondem a variações em igual sentido de D_{min} e D_{max} para cada um dos horizontes estudados (Quadro 2). Isto sugere estarem variando em função das mesmas propriedades do solo que possam afetar seus valores, tais como teor de matéria orgânica, textura, agregação e outras, já apontadas por Costa (1985). Assim, essas expressões da densidade do solo podem ser inter-relacionadas, gerando a compacidade relativa (CR), que, por ser uma grandeza expressa em valores relativos, isola os efeitos de outras características do solo, permitindo, assim, comparar densidades entre solos diferentes.

Em observações de campo constatou-se maior resistência à penetração a cerca de 35 a 45 cm de profundidade. Essas porções do solo com maior resistência coincidiram com o topo dos horizontes B,

Quadro 1. Medidas estatísticas da distribuição de frequência e respectivas fórmulas de cálculo (Folk & Ward, 1957)

Diâmetro médio	$M_z = \frac{\phi_{16} + \phi_{50} + \phi_{84}}{3}$
Desvio-padrão gráfico inclusivo	$\sigma_I = \frac{\phi_{84} - \phi_{16}}{4} + \frac{\phi_{95} - \phi_5}{6,6}$
Assimetria gráfica inclusiva	$SK_I = \frac{\phi_{16} + \phi_{84} - 2\phi_{50}}{2(\phi_{84} - \phi_{16})} + \frac{\phi_5 + \phi_{95} - 2\phi_{50}}{2(\phi_{95} - \phi_5)}$
Curtose gráfica	$KG = \frac{\phi_{95} - \phi_5}{2,44(\phi_{75} - \phi_{25})}$

$\phi_5, \phi_{16}, \phi_{25}, \phi_{50}, \phi_{75}, \phi_{84}, \phi_{95}$ são os valores dos diâmetros em escala ϕ , obtidos na curva de frequência acumulada, correspondentes aos percentis de 5, 16, 25, 50, 75, 84 e 95%, respectivamente.

Quadro 2. Carbono orgânico, granulometria, densidade aparente (Da), densidade mínima (Dmin), densidade máxima (Dmax) e compactidade relativa (CR)

Perfil	Horizonte	Profundidade	C orgânico	Areia		Silte	Argila	D min	Da	D max	CR
				Grossa	Fina						
		cm	g kg ⁻¹				kg dm ⁻³				
P1	Ag1	0-10	22,6	720	140	40	100	1,28	1,29	1,51	4,62
	Ag2	10-20	9,2	670	190	40	100	1,33	1,40	1,58	32,46
	Abg	20-29	10,7	600	200	40	160	1,24	1,36	1,46	58,22
	Bag	29-44	9,4	490	200	40	270	1,16	1,38	1,43	83,26
	Big	44-78	6,0	460	190	30	320	1,20	1,38	1,49	65,33
	Cg	78-140+	3,9	480	180	30	310	1,21	1,41	1,55	64,36
P2	A1	0-20	30,8	830	110	30	30	1,30	1,32	1,57	7,55
	A2	20-33	10,6	890	80	10	20	1,49	1,48	1,73	-4,21
	E	33-86	1,0	740	200	40	20	1,66	1,67	1,92	3,61
	Bh	86-93	5,1	690	210	30	70	1,51	1,78	1,86	80,09
	Bsm	93-104+	51,8	710	170	10	110	0,97	1,66	1,35	148,00
P3	Ap	0-12	14,4	650	210	40	100	1,34	1,33	1,65	-6,47
	2Ab	12-21	7,8	770	160	20	50	1,47	1,45	1,78	-8,42
	2E	21-44	5,5	720	200	20	60	1,48	1,47	1,77	-6,44
	2Bh	44-66	23,2	650	230	40	80	1,20	1,19	1,43	-8,75
	2C1	66-102	7,2	680	250	30	40	1,45	1,44	1,67	-5,11
	2C2	102-121+	2,5	700	230	30	40	1,55	1,54	1,76	-5,13
P4	Ap	0-11	17,6	750	160	20	70	1,38	1,36	1,68	-7,98
	A2	11-21	12,5	720	170	30	80	1,36	1,36	1,65	1,45
	Bt1	21-36	14,8	590	230	30	150	1,26	1,29	1,52	13,60
	Bt2	36-94	10,7	610	250	30	110	1,20	1,22	1,47	8,04
	BC	94-125+	12,9	640	260	30	70	1,16	1,14	1,43	-5,69
P5	Ap	0-17	3,5	760	190	10	40	1,48	1,48	1,81	-0,12
	AB	17-35	3,3	720	200	20	60	1,44	1,52	1,79	28,12
	Bt1	35-63	4,1	560	230	40	170	1,28	1,45	1,62	55,35
	Bt2	63-110+	2,0	500	170	30	300	1,18	1,26	1,54	26,37
P6	Ap	0-15	2,6	780	170	10	40	1,46	1,45	1,80	-6,59
	A2	15-30	0,8	720	230	20	30	1,53	1,62	1,85	32,17
	E	30-45	2,6	700	240	10	50	1,56	1,65	1,91	31,08
	Btg	45-51	4,3	610	240	50	100	1,34	1,58	1,69	74,26
	Bf	51-103+	4,9	410	200	60	330	1,11	1,34	1,44	75,09
P7	Ap	0-12	5,9	760	180	20	40	1,41	1,39	1,77	-5,90
	A2	12-23	5,3	700	210	30	60	1,42	1,40	1,78	-6,54
	AB	23-43/56	6,6	640	230	20	110	1,32	1,31	1,63	-7,41
	Bt	43/56-117+	2,7	530	250	30	190	1,24	1,30	1,56	20,38
P8	Ap	0-20	16,0	790	160	20	30	1,44	1,42	1,75	-9,21
	A2	20-33	4,7	780	180	20	20	1,59	1,58	1,86	-7,66
	E1	33-112	1,0	750	220	10	20	1,66	1,65	1,93	-5,85
	E2	112-128	3,9	690	260	20	30	1,68	1,67	1,97	-4,31
	Bh	128-132	32,6	640	230	40	90	1,36	1,55	1,66	66,54
	Bsmz	132-139+	33,2	650	190	40	120	1,10	1,61	1,36	164,53

P1 - Gley pouco Húmico; P2, P3 e P8 - Podzol Hidromórfico; P4, P5, P7 - Podzólico Amarelo; P6 - Plintossolo.

na maioria dos perfis, com exceção dos perfis P2 e P8, em que a porção mais resistente se encontrava a uma profundidade que não podia ser avaliada com o penetrômetro. Observa-se, no quadro 2, que a compactidade relativa foi mais sensível na detecção dessas porções de solo com maior resistência à penetração do que a densidade aparente. Isto demonstra que o aumento do teor de argila observado nessas porções e o conseqüente aumento da microporosidade estariam reduzindo o valor da Da

justamente onde a resistência à penetração é maior do que nos horizontes mais arenosos, mascarando, assim, sua correlação com a resistência do solo à penetração. Considerando que, em solos derivados de sedimentos arenosos recentes, há pouco desenvolvimento de estrutura, o aumento de microporosidade, atribuído ao aumento de argila, reflete na diminuição de macroporosidade, chegando a limitar o crescimento radicular, conforme já constatado por Meredith & Patrick Jr. (1961).

Ainda no quadro 2, observam-se valores negativos de CR, que são atribuídos a dificuldades metodológicas acentuadas pela presença de fragmentos de raízes nas amostras retiradas para a determinação de D_a , sendo mais freqüentes, portanto, nos horizontes superficiais. Como para a determinação de D_{min} a presença de raízes impossibilitaria a passagem do material pelo funil, a menos que fossem trituradas, essas raízes foram retiradas, acarretando valores de D_{min} maiores, porém não mais do que dois centésimos, que D_a .

Os valores de CR maiores que 100%, observados nos horizontes cimentados Bsm dos perfis P2 e P8, são atribuídos, em parte, à impossibilidade de coleta de amostra para a determinação de densidade aparente com anel volumétrico, tendo de ser feita pelo método do torrão parafinado, o qual superestima a densidade desses horizontes (Blake & Hartge, 1986), em comparação com o método do anel utilizado nos outros horizontes.

Pelo fato de não ter sido utilizada a mesma amostra na determinação de D_a , em D_{max} e D_{min} , essas pequenas distorções metodológicas acarretaram nesses resultados aparente incoerência, mas que podem estar refletindo a sensibilidade da grandeza relativa, e em nada prejudicou a análise da tendência geral dos dados. Para a melhoria dessa técnica, poder-se-ia recomendar a retirada de cinco ou mais amostras para determinação de densidade aparente, com anel de 50 cm³, as quais, depois de secas em estufa e pesadas, seriam misturadas e submetidas à determinação de D_{min} e, em seguida, de D_{max} , em moldes de 100 cm³.

No quadro 3 e na figura 2, observa-se que o aumento da CR em profundidade ocorre mais nitidamente nos perfis associados às posições deprimidas na paisagem (P1, P2, P8) e na borda de depressões (P6) (Figura 1). Visto que outros autores fazem referência às características dos solos sobre o grupo Barreiras e à posição na paisagem (Jacomine, 1974; UFV, 1984), procurou-se detalhar a distribuição granulométrica da fração areia para pesquisar a respeito do ambiente de deposição e relacionar esses parâmetros sedimentológicos com o arranjo das partículas que possibilitam maior compactação relativa.

As características da distribuição de freqüência de tamanho de partículas têm sido empregadas em estudos de evolução pedogenética de horizontes do solo, principalmente os derivados de material sedimentar (Tremocoldi & Steinhardt, 1987 e Rueda & Demattê, 1988), e, mais especificamente, no detalhamento da fração areia, por considerá-la de menor mobilidade por causa dos processos pedogenéticos, refletindo as condições originais de sedimentação (Clemente et al., 1986)

Além da forma, a distribuição de freqüência do tamanho das partículas do solo pode propiciar-lhe um arranjo mais compacto. As características dessa distribuição de freqüência podem ser avaliadas por medidas estatísticas de tendência central, de

dispersão, de assimetria e de curtose. Tais medidas correlacionaram-se com a compactação relativa (CR) dos perfis dos solos estudados (Quadro 4). A melhor correlação foi observada entre CR e o desvio-padrão gráfico inclusivo (σ_I) e curtose gráfica (KG), quando foram considerados todos os horizontes estudados. Isto confirma a hipótese de que, quanto maior a dispersão dos tamanhos de partículas da fração areia em torno da média (maior σ_I) e menor concentração em torno dos valores centrais em relação aos extremos da distribuição de freqüência (menor KG), mais compacto será o arranjo das partículas de areia, o que permite melhor retenção de argila contra forças de erosão diferencial em horizontes superficiais ou propicia uma barreira à movimentação de argila eluviada de horizontes superiores.

Observando as correlações em cada um dos perfis, verifica-se que a curtose gráfica, embora com elevada significância no conjunto dos perfis, somente apresenta correlação significativa ($p < 0,1$) no perfil P8. Embora o menor valor de KG indique maior estado de adensamento, traduzido pelo sinal negativo da correlação com CR, a baixa significância estatística confirma a proposição apontada por Resende et al. (1992) de que um parâmetro estatístico baseado no quarto momento em relação à média talvez seja de um grau de refinamento um tanto apurado para a análise do comportamento físico do solo, carecendo de mais estudos.

Comportamento diferente foi observado para σ_I , que, nos perfis localizados nas depressões (P1, P2, P6 e P8), apresentou correlações significativas com CR, demonstrando que a desuniformidade de tamanho de partículas, em relação à média, está relacionada com a parada, ou com a dificuldade de saída, de material mais fino dos horizontes com maior CR.

A movimentação de partículas dentro da massa de solo é facilitada pelo afrouxamento desta massa que traduz certo grau de fluidez. Dessa forma, é de se esperar que para cada grau de arranjo, expresso pelas características da distribuição de freqüência de partículas, exista um valor de compactação relativa crítica, quando essa massa estiver submetida a uma carga estática promovida pelo peso do material sobrejacente. Kramer & Seed (1988) observaram, nas suas condições de estudo, que massas arenosas apresentavam-se com maior fluidez e, portanto, com maior mobilidade, quando submetidas a carregamentos estáticos e moldadas com CR menores que 44%.

Como os horizontes superficiais são mais soltos em razão da menor carga exercida pelo material sobrejacente, mesmo se os valores de CR fossem elevados, decorrentes da má seletividade da deposição original (maior σ_I), a maior mobilidade da massa arenosa permitiria, já por processos pedogenéticos, uma erosão seletiva ou mesmo eluição de material fino nos horizontes superficiais. Esse raciocínio pode estar respaldado pela identificação de maior tamanho e grau de seleção nas partículas dos horizontes superficiais, bem como sensível aumento de CR nas transições A-Bt e E-Bt (Quadro 3).

Quadro 3. Valores de compacidade relativa (CR) e de medidas estatísticas da distribuição de frequência de tamanho de partículas da fração areia dos solos estudados

Perfil	Horizonte	Profundidade cm	CR %	Mz	σ_1	SK ₁	KG
P1	Ag1	0-10	4,62	1,5063	1,0443	0,0482	0,8911
	Ag2	10-20	32,46	1,4250	1,0998	0,0490	0,8356
	ABg	20-29	58,22	1,3913	1,1614	0,0646	0,8645
	BAG	29-44	83,26	1,5120	1,2231	0,0090	0,8597
	Big	44-78	65,33	1,4620	1,2738	0,0084	0,8087
	Cg	78-140+	64,36	1,3907	1,2409	0,0696	0,8374
P2	A1	0-20	7,55	1,1763	1,0253	0,2041	0,9818
	A2	20-33	-4,21	0,8743	0,8373	0,2395	1,0682
	E	33-86	3,61	1,2447	1,2092	0,1698	0,8230
	Bh	86-93	80,09	1,2557	1,2368	0,1653	0,8744
	Bsm	93-104+	148,00	1,4053	1,2918	0,2602	0,7990
P3	Ap	0-12	-6,47	1,4523	1,1242	0,1391	0,9364
	2Ab	12-21	-8,42	1,3270	0,9120	0,1668	1,0048
	2E	21-44	-6,44	1,5620	1,0376	0,0683	0,9133
	2Bh	44-66	-8,75	1,5007	1,1361	0,0959	0,8796
	2C1	66-102	-5,11	1,5000	1,1280	0,0823	0,8928
	2C2	102-121+	-5,13	1,4810	1,1160	0,0828	0,8801
P4	Ap	0-11	-7,98	1,2510	0,9749	0,1403	0,9597
	A2	11-21	1,45	1,2797	1,0164	0,1301	0,9471
	Bt1	21-36	13,60	1,5127	1,1064	0,0655	0,8996
	Bt2	36-94	8,04	1,5740	1,1954	0,0040	0,8430
	BC	94-125+	-5,69	1,4390	1,1834	0,1058	0,8417
P5	Ap	0-17	-0,12	1,3030	1,1042	0,1610	0,8913
	AB	17-35	28,12	1,3667	1,1185	0,1099	0,8744
	Bt1	35-63	55,35	1,5890	1,1737	-0,0205	0,8708
	Bt2	63-110+	26,37	1,5180	1,1935	0,0476	0,8591
P6	Ap	0-15	-6,59	1,5040	1,0490	0,0704	0,9005
	A2	15-30	32,17	1,5650	1,0704	0,0410	0,8966
	E	30-45	31,08	1,6203	1,1486	-0,0125	0,8495
	Btg	45-51	74,26	1,6280	1,1610	-0,0853	0,8552
	Bf	51-103+	75,09	1,7003	1,1789	-0,0430	0,8844
P7	Ap	0-12	-5,90	1,5293	1,0191	0,0637	0,9026
	A2	12-23	-6,54	1,5057	1,0804	0,0566	0,8443
	AB	23-43/56	-7,41	1,5633	1,0908	0,0239	0,8680
	Bt	43/56-117+	20,38	1,6587	1,1354	0,0084	0,8950
P8	Ap	0-20	-9,21	1,5297	0,9993	0,0915	0,9227
	A2	20-33	-7,66	1,5490	1,0240	0,0640	0,9291
	E1	33-112	-5,85	1,4857	1,0732	0,0118	0,9255
	E2	112-128	-4,31	1,6457	1,1237	-0,0250	0,8346
	Bh	128-132	66,54	1,4653	1,2115	0,0678	0,7972
	Bsm	132 - 139 +	164,53	1,5743	1,2173	0,0366	0,8131

Diâmetro médio na escala ϕ (Mz), desvio-padrão gráfico inclusivo (σ_1), assimetria gráfica inclusiva (SK₁) e curtose gráfica (KG).

P1 - Gley pouco Húmico; P2, P3 e P8 - Podzol Hidromórfico; P4, P5, P7 - Podzólico Amarelo; P6 - Plintossolo.

Embora não esteja clara a ordem de importância de cada um dos parâmetros sedimentológicos que influem na compacidade relativa dos horizontes estudados, observa-se que, em alguns casos, apesar de apresentar maior grau de dispersão (maior σ_1), o aumento do tamanho das partículas (menor Mz) parece determinante em dificultar o empacotamento, conforme observado nos horizontes Big e Cg de P1, A2 de P2, BC de P4 e Bt2 de P5 (Quadro 3 e Figura 2).

A assimetria gráfica inclusiva (SK₁), que avalia o afastamento da distribuição de frequência em relação à curva normal, correlacionou-se negativamente com CR em todos os perfis, embora com significância ($p < 0,1$) apenas nos perfis P4, P5 e P6. Apesar da baixa significância estatística, é de se considerar a tendência que aponta o sinal da correlação, uma vez que não se conhecem, na literatura, os fatores que deveriam ser isolados para estabelecer um nível de significância

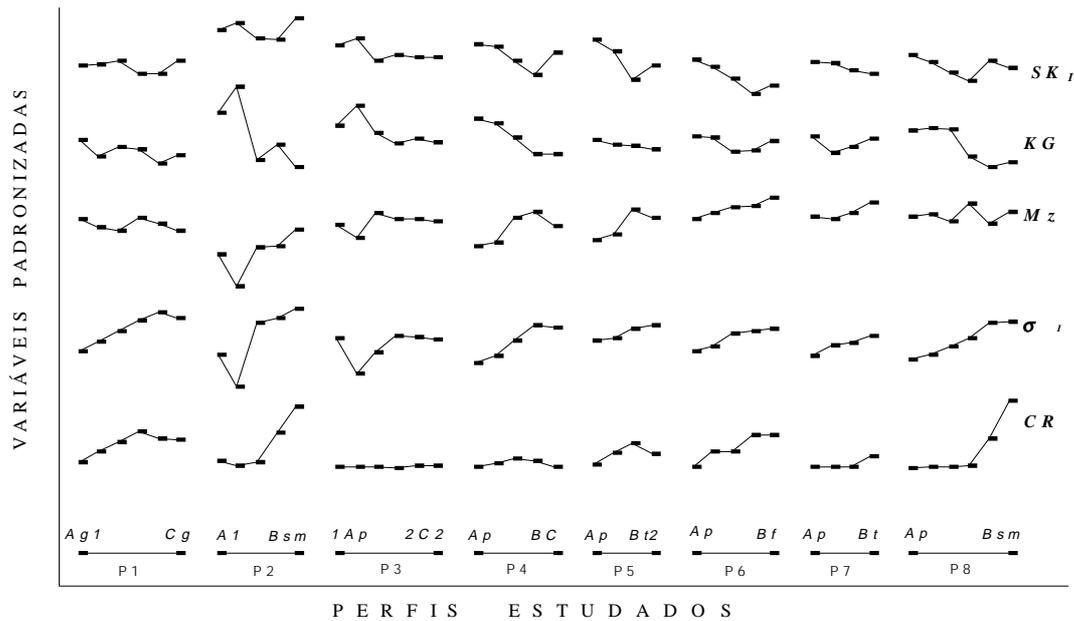


Figura 2. Compacidade relativa (*CR*) e medidas estatísticas da distribuição de frequência (desvio-padrão gráfico inclusivo (σ_I), diâmetro médio na escala ϕ (*Mz*), curtose gráfica (*KG*), e assimetria gráfica inclusiva (*SK_I*)) de tamanho de partículas da fração areia de cada um dos horizontes dos perfis (*P_i*) estudados. Da esquerda para a direita, para cada perfil, seqüência do horizonte mais superficial ao mais profundo. Para a comparação visual, os valores de cada variável (Quadro 3) receberam padronização de Student [($x_i - m$)/ σ], acrescidos de um valor inteiro constante de maneira a destacá-los das oscilações em torno da média igual a zero e desvio-padrão unitário causadas pela padronização. P1 - Gley Pouco Húmido; P2, P3 e P8 - Podzol Hidromórfico; P4, P5 e P7 - Podzólico Amarelo; P6 - Plintossolo.

Quadro 4. Correlações de Pearson entre medidas estatísticas da distribuição de frequência de tamanho de partículas da fração areia⁽¹⁾ e a compacidade relativa (*CR*)

	Amostras	<i>Mz</i>	σ_I	<i>SK_I</i>	<i>KG</i>
Todos perfis	41	0,145	0,665***	-0,115	-0,534***
P1	6	-0,155	0,897**	-0,379	-0,494
P2	5	0,741 ^o	0,721 ^o	0,368	-0,655
P3	6	0,434	0,443	-0,532	-0,446
P4	5	0,702 ^o	0,364	-0,717 ^o	-0,258
P5	4	0,869 ^o	0,637	-0,934*	-0,607
P6	5	0,894*	0,867*	-0,916*	-0,461
P7	4	0,924*	0,723	-0,723	0,459
P8	6	0,011	0,816*	0,057	-0,707 ^o

⁽¹⁾ Diâmetro médio na escala ϕ (*Mz*), desvio-padrão gráfico inclusivo (σ_I), assimetria gráfica inclusiva (*SK_I*) e curtose gráfica (*KG*). *** = 0,1%, ** = 1%, * = 5%, ^o = 10% de significância.

entre tais variáveis. Dessa forma, a correlação negativa indica que, quanto menor for o valor de *SK_I*, maior a quantidade de material fino na amostra, reforçando o efeito de maior *Mz* no aumento da *CR*.

Maior nível de detalhamento nas explicações a respeito dos efeitos das características de distribuição das partículas na compacidade relativa do solo, ou sedimento, poderia ser conseguido, caso fossem estudadas toposseqüências semelhantes, uma vez que, no presente trabalho, as tendências parecem

confirmar a hipótese de que o tamanho e o grau de dispersão influenciam o empacotamento avaliado pela compacidade relativa, destacadamente no caso do perfil P6, que apresentou aumentos, com a profundidade, do teor de argila, da compacidade relativa, de *Mz* (menor diâmetro em mm), da dispersão em tamanho de partícula (maior σ_I) e da quantidade de areia fina (menor *SK_I*), (Quadro 3 e Figura 2).

CONCLUSÕES

1. A compacidade relativa mostra-se como uma variável mais adequada do que a densidade aparente para avaliar e comparar a resistência à penetração do solo, merecendo mais estudos comparativos entre solos de diferentes características, na tentativa de conseguir uma variável numérica que melhor reflita essa resistência de horizontes de solo nas condições de campo.

2. Os parâmetros estatísticos da distribuição de frequência de tamanho de partículas da fração areia indicam que horizontes superficiais com areia mais bem selecionada e com maior teor de material grosseiro estão propensos à eluviação e, ou, erosão seletiva de argila. Dessa forma, horizontes subsuperficiais com areia mal selecionada e com maior teor de partículas pequenas apresentam maior propensão à retenção de argila, dada a elevada compacidade do arranjo das partículas da fração areia.

LITERATURA CITADA

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. Solo-determinação do índice de vazios máximo de solos não-coesivos - MB3324. Rio de Janeiro, 1990. 6p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. Solo-determinação do índice de vazios mínimo de solos não-coesivos - MB3388. Rio de Janeiro, 1991. 14p.
- BLAKE, G.R. & HARTGE, K.H. Bulk density. In: KLUTE, A. Methods of soil analysis. Physical and mineralogical methods. Madison, Soil Science Society of America, 1986. part.1. p363-375.
- CARVALHO, K.W. & GARRIDO, J.L.P. Reconhecimento geológico da bacia Bahia Sul - Espírito Santo, Brasil. Salvador, PETROBRÁS, 1966. 77p. (Relatório técnico interno, 904)
- CLEMENTE, C.A.; ABRAHÃO, I.O.; MARCONI, A. & LORANDI, R. Latossolos da Bacia do Ribeirão do Lobo (Brotas, Itirapina, SP): I. Granulometria. Boletins da ESALQ/USP, 43:713-733, 1986.
- COSTA, J.B. Caracterização e constituição do solo 3.ed. Lisboa, Fundação Calouste Gulbenkian, 1985. 528p.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA-EMBRAPA. Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos. Manual de métodos de análise de solo. Rio de Janeiro, 1979. não paginado.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA-EMBRAPA. Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos. Sistema brasileiro de classificação de solos, 3ª aproximação. Rio de Janeiro, 1988. 122p.
- FOLK, R.L. & WARD, W.C. Brazos river bar: a study in the significance of grain size parameters. J. Sedim. Petr., 27:3-27, 1957.
- GUERRA, A.T. Dicionário geológico e geomorfológico. Rio de Janeiro, Fundação Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 1993. 446p.
- HILLEL, D. Fundamentals os soil physics. Orlando, Academic Press, 1980. 413p.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. Levantamento de Recursos Naturais. Folha SE-24 - Rio Doça, Projeto RADAMBRASIL. Rio de Janeiro, 1987. 584p.
- JACOMINE, P.K.T. Fragipans em solos de tabuleiros: características, gênese e implicações no uso agrícola. Recife, Universidade Federal Rural de Pernambuco, 1974. 112p. (Tese de Livre Docência)
- KRAMER, S.L. & SEED, H.B. Initiation of soil liquefaction under static loading conditions. J. Geotech. Eng., 114:412-430, 1988.
- KRUMBEIN, W.C. Size frequency distribution of sediments. J. Sedim. Petr., 4:65-77, 1934.
- LARIOS, M.R.B. Contribuição ao estudo de materiais granulares finos para reforço de solos não coesivos moles. Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, 1994. 72p. (Tese de Mestrado)
- LEMOS, R.C. & SANTOS, R.D. Manual de descrição e coleta de solo no campo. Campinas, SBCS/SNLCS, 1984. 45p.
- LOPES, A.S. Manual da fertilidade do solo. São Paulo, ANDA/POTAFOS, 1989. 155p.
- MEREDITH, H.L. & PATRICK Jr., W.H. Effects of soil compactation on subsoil root penetration and physical properties of three soils in Lousiana. Agron. J., 53:163-167, 1961.
- NIMER, E. Climatologia do Brasil. 2.ed. Rio de Janeiro, IBGE, 1989. 422p.
- OLIVEIRA, R.M. & SPADINI, A.R. Paleokarst features of albian carbonates from the Espírito Santo basin, Brasil. In: INTERNATIONAL SEDIMENTOLOGICAL CONGRESS, 14., Recife, 1994. Proceedings. International Association of Sedimentologists. Recife, Universidade Federal de Pernambuco, 1994. B-13p.
- PANAYIOTOPOULOS, K.P. & MULLINS, C.E. Packing of sands. J. Soil Sci., 36:129-139, 1985.
- RESENDE, M.; CARVALHO FILHO, A. & LANI, J.L. Características do solo e da paisagem que influenciam a susceptibilidade à erosão. In: SIMPÓSIO SOBRE MANEJO E CONSERVAÇÃO DO SOLO NO CERRADO. Goiânia, 1990. Anais... Campinas, Fundação Cargil, 1992. p.32-93.
- ROWE, W.E. & BARDEN, L. A new consolidation cell. Geotechnique. 16:162-170, 1966.
- RUEDA, J.R.R. & DEMATTÊ, J.L.I. Solos originados de lamitos da formação Marília (grupo Bauru) da região de Monte Alto, SP. R. Bras. Ci. Solo, 12:161-170, 1988.
- SILVA, A.P.; KAY, B.D. & PERFECT, E. Factors influencing bulk density, reference bulk density and relative bulk density of soils. In: CONGRESSO LATINO AMERICANO DE CIÊNCIA DO SOLO, 23., Águas de Lindóia, 1996. Resumos Expandidos. Campinas, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1996. (Em CD, trab.039 comissão 01)
- SUGUIO, K. Introdução à sedimentologia. São Paulo, Edgard Blücher, 1973. 317p.
- TREMOCOLDI, W.A. & STEINHARDT, G.C. Gênese de solos Podzólicos derivados de arenitos da formação Bauru do estado de São Paulo. R. Bras. Ci. Solo, 11:59-65, 1987.
- UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA. Caracterização de solos e avaliação dos principais sistemas de manejo dos tabuleiros costeiros do Baixo Rio Doce e da Região Norte do Espírito Santo e sua interpretação para uso agrícola. Viçosa, 1984. 153p.