

# ATRIBUTOS FÍSICOS RELACIONADOS À COMPACTAÇÃO DE SOLOS SOB VEGETAÇÃO NATIVA EM REGIÃO DE ALTITUDE NO SUL DO BRASIL<sup>(1)</sup>

Rodrigo Vieira Luciano<sup>(2)</sup>, Jackson Adriano Albuquerque<sup>(3)</sup>, André da Costa<sup>(2)</sup>, Bruno Batistella<sup>(4)</sup> & Maria Tereza Warmling<sup>(5)</sup>

## RESUMO

A compactação causada por atividades antrópicas altera os atributos físicos do solo, causando redução na produtividade e impactos ao ambiente. Muitos estudos sobre esse tema têm sido realizados em solos agrícolas, porém poucas são as informações em áreas com vegetação nativa, nas quais, geralmente, os teores de matéria orgânica são mais elevados. Assim, é oportuno avaliar a relação entre os atributos físicos relacionados à compactação, nessas condições, a fim de estabelecer valores de referência para projetos de recuperação de áreas degradadas em campos naturais ou matas ciliares. Objetivou-se relacionar densidade máxima (DsMáx), umidade ótima de compactação (UOC) e densidade relativa (DR) com os limites de consistência, granulometria e teor de matéria orgânica de solos predominantes do Planalto Sul do Estado de Santa Catarina sob vegetação nativa de clima temperado. Amostras do horizonte A foram coletadas em dois Nitossolos, dois Neossolos e dois Cambissolos. Foram avaliados: a granulometria, a densidade de partícula, o teor de carbono orgânico total, os limites de liquidez, de plasticidade e de pegajosidade, o índice de plasticidade, a densidade máxima, a umidade ótima de compactação, a densidade do solo e a densidade relativa. A DsMáx aumenta com o teor de areia total e areia fina e reduz com os teores de argila e com os limites de liquidez e de pegajosidade. A UOC diminui nos solos arenosos, especialmente naqueles com predominância de areia fina, e aumenta nos argilosos ou com maior teor de carbono orgânico total e dos limites de Atterberg. A UOC variou entre 0,76 e 1,05 vezes o limite de plasticidade, tendo relação direta com o teor de silte, indicando que a umidade ótima de compactação não pode ser avaliada apenas com a determinação

---

<sup>(1)</sup> Recebido para publicação em 26 de outubro de 2011 e aprovado em 11 de outubro de 2012.

<sup>(2)</sup> Doutorando em Manejo do Solo, Departamento de Solos - DPS, Universidade do Estado de Santa Catarina, Centro de Ciências Agroveterinárias - UDESC - CAV. Bolsista do CNPq. Av. Luís de Camões, 2.090. Conta Dinheiro. CEP 88.520-000 Lages (SC). E-mail: agro.luciano@gmail.com, andrecosta.agro@hotmail.com

<sup>(3)</sup> Professor, DPS - UDESC - CAV. Pesquisador do CNPq. E-mail: albuquerque@pq.cnpq.br

<sup>(4)</sup> Acadêmico do curso de Agronomia, UDESC - CAV. E-mail: bruno.batistella@hotmail.com

<sup>(5)</sup> Mestranda em Manejo do Solo, DPS - UDESC - CAV. E-mail: tetecav@yahoo.com.br

**do limite de plasticidade de um solo. Os solos de altitude do Planalto Sul de SC têm relação UOC/LP diferente da de solos de outros locais, como consequência dos elevados teores de matéria orgânica desses solos.**

**Termos de indexação: ensaio de Proctor Normal, densidade relativa, limites de consistência.**

**SUMMARY: PHYSICAL ATTRIBUTES RELATED TO SOIL COMPACTION UNDER NATIVE VEGETATION OF SOUTHERN BRAZIL**

*The compaction caused by anthropic activities alters the soil physical properties, decreasing productivity and affecting the environment. Many studies on this topic have been conducted in agricultural soils; however there is little information in areas with native vegetation, where, usually, organic matter levels are higher. Thus, it is essential to evaluate the relationship between physical properties related to compaction under these conditions to establish reference values for the revegetation of native grassland or riparian forests. The objective was to relate maximum bulk density (MaxBD), optimum water content for compaction (OWC) and relative density (DR) with the limits of consistency, particle size and organic carbon content of predominant soils on the Southern Plateau of the State of Santa Catarina, Brazil, under native vegetation of temperate climate. Samples of A-Horizon were collected from two Oxisols (Rhodic and Xanthic Kandiodox), two Entisols (Lithic Udorthents and Typic Udipsamments) and two Inceptisols (Pachic Humudepts). The particle size distribution, particle density, total organic carbon content, limits of liquid, plasticity (LP) and stickiness, plasticity index, maximum bulk density (MaxBD), optimum water content (OWC) for compaction, bulk density, and the degree of compactness were evaluated. The MaxBD increases in soils with higher sand and fine sand content, and decreases in soils with higher clay content and higher liquidity and stickiness limits. The OWC decreases in sandy soils, especially those with a predominance of fine sand, and increases in those with higher clay content, total organic carbon and Atterberg limits. The OWC was between 0.76 and 1.05 times the plastic limit, directly related with the silt content, indicating that the optimum moisture content for compaction cannot be measured only by the determination of the plastic limit of a soil. The OWC/LP ratio of soils at higher altitude in the Southern Plateau of Santa Catarina is different from that of soils in other places, as a consequence of the high levels of organic matter and silt in these soils.*

*Index terms: Standard Proctor test, relative bulk density, consistency limits.*

## INTRODUÇÃO

A compactação do solo reduz a infiltração, aumenta o escoamento superficial de água no solo, dificulta o crescimento do sistema radicular das plantas e reduz a absorção de nutrientes e, conseqüentemente, o rendimento das culturas.

O solo pode estar naturalmente adensado ou, por meio de ação antrópica, compactado. O uso de máquinas e implementos com umidade do solo próxima ao limite de plasticidade é o principal fator que compacta os solos agrícolas, pois a água reduz a coesão e atua como lubrificante entre as partículas de solo, permitindo o deslizamento e o empacotamento das partículas quando este é submetido a algum tipo de pressão. Portanto, para manejar adequadamente os solos agrícolas e entender a dinâmica da compactação, é necessário avaliar os limites de Atterberg e sua relação com a densidade atual do solo, a densidade máxima de compactação e a umidade

ótima de compactação, obtidos por meio do ensaio de Proctor Normal (Dias Júnior & Miranda, 2000).

As classes de solos possuem comportamentos distintos quando submetidas à compactação, devido às variações da textura, da mineralogia, do teor de matéria orgânica, da umidade (Taylor & Henderson, 1959; Silva et al., 1986; Stone & Ekwue, 1993; Ekwue & Stone, 1995, 1997), além do histórico de pressões promovido pelos processos pedogenéticos de formação e pelo manejo do solo (Dias Junior & Pierce, 1996). De modo geral, a elevação dos teores de argila e de matéria orgânica torna a curva de compactação platicúrtica, reduzindo a densidade máxima do solo e aumentando a umidade ótima de compactação (Silva et al., 1986; Ekwue & Stone, 1997; Figueiredo et al., 2000; Braida et al., 2006; Marcolin & Klein, 2011). Isso ocorre pelo fato de a argila e a matéria orgânica reterem mais água do que as frações silte e areia (Silva et al., 1986), bem como pela baixa densidade específica da matéria orgânica (Ekwue & Stone, 1995).

A densidade relativa (DR) é definida como a razão entre a densidade do solo nas condições de campo e a densidade máxima do solo obtida no ensaio de Proctor Normal. Alguns estudos sugerem que há uma faixa de DR mais adequada ao crescimento das culturas agrícolas. Carter (1990) obteve máximo rendimento de cereais quando a DR de solos arenosos variou entre 0,77 e 0,84, observando que o desenvolvimento das plantas diminuiu quando a DR foi maior que 0,89, principalmente por deficiência de aeração do solo. Håkansson (1990), em estudo realizado em 100 campos experimentais abrangendo diferentes tipos de solos da Suécia, encontrou máximo rendimento de cevada (*Hordeum vulgare* L.) quando a DR estava próxima a 0,87. Lipiec et al. (1991) realizaram experimentos com cevada em um solo com 0,20 e outro com 0,60 kg kg<sup>-1</sup> de argila e concluíram que o crescimento das plantas e o rendimento de grãos são reduzidos quando a DR excede, respectivamente, 0,91 e 0,88, devido ao menor crescimento do sistema radicular das culturas no perfil e menor absorção de água e nutrientes pelas plantas. Em Latossolos Vermelhos de São Paulo, a soja produziu mais quando a DR estava próxima de 0,80 (Beutler et al., 2005). Suzuki et al. (2007) observaram, em um Latossolo Vermelho, maior rendimento da soja quando a DR estava próxima de 0,86, enquanto Reichert et al. (2009) constataram, em vários solos de clima subtropical, maior rendimento das culturas quando a DR se situava entre 0,80 e 0,90.

A maioria desses estudos foi realizada com o objetivo de avaliar a produtividade das culturas anuais em função do grau de compactação do solo. Por outro lado, estudos que avaliam DR em áreas com vegetação nativa são escassos. Essas informações são úteis no estabelecimento de DR de referência na execução de projetos de recuperação em áreas com solos degradados fisicamente, como as áreas de campo nativo ou matas ciliares, que estão sujeitas ao pisoteio excessivo de bovinos em sistemas extensivos de criação. Esse tipo de uso do solo é bastante comum no Planalto Sul do Estado de Santa Catarina (Benez, 2005). A densidade máxima e a DR desses solos provavelmente diferem das daqueles observados em outras regiões do Brasil, devido a uma condição diferenciada de clima nessa região em relação à grande parte do País, pois as temperaturas mais amenas em comparação às demais regiões de SC e do Brasil e o clima constantemente úmido (Pandolfo et al., 2002) favorecem maior acúmulo de carbono orgânico total no solo (Dalmolin et al., 2006).

Para um mesmo solo, variações da umidade modificam sensivelmente a sua consistência. Segundo Ojeniyi & Dexter (1979), a umidade do solo que favorece a compactação pelas máquinas agrícolas está próxima a 90 % do limite de plasticidade, o que também foi constatado por Figueiredo et al. (2000) em um Latossolo Roxo de Minas Gerais e por Braida et al. (2006) em um Nitossolo Vermelho de Santa Catarina. Caso essa relação seja válida para qualquer tipo de solo, a determinação do limite de plasticidade

pode ser utilizada para estimar a umidade ótima de compactação, dispensando a determinação do ensaio de Proctor Normal, o qual necessita de grande volume de solo e demanda maior tempo e equipamentos mais caros para sua determinação, em comparação ao limite de plasticidade.

Objetivou-se neste estudo relacionar a densidade máxima (DsMáx), umidade ótima de compactação (UOC) e densidade relativa (DR) com os limites de consistência, granulometria e teor de matéria orgânica de solos predominantes do Planalto Sul do Estado de Santa Catarina sob vegetação nativa de clima temperado.

## MATERIAL E MÉTODOS

O estudo foi realizado no Centro de Ciências Agroveterinárias (UDESC/CAV), em Lages/SC, com solos representativos do Planalto Sul Catarinense. O clima na região é do tipo Cfb, segundo classificação de Köppen (Pandolfo et al., 2002), ou seja, temperado, constantemente úmido, sem estação seca e com verão fresco (temperatura média do mês mais quente < 22,0 °C); a temperatura média normal anual varia de 13,8 a 15,8 °C; a média anual das temperaturas máximas varia de 19,4 a 22,3 °C, e a das temperaturas mínimas, de 9,2 a 10,8 °C. A média anual da precipitação pluvial total varia de 1.360 a 1.600 mm, e a da umidade relativa do ar, de 80 a 83 % (Benez, 2005).

A região do Planalto Sul Catarinense é constituída por 19 municípios, distribuídos em uma área de 16.393 km<sup>2</sup>. Segundo informações contidas em Benez (2005), as classes de solos predominantes são Cambissolos (47 %), Neossolos Litólicos (43 %) e Nitossolos (9 %). Esses solos foram formados a partir de diferentes tipos de material de origem, altitudes (entre 825 e 1.350 m) e demais fatores de formação do solo, o que determina grande variabilidade de textura, teor de matéria orgânica e mineralogia.

Os solos amostrados foram classificados, segundo o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (Embrapa, 2006), em: Cambissolo Húmico aluminico típico (Pachic Humudepts), coletado em dois municípios (CH<sub>Alu1</sub> e CH<sub>Alu2</sub>); Nitossolo Vermelho aluminico húmico (Rhodic Kandiodox) (NV<sub>Alu</sub>); Nitossolo Bruno distrófico típico (Xanthic Kandiodox) (NB<sub>Dis</sub>); Neossolo Litólico húmico típico (Lithic Udorthents) (NL<sub>Hum</sub>); e Neossolo Litólico distrófico típico (Tipic Udipsamments) (NL<sub>Dis</sub>). A geologia, litologia, uso atual e localização de cada perfil de solo são apresentados no quadro 1.

Amostras de solo foram coletadas no centro da camada correspondente ao horizonte A de cada classe de solo (5-10 cm). Para determinação da densidade do solo (Ds) e da porosidade total (PT), foram coletadas seis amostras com estrutura preservada, em anéis

**Quadro 1. Geologia, município, uso atual e localização dos seis solos do Planalto Sul Catarinense**

Solo	Formação geológica	Litologia	Município	Uso Atual	Latitude	Longitude
CH <sub>Alu1</sub>	Rio do Rastro	Siltitos	Lages	Campo nativo	27°44'22"S	50°20'9"W
CH <sub>Alu2</sub>	Teresina	Folhelhos	Bom Retiro	Campo nativo	27°48'55"S	49°32'37"W
NV <sub>Alu</sub>	Teresina	Folhelhos	Bom Retiro	Campo nativo	27°43'53"S	49°47'18"W
NB <sub>Dis</sub>	Serra Geral	Basalto	Painel	Campo nativo	27°53'42"S	50°7'45"W
NL <sub>Hum</sub>	Serra Geral	Basalto	São Joaquim	Campo nativo	28°15'26"S	49°57'15"W
NL <sub>Dis</sub>	Botucatu	Arenito Botucatu	Ponte Alta	Floresta Nativa	27°26'40"S	50°25'46"W

CH<sub>Alu1</sub> = Cambissolo Húmico aluminico típico 1; CH<sub>Alu2</sub> = Cambissolo Húmico aluminico típico 2; NV<sub>Alu</sub> = Nitossolo Vermelho aluminico húmico; NB<sub>Dis</sub> = Nitossolo Bruno distrófico típico; NL<sub>Hum</sub> = Neossolo Litólico húmico típico; NL<sub>Dis</sub> = Neossolo Litólico distrófico típico.

metálicos com volume de 70 cm<sup>3</sup> (2,5 cm de altura e 6 cm de diâmetro), de acordo com Embrapa (1997). Nas demais determinações, foram coletadas amostras com estrutura alterada, as quais foram secas ao ar e peneiradas em malha de 2,0 mm de diâmetro. O teor de carbono orgânico total (COT) foi determinado pelo método descrito em Tedesco et al. (1995); a granulometria, pelo método da pipeta (Gee & Bauder, 1986), dividindo-se os teores de areia em duas classes (areia fina - 0,053-0,25 mm e areia grossa - 0,25-2,00 mm); e a densidade de partícula (Dp), pelo método do balão volumétrico (Gubiani et al., 2006). As determinações de COT, granulometria e Dp foram realizadas em duplicata.

O limite de liquidez (LL) foi determinado com a utilização do aparelho de Casagrande, segundo Embrapa (1997), e calculado pela equação:  $LL = W_N(N/25)^{0,12}$ , em que LL é o limite de liquidez (g 100 g<sup>-1</sup>), representado pela umidade gravimétrica ajustada para 25 rotações do aparelho;  $W_N$  é a umidade gravimétrica (g 100 g<sup>-1</sup>) correspondente às rotações da determinação; e  $N$  é o número de rotações da determinação. O limite de plasticidade (LP) foi determinado em triplicata conforme descrito em Embrapa (1997), retirando-se 15 g da amostra de solo proveniente da determinação do limite de liquidez e formando-se uma esfera, que é comprimida sobre placa de vidro até formar um bastão cilíndrico de 3,0 mm de diâmetro, sem quebrar ou fluir. Nessa condição de plasticidade, os bastões de solo têm sua umidade gravimétrica determinada. O limite de pegajosidade (LPe) corresponde à percentagem de umidade na qual o solo se tornou aderente (Embrapa, 1997). O LL, LP e LPe foram determinados em triplicata. O índice de plasticidade (IP) foi calculado pela diferença entre o LL e o LP. O índice de atividade de Skempton (Skempton, 1953) foi calculado pela razão entre o IP e o percentual da fração argila (% < 2µm) presente nas amostras de solo analisadas. Utilizando o IP e o LL, os solos foram classificados segundo o Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS), desenvolvido por Casagrande (1948) e atualizado por Oliveira & Brito (1998).

No ensaio de Proctor Normal foram utilizadas 12 amostras de solo, cada uma com 2,5 kg. As amostras foram secas ao ar e peneiradas em peneira com malha

de 4,76 mm, sendo determinada a umidade residual. Elas foram umedecidas em intervalos de 0,02 kg kg<sup>-1</sup> para os solos com textura franca a argilosa e em intervalos de 0,015 kg kg<sup>-1</sup> para o solo com textura franco-arenosa. As amostras foram acondicionadas em sacos plásticos, onde permaneceram em repouso por 24 h, para homogeneização da sua umidade. O ensaio de Proctor Normal foi realizado sem o reuso do material de solo, com duas repetições de laboratório em cada umidade testada por perfil de solo, em um aparelho automático (Solotest<sup>®</sup>), segundo ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas), de acordo com a norma NBR 7.182 (ABNT, 1986). Após essas determinações, foi plotado um gráfico com a umidade gravimétrica (variável independente) e a Ds (variável dependente), para cada classe de solo, conforme Stancati et al. (1981). Foram selecionadas apenas seis Ds, as quais contêm a densidade do solo máxima (DsMáx) e a umidade ótima de compactação (UOC), eliminando-se as umidades extremas, conforme procedimento recomendado pela norma NBR 7.182 (ABNT, 1986). Para cada solo foi ajustada uma equação polinomial de segundo grau. No seu ponto de máxima obtém-se, na abscissa, a DsMáx e, na ordenada, a umidade ótima de compactação. A partir dessas determinações, foi calculada a densidade relativa (DR), utilizando-se a equação  $DR = Ds(\text{campo})/DsMáx$ .

Na análise estatística, o coeficiente de correlação linear de Pearson foi calculado entre os limites de Atterberg e a granulometria do solo, o teor de COT e a densidade de partículas e também entre os atributos obtidos no ensaio de Proctor Normal (densidade máxima, umidade ótima e densidade relativa) e todos os demais atributos físicos do solo avaliados.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

### Granulometria e teor de carbono orgânico total

Os teores de argila dos solos variaram entre 126 e 557 g kg<sup>-1</sup>, os de silte, entre 53 e 409 g kg<sup>-1</sup>, e os de areia, entre 98 e 821 g kg<sup>-1</sup>, o que resulta em variação nas classes texturais desde franco-arenosa até argilosa

**Quadro 2. Granulometria, classe textural, teor de carbono orgânico total (COT) e densidade de partícula (Dp) do horizonte A dos seis solos do Planalto Sul Catarinense**

Solo	Argila	Silte	g kg <sup>-1</sup>		Classe Textural	COT	Dp
			Areia fina	Areia grossa			
CH <sub>Alu1</sub>	275	376	319	30	Franco	12	2,39
CH <sub>Alu2</sub>	350	408	156	86	Franco-argiloso	42	2,21
NV <sub>Alu</sub>	371	409	157	63	Franco-argiloso	28	2,41
NB <sub>Dis</sub>	557	345	60	38	Argila	37	2,51
NL <sub>Hum</sub>	517	377	47	60	Argila	89	2,13
NL <sub>Dis</sub>	126	53	529	292	Franco-arenoso	13	2,55

CH<sub>Alu1</sub> = Cambissolo Húmico aluminico típico 1; CH<sub>Alu2</sub> = Cambissolo Húmico aluminico típico 2; NV<sub>Alu</sub> = Nitossolo Vermelho aluminico húmico; NB<sub>Dis</sub> = Nitossolo Bruno distrófico típico ; NL<sub>Hum</sub> = Neossolo Litólico húmico típico; NL<sub>Dis</sub> = Neossolo Litólico distrófico típico.

(Quadro 2). A granulometria foi dependente da litologia: o solo derivado de arenito apresentou menor teor de argila; os derivados de siltitos/folhelhos, teores intermediários de argila; e os derivados de basalto, teores de argila mais elevados. O teor de carbono orgânico total (COT) variou de 12 a 89 g kg<sup>-1</sup>, sendo classificado como baixo no CH<sub>Alu1</sub> e no NL<sub>Dis</sub>, médio no NV<sub>Alu</sub> e alto em NB<sub>Dis</sub>, CH<sub>Alu2</sub> e NL<sub>Hum</sub> (CQFS-RS/SC, 2004).

**Limites de consistência**

A grande amplitude nos teores de argila e COT influenciou o LL, que variou de 15 a 60 g 100 g<sup>-1</sup>, e o limite de plasticidade, que variou de 25 a 57 g 100 g<sup>-1</sup> nos solos plásticos. O NL<sub>Dis</sub> não possui LP, devido à sua textura franco-arenosa. Os solos com maior LP foram aqueles com maior LL, porém com diferentes IPs, estes variando de 2,5, no NL<sub>Hum</sub>, a 9,7 g 100g<sup>-1</sup> no NB<sub>Dis</sub> (Quadro 3). Conforme a classificação sugerida por Jenkins (Caputo, 1987), dos solos plásticos, o NL<sub>Hum</sub> e o NV<sub>Alu</sub> são fracamente plásticos (1 < IP ≤ 7), enquanto o CH<sub>Alu2</sub>, CH<sub>Alu1</sub> e NB<sub>Dis</sub> são medianamente plásticos (7 < IP ≤ 15). Para o LPe a variação foi de 22 a 74 g 100g<sup>-1</sup> (Quadro 3), apresentando correlação positiva com os limites de liquidez e de plasticidade (Quadro 4).

Os limites de liquidez, plasticidade e pegajosidade aumentaram com o teor de argila e reduziram com os teores de areia total e areia fina. Apenas o LPe teve correlação positiva com o teor de COT (Quadro 4). A Dp não alterou nenhum dos índices de consistência avaliados. Buckman & Brady (1979) e Marcolin (2006) relataram correlação positiva entre o teor de argila e os limites de liquidez, de plasticidade e índice de plasticidade. Nos solos avaliados não foi observada correlação entre o teor de argila e o IP. Isso pode ser devido ao predomínio de argilominerais com menor superfície específica, os quais diminuem a capacidade da fração argila de interagir com a água e reduzem o efeito lubrificante desta, não ocorrendo o deslizamento das partículas finas uma sobre as outras, o que reduz o IP do solo.

Segundo Vargas (1993), para avaliar a consistência

**Quadro 3. Limites físicos de plasticidade (LP), de liquidez (LL), de pegajosidade (LPe) e índices de consistência (IP) e atividade de Skempton (Ac) do horizonte A dos solos do Planalto Sul Catarinense**

Solo	LP	LL	IP	LPe	Ac
CH <sub>Alu1</sub>	25	32	7,2	36	0,26
CH <sub>Alu2</sub>	32	40	7,2	43	0,21
NV <sub>Alu</sub>	39	44	5,7	48	0,15
NB <sub>Dis</sub>	45	54	9,7	58	0,17
NL <sub>Hum</sub>	57	60	2,5	74	0,05
NL <sub>Dis</sub>	NP	15	-	22	-

CH<sub>Alu1</sub> = Cambissolo Húmico aluminico típico 1; CH<sub>Alu2</sub> = Cambissolo Húmico aluminico típico 2; NV<sub>Alu</sub> = Nitossolo Vermelho aluminico húmico; NB<sub>Dis</sub> = Nitossolo Bruno distrófico típico; NL<sub>Hum</sub> = Neossolo Litólico húmico típico; NL<sub>Dis</sub> = Neossolo Litólico distrófico típico. NP = não plástico.

do solo é indispensável fazer uma análise comparativa de sua plasticidade, que pode ser realizada por meio da carta de plasticidade em conjunto com o gráfico de atividade de Skempton. Observando-se a posição de cada solo na carta de plasticidade (Figura 1a), o NL<sub>Dis</sub> pode ser classificado como “solo sem coesão”; o CH<sub>Alu1</sub>, CH<sub>Alu2</sub> e NV<sub>Alu</sub>, como “siltos inorgânicos de baixa compressibilidade”; e o NL<sub>Hum</sub> e NB<sub>Dis</sub>, como “siltos inorgânicos de alta compressibilidade”.

A classificação dos solos utilizando a atividade de Skempton (Ac) variou em função da litologia deles (Quadro 3). Observa-se que todos os solos estão situados abaixo da linha de atividade 0,75, e a classificação da fração fina dos solos é “argilominerais inativos” (Figura 1b). Essa classificação indica que, no Planalto Catarinense, o horizonte A dos solos tem índice de plasticidade baixo, em função dos fatores e processos de formação do solo, que favorecem a formação de argilominerais do tipo 1:1 (caulinita) e

menor quantidade do tipo 2:1:1 (argilas 2:1 com hidróxido entrecamadas), além de pequena presença de óxidos de Fe, predominantemente goethita (Almeida & Kämpf, 1997), e também devido aos elevados teores de COT do solo, pois este atributo correlacionou-se negativamente com a atividade de Skempton (Ac) (Quadro 4).

### Densidade máxima, umidade ótima para compactação e densidade do solo

A densidade máxima variou de 1,02 a 1,81 g cm<sup>-3</sup>, e a umidade ótima de compactação, de 0,14 a 0,48 g g<sup>-1</sup> (Figura 2). A DsMáx decresceu na seguinte ordem: NL<sub>Dis</sub> > CH<sub>Alu1</sub> > NB<sub>Dis</sub> > CH<sub>Alu2</sub> > NV<sub>Alu</sub> > NL<sub>Hum</sub>, e a UOC de compactação, na ordem a seguir: NL<sub>Dis</sub> < CH<sub>Alu1</sub> < NB<sub>Dis</sub> < CH<sub>Alu2</sub> < NV<sub>Alu</sub> < NL<sub>Hum</sub>. A Ds no horizonte A dos solos mantidos com vegetação nativa variou entre 0,78 e 1,40 g cm<sup>-3</sup> (Figura 3).

A elevada amplitude nas DsMáx, UOC e Ds mostra a importância de estudar diferentes tipos de solo que ocorrem em uma região a fim de estabelecer valores de referência para esses atributos físicos. Observa-se que cada tipo de solo tem uma Ds, DsMáx e UOC específica, e a utilização desses valores para outras classes de solo pode levar a grandes erros na definição da umidade ideal de manejo ou da avaliação do estado atual de compactação de uma determinada área.

Para entender por que os atributos estudados variaram, foi realizada análise de correlação entre eles e as frações granulométricas e o teor de COT. Houve correlação entre a DsMáx e a UOC com os teores de

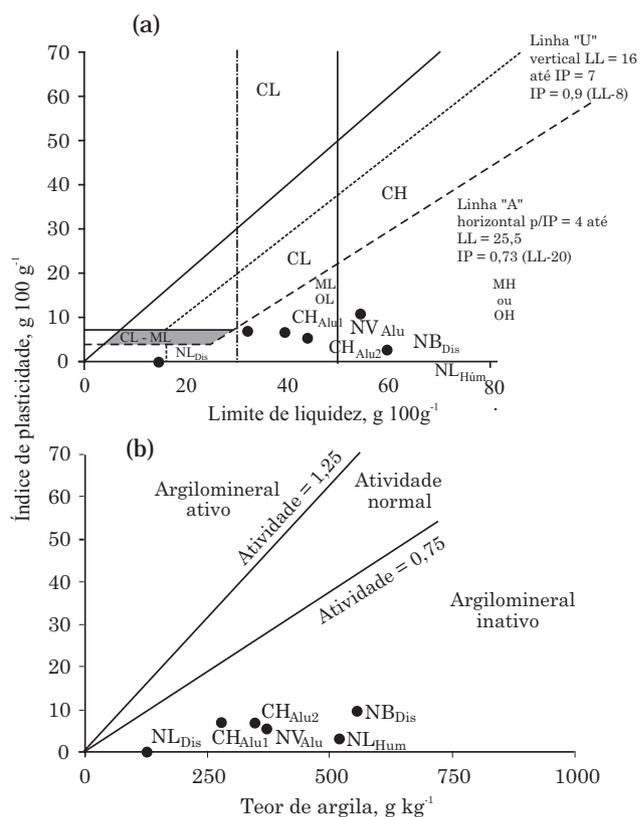
COT (Figura 4) e com as frações granulométricas (Quadro 5), especialmente com os teores de areia fina e argila (Figura 5). A variação na DsMáx foi maior nos solos com menor teor de COT (entre 12 e 40 g kg<sup>-1</sup>), sendo ajustada por uma equação polinomial inversa de primeiro grau (Figura 4a). Figueiredo et al. (2000) e Braida et al. (2006) também relataram reduções lineares da DsMáx com o aumento do teor de COT do solo. Segundo esses autores, a densidade da matéria orgânica ( $\pm 1$  g cm<sup>-3</sup>) é menor do que a densidade dos demais constituintes minerais do solo ( $\pm 2,6$  g cm<sup>-3</sup>), resultando na redução da Ds e da DsMáx com o aumento do teor de matéria orgânica (Braida et al., 2006). Além disso, a matéria orgânica é um constituinte que favorece a estruturação (Baumgartl & Horn, 1991).

Por outro lado, a UOC aumentou com o teor de COT do solo (Figura 4b), o que é atribuído à alta capacidade de retenção de água da matéria orgânica

**Quadro 4. Coeficiente de correlação de Pearson entre os limites e índices de consistência com a granulometria, teor de carbono orgânico total (COT) e densidade de partículas (Dp) do horizonte A dos solos do Planalto Sul Catarinense**

Atributo	LP	LL	IP	LPe	Ac
LL	0,98**	-			
IP	-0,53	-0,35	-		
LPe	0,99**	0,97**	-0,54	-	
Ac	-0,96**	-0,90*	0,71	-0,95*	-
Argila	0,87	0,98**	-0,05	0,93**	-0,72
Silte	-0,31	0,73	-0,36	0,62	0,08
Areia total	-0,91*	-0,95**	0,15	-0,86*	0,80
Areia fina	-0,90*	-0,98**	0,20	-0,91*	0,81
Areia grossa	0,12	-0,76	-0,32	-0,65	-0,25
COT	0,89*	0,78	-0,70	0,89*	-0,89*
Dp	-0,35	-0,54	0,77	-0,61	0,47

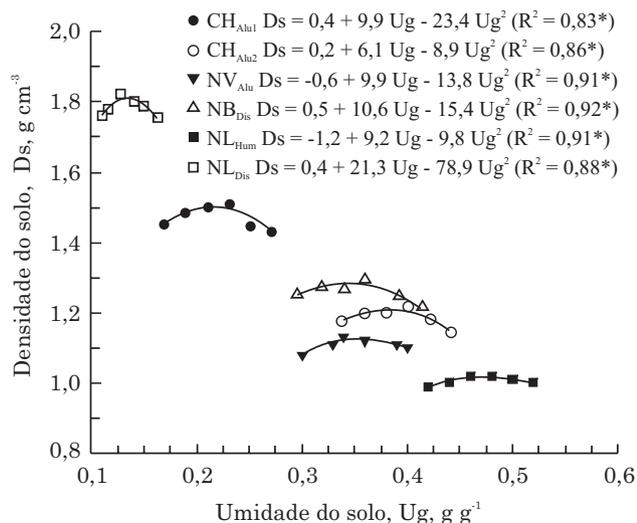
LL: limite de liquidez, LP: limite de plasticidade, IP: índice de plasticidade, LPe: limite de pegajosidade, Ac: atividade de Skempton, Teste H<sub>0</sub>: |r| = zero, quando \* = significativo (0,01 < p < 0,05) e \*\* = significativo (p < 0,01).



**Figura 1. Carta de plasticidade (a) e atividade de Skempton (b) para o horizonte A de seis solos do Planalto Sul Catarinense. CH<sub>Alu1</sub>: Cambissolo Húmico aluminoso 1; CH<sub>Alu2</sub>: Cambissolo Húmico aluminoso 2; NV<sub>Alu</sub>: Nitossolo Vermelho aluminoso; NB<sub>Dis</sub>: Nitossolo Bruno distrófico; NL<sub>Hum</sub>: Neossolo Litólico húmico, NL<sub>Dis</sub>: Neossolo Litólico distrófico. \* NL<sub>Dis</sub>: solo sem coesão (IP = zero); \*\* Classificação da fração fina do solo pela SUCS (ASTM, 2008): C: argila; M: silte; O: orgânico; L: baixa compressibilidade; H: alta compressibilidade.**

(Silva et al., 1986). Nos solos com maior teor de COT é necessário mais água para diminuir a coesão e o atrito interno entre as partículas e promover sua “lubrificação” (Hillel, 1998) e, assim, permitir o cisalhamento dos agregados e a deformação plástica do solo.

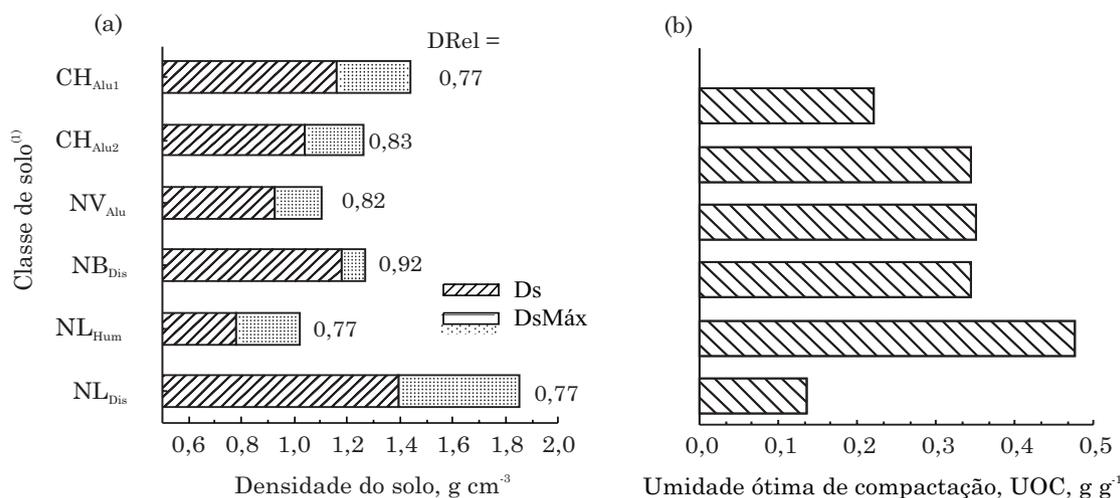
Nos solos com maior teor de areia fina, a DsMáx



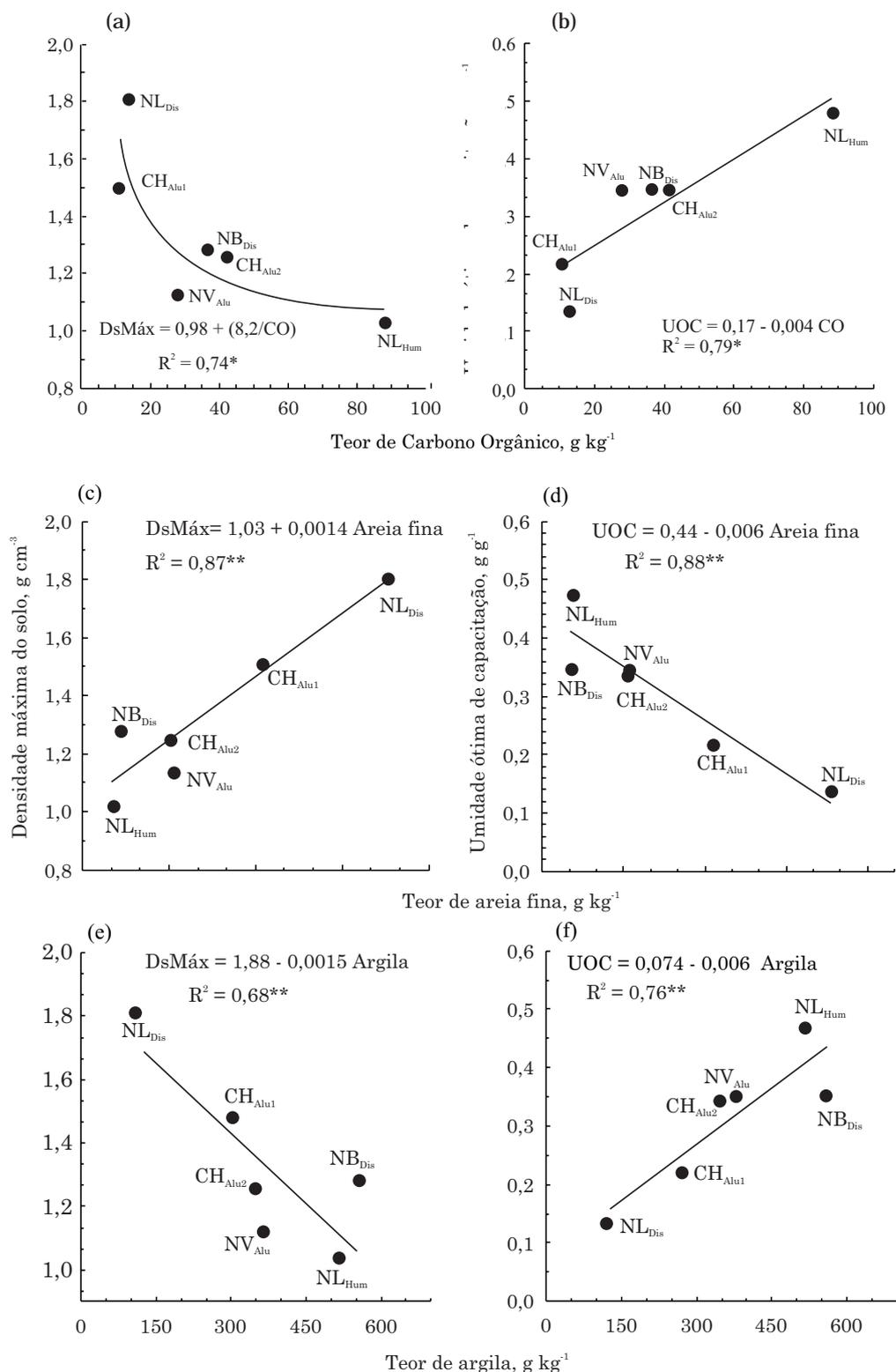
**Figura 2. Curvas de compactação do horizonte A de seis solos do Planalto Sul Catarinense pelo ensaio de Proctor Normal. CH<sub>Alu1</sub>: Cambissolo Húmico alumínico 1; CH<sub>Alu2</sub>: Cambissolo Húmico alumínico 2; NV<sub>Alu</sub>: Nitossolo Vermelho alumínico; NB<sub>Dis</sub>: Nitossolo Bruno distrófico; NL<sub>Hum</sub>: Neossolo Litólico húmico, NL<sub>Dis</sub>: Neossolo Litólico distrófico. \*: significativo (0,01 < p < 0,05) e \*\*: significativo (p < 0,01) pelo teste F.**

aumentou até 1,81 g cm<sup>-3</sup> e a UOC diminuiu até próximo de 0,15 g g<sup>-1</sup> (Figura 4c,d), devido ao melhor arranjo/empacotamento das partículas da fração da areia fina em relação às frações com maior diâmetro de partículas. Contrariamente ao efeito da areia, o acréscimo do teor de argila reduziu a DsMáx e elevou a UOC (Figura 4e,f), fato também constatado por Dias Junior & Miranda (2000) e Figueiredo et al. (2000). O efeito do teor de argila sobre a DsMáx e a UOC pode ser observado ao se comparar o CH<sub>Alu1</sub> com o NL<sub>Dis</sub>, os quais têm o mesmo teor de COT. O CH<sub>Alu1</sub> apresentou menor DsMáx e maior UOC em razão do seu maior teor de argila. A influência do teor de argila sobre esses atributos ocorre pela maior quantidade de cargas de superfície e área superficial específica (Meurer et al., 2000), características que, somadas à maior capilaridade dos solos argilosos, resultam em maior retenção de água, em comparação aos solos com maior teor de silte e, ou, areia (Hillel, 1998; Reichert et al., 2009).

As diferenças na granulometria do solo, especialmente no teor de areia fina e de argila, auxiliam a entender porque a DsMáx e a UOC variam entre os solos e mesmo dentro de solos da mesma classe. Assim, a variação na DsMáx e na UOC entre os dois Cambissolos Húmicos e entre os dois Neossolos Litólicos pode estar associada aos teores de areia fina, argila e COT. O menor teor de COT (Figura 4a,b) e de argila (Figura 4e,f) do CH<sub>Alu1</sub> em relação ao CH<sub>Alu2</sub>, e do NL<sub>Dis</sub> em relação ao NL<sub>Hum</sub>, resultou em maior DsMáx e menor UOC. Entretanto, essa constatação não é válida para os Nitossolos, pois, ao analisar os teores de argila e COT, houve tendência inversa em comparação aos Cambissolos e Neossolos, visto que o NB<sub>Dis</sub> possui maior teor de argila e de COT e teve maior DsMáx e UOC semelhante ao NV<sub>Alu</sub>. Nesse caso,



**Figura 3. Densidade do solo (Ds), densidade máxima (DsMáx), densidade relativa (DRel) (a) e umidade ótima de compactação (UOC) (b) do horizonte A de seis solos do Planalto Sul Catarinense. (1)CH<sub>Alu1</sub>: Cambissolo Húmico alumínico 1; CH<sub>Alu2</sub>: Cambissolo Húmico alumínico 2; NV<sub>Alu</sub>: Nitossolo Vermelho alumínico; NB<sub>Dis</sub>: Nitossolo Bruno distrófico; NL<sub>Hum</sub>: Neossolo Litólico húmico, NL<sub>Dis</sub>: Neossolo Litólico distrófico.**



**Figura 4. Relação entre o teor de carbono total e a densidade máxima (a) umidade ótima de compactação (b), entre densidade máxima e os teores de areia fina (c) e argila (e) e a relação entre umidade ótima de compactação e os teores de areia fina (d) e argila (f) no horizonte A de seis solos do Planalto Sul Catarinense. CH<sub>Alu1</sub>: Cambissolo Húmico aluminítico 1; CH<sub>Alu2</sub>: Cambissolo Húmico aluminítico 2; NV<sub>Alu</sub>: Nitossolo Vermelho aluminítico; NB<sub>Dis</sub>: Nitossolo Bruno distrófico; NL<sub>Hum</sub>: Neossolo Litólico húmico, NL<sub>Dis</sub>: Neossolo Litólico distrófico. \*: significativo (0,01 < p < 0,05) e \*\*: significativo (p < 0,01) pelo teste F.**

a diferença entre os dois solos pode estar associada às diferenças na Dp, mineralogia e agregação.

A densidade de cada solo no ambiente natural variou de 0,78 no NL<sub>Hum</sub> a 1,40 g cm<sup>-3</sup> no NL<sub>Dis</sub> (Figura 3a). Os solos com maiores densidade foram os que apresentaram, também, as maiores DsMáx e as menores UOC, resultado do efeito direto da granulometria do solo sobre essas variáveis, onde solos com maior teor de areia possuem maior Ds, DsMáx e menor UOC (Quadro 5).

A densidade relativa (DR) foi menor no CH<sub>Alu1</sub>, NL<sub>Dis</sub> e NL<sub>Hum</sub>, intermediária no NV<sub>Alu</sub> e CH<sub>Alu2</sub> e maior no NB<sub>Dis</sub> (Figura 3a). Conforme Carter (1990), Lipiec et al. (1991), Suzuki et al. (2007) e Reichert et al. (2009), DR maiores que 0,80, 0,86, 0,88, 0,89 e 0,91, respectivamente, seriam críticas para os solos estudados, pois restringiriam o crescimento radicular das plantas cultivadas para produção de grãos. No CH<sub>Alu1</sub>, NL<sub>Dis</sub>, NL<sub>Hum</sub>, NV<sub>Alu</sub> e CH<sub>Alu2</sub> foram encontradas DRs menores que 0,82, o que indica ausência de limitação para a implantação de culturas anuais, considerando a substituição do campo nativo para a implantação de lavouras comerciais sem o revolvimento do solo. O único solo com DR acima da densidade crítica (DR = 0,92; Figura 3) foi o NB<sub>Dis</sub>, o que indica que a DR está acima dos valores relatados como críticos para cultivos anuais e ocorreria limitação do crescimento dessas plantas caso esse solo fosse utilizado para a produção de grãos, sem um revolvimento prévio. Todavia, ainda não existem estudos que indiquem DRs críticas para solos sob vegetação de campo nativo ou floresta nativa que foram submetidos a algum processo de compactação, como

pisoteio animal ou tráfego de máquinas. A área de coleta das amostras era pastejada por bovinos de corte em sistema extensivo de criação, porém não foram observados sintomas de limitação de crescimento do campo nativo no local de coleta, o que indica que esse tipo de vegetação consegue se desenvolver em solos com DR maior que 0,90.

Diferentemente da DsMáx e da UOC, não houve relação entre a DR com os teores de COT ou com as frações granulométricas do solo (Quadro 5). Essa constatação foi importante, pois reforça o potencial de uso da DR como indicador de qualidade do solo, independentemente da sua classe textural (Håkansson & Lipiec, 2000), ao contrário da avaliação isolada da densidade do solo, pois esta é intimamente relacionada à granulometria do solo (Reichert et al., 2009; Keller & Håkansson, 2010) e ao teor de carbono orgânico (Braida et al., 2010).

**Relações da densidade máxima, umidade ótima de compactação e densidade relativa com os limites de consistência do solo**

A DsMáx foi menor e a UOC maior nos solos com maiores LPs, LPes e LLs (Quadro 5), enquanto a DR teve relação apenas com o IP. A Ds correlacionou-se negativamente com o LP (Quadro 5 e Figura 5) e positivamente com o IP (Quadro 5). A causa das correlações observadas entre os atributos do ensaio de Proctor Normal e os limites de consistência é, provavelmente, o efeito direto das frações granulométricas do solo sobre essas variáveis, pois o teor de areia total do solo, por exemplo, teve coeficiente

**Quadro 5. Coeficiente de correlação de Pearson entre os parâmetros obtidos no ensaio de Proctor e alguns atributos físicos do horizonte A de seis solos do Planalto Sul Catarinense**

Atributos	Umidade ótima	Densidade			Relação UOC/LP
		Máxima	Relativa	Do solo	
Densidade máxima	-0,97** <sup>(1)</sup>				
Densidade relativa	0,21	-0,22			
Densidade do solo	-0,91*	0,94**	0,12		
Relação UOC/LP	0,69	-0,80	0,29	-0,72	
Argila	0,87*	-0,82*	0,56	-0,64	-0,57
Silte	0,72	-0,83*	0,27	-0,76	0,90*
Areia total	-0,88*	0,91*	-0,47	0,77	0,42
Areia fina	-0,94**	0,93**	-0,50	0,78	0,24
Areia grossa	-0,65	0,74	-0,36	0,64	0,84
Carbono orgânico	0,89*	-0,76	-0,06	-0,78	-0,13
Densidade de partícula	-0,73	0,68	0,32	0,81	-0,40
Limite de plasticidade	0,93*	-0,84	0,03	-0,67	-0,43
Limite de liquidez	0,94**	-0,92*	0,40	-0,79	-0,49
Índice de plasticidade	-0,64	0,68	0,80*	0,94*	-0,07
Limite de pegajosidade	0,95**	-0,89*	0,23	-0,82*	-0,46
Atividade da argila	-0,95*	0,93*	0,16	0,84	0,27

<sup>(1)</sup>Teste H<sub>0</sub>: |r| = zero, quando \* = significativo (0,01 < p < 0,05) e \*\* = significativo (p < 0,01) pelo teste F; UOC/LP = relação entre a umidade ótima de compactação e o limite de plasticidade;

de correlação muito parecido (em valor absoluto) com o de LP, LPe, LL, DsMáx e UOC (Quadros 4 e 5).

A relação UOC/LP variou de 0,76 a 1,05 para os cinco solos plásticos (Figura 6a), aumentando com o teor de silte no solo (Figura 6b). Alguns estudos, como os realizados por Ojeniyi & Dexter (1979), Figueiredo et al. (2000) e Braida et al. (2006), obtiveram um valor

fixo de 0,90 para a relação UOC/LP, enquanto Marcolin (2006) obteve um modelo polinomial de segundo grau entre a relação UOC/LP e o teor de argila do solo, com variação de 0,85 a 1,20. Neste estudo, obteve-se a equação de regressão linear UOC/LP = -0,58 + 0,004 silte ( $R^2 = 0,80^*$ ), sendo o silte expresso em  $g\ kg^{-1}$ . Observa-se que os solos de altitude do Planalto Sul de SC têm relação UOC/LP

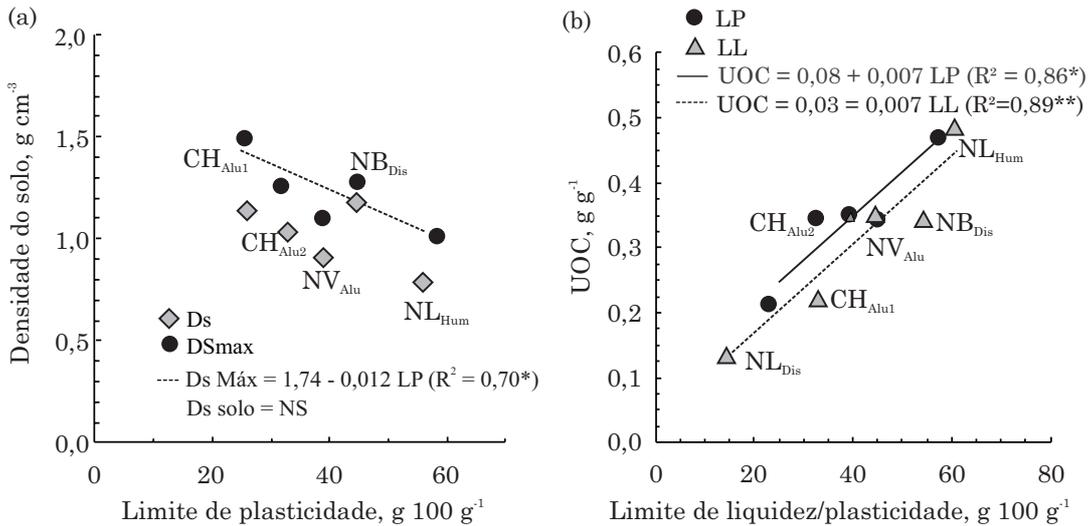


Figura 5. Relação entre o limite de plasticidade e a densidade máxima e densidade do solo (a) e entre os limites de plasticidade e liquidez e a umidade ótima de compactação (b) no horizonte A de seis solos do Planalto Sul Catarinense. CH<sub>Alu1</sub>: Cambissolo Húmico aluminico 1; CH<sub>Alu2</sub>: Cambissolo Húmico aluminico 2; NV<sub>Alu</sub>: Nitossolo Vermelho aluminico; NB<sub>Dis</sub>: Nitossolo Bruno distrófico; NL<sub>Hum</sub>: Neossolo Litólico húmico, NL<sub>Dis</sub>: Neossolo Litólico distrófico. \*: significativo (0,01 < p < 0,05) e \*\*: significativo (p < 0,01) pelo teste F.

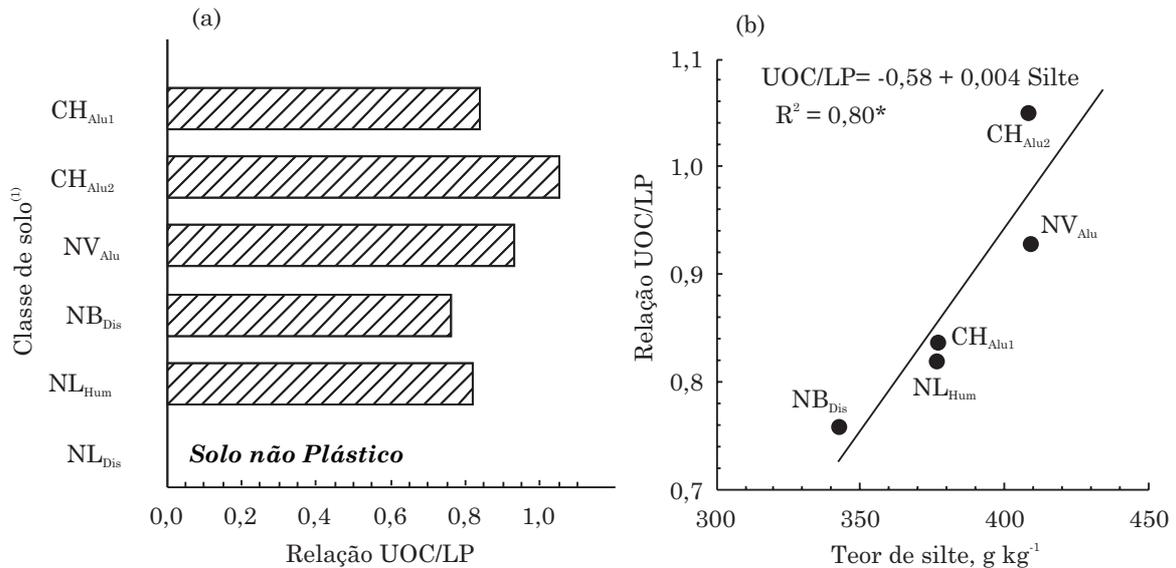


Figura 6. Relação entre umidade ótima de compactação e limite de plasticidade (UOC/LP) (a) e relação entre UOC/LP e o teor de silte (b) do horizonte A de seis solos do Planalto Sul Catarinense. (1) CH<sub>Alu1</sub>: Cambissolo Húmico aluminico 1; CH<sub>Alu2</sub>: Cambissolo Húmico aluminico 2; NV<sub>Alu</sub>: Nitossolo Vermelho aluminico; NB<sub>Dis</sub>: Nitossolo Bruno distrófico; NL<sub>Hum</sub>: Neossolo Litólico húmico, NL<sub>Dis</sub>: Neossolo Litólico distrófico. \*: significativo (0,01 < p < 0,05) pelo teste F.

diferenciada em relação a solos de outros locais, o que pode ser uma consequência dos elevados teores de matéria orgânica e de silte desses solos.

A relação entre UOC/LP é utilizada como indicador da umidade ideal de manejo para uma maior desagregação do solo, em caso de revolvimento. A vantagem de usar a relação UOC/LP é que o LP é uma determinação que exige apenas a disponibilidade de uma placa de vidro fosco, uma estufa e uma balança. Entretanto, não é possível obter essa relação em solos arenosos, os quais não possuem limite de plasticidade, como foi o caso do NL distrófico.

O Nitossolo Bruno apresenta a menor relação UOC/LP, o que indica que é o mais suscetível à compactação, pois o intervalo de umidade no qual o solo está friável se sobrepõe ao intervalo de umidade no qual o solo está mais suscetível à compactação. Por outro lado, o CH<sub>Alu2</sub> é menos suscetível à compactação, pois a sua UOC é maior do que o seu LP.

### CONCLUSÕES

1. A umidade ótima de compactação diminui nos solos mais arenosos, especialmente naqueles com predominância de areia fina, e aumenta naqueles com altos teores de argila ou carbono orgânico total e maiores limites de Atterberg.

2. A umidade ótima de compactação variou entre 0,76 e 1,05 vezes o limite de plasticidade, com relação direta com o teor de silte, indicando que a umidade ótima de compactação não pode ser avaliada pela determinação do limite de plasticidade do solo.

3. A densidade máxima de compactação aumenta em solos com o teor de areia total e areia fina e reduz em solos com maiores teores de argila e maiores limites de liquidez e de pegajosidade.

4. Os solos de altitude do Planalto Sul de SC têm relação UOC/LP diferente da de solos de outros locais, como consequência dos elevados teores de matéria orgânica e de silte desses solos.

### LITERATURA CITADA

ALMEIDA, J.A. & KAMPF, N. Caracterização mineralógica de Cambissolos derivados de rochas pelíticas nos patamares do Alto Itajaí e Planalto de Lages. R. Bras. Ci. Solo, 21:181-190, 1997.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. NBR 7182: Solo: Ensaio de compactação. Rio de Janeiro, 1986. 10p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - ASTM. D2487-06. "Standard practice for classification of soils for engineering purposes (Unified Soil Classification System)". Washington, 2008.

BAUMGARTL, T. & HORN, R. Effect of aggregate stability on soil compaction. Soil Tillage Res., 19:203-213, 1991.

BEUTLER, A.N.; CENTURION, J.F.; ROQUE, C.G. & FERRAZ, M.V. Densidade relativa ótima de Latossolos Vermelhos para a produtividade de soja. R. Bras. Ci. Solo, 29:843-849, 2005.

BENEZ, M.C. Dados e informações biofísicas da Unidade de Planejamento Regional Planalto Sul Catarinense - UPR 3. In: DUFLOTH, J.H.; CORTINA, N.; VEIGA, M. & MIOR, L.C., eds. Estudos básicos regionais de Santa Catarina. Florianópolis, EPAGRI, 2005. CD-ROM.

BRAIDA, J.A.; REICHERT, J.M.; VEIGA, M. & REINERT, D.J. Resíduos vegetais na superfície e carbono orgânico do solo e suas relações com a densidade máxima obtida no ensaio Proctor. R. Bras. Ci. Solo, 30:605-614, 2006.

BRAIDA, J.A.; REICHERT, J.M.; DALVAN, J.; REINERT, D.J. & VEIGA, M. Teor de carbono orgânico e a susceptibilidade à compactação de um Nitossolo e um Argissolo. R. Bras. Eng. Agric. Amb., 14:131-139, 2010.

BUCKMAN, H.O. & BRADY, N.C. Natureza e propriedade dos solos. 5.ed. Rio de Janeiro, Freitas Bastos, 1979. 647p.

CAPUTO, H.P. Mecânica dos solos e suas aplicações. 6.ed. Rio de Janeiro, Livros Técnicos e Científicos, 1987. 219p.

CARTER, M.R. Relative measures of soil bulk density to characterize compaction in tillage studies on fine sandy loams. Can. J. Soil Sci., 70:425-433, 1990.

CASAGRANDE, A. Classification and identification of soils. Am. Soc. Civil Eng., 113:901-930, 1948.

COMISSÃO DE QUÍMICA E FERTILIDADE DO SOLO – CQFS-RS/SC. Manual de adubação e de calagem para os estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina. 10.ed. Porto Alegre, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo/ Núcleo Regional Sul/UFRGS, 2004. 400p.

DALMOLIN, R.S.D.; GONÇALVES, C.N.; DICK, D.P.; KLAMT, E.; KNICKER, H. & KÖGEL-KNABNER, I. Organic matter characteristics and distribution in Ferralsols profiles of a climosequence in Southern Brazil. Eur. J. Soil Sci., 57:644-654, 2006.

DIAS JUNIOR, M.S. & MIRANDA, E.E.V. Comportamento da curva de compactação de cinco solos da região de Lavras (MG). Ci. Agrotec., 24:337-346, 2000.

DIAS JUNIOR, M.S. & PIERCE, F.J. Revisão de literatura: O processo de compactação do solo e sua modelagem. R. Bras. Ci. Solo, 20:175-182, 1996.

EKWUE, E.J. & STONE, R.J. Organic matter effects on the strength properties of compacted agricultural soils. Trans. Am. Soc. Agron. Eng., 38:357-365, 1995.

EKWUE, E.J. & STONE, R.J. Density-moisture relations of some Trinidadian soils incorporated with sewage sludge. Trans. Am. Soc. Agron. Eng., 40:317-323, 1997.

- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Manual de métodos de análise de solo. 2.ed. Rio de Janeiro, Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos, 1997. 212p.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Sistema brasileiro de classificação de solos. 2.ed. Rio de Janeiro, Embrapa Solos, 2006. 306p.
- 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. *R. Bras. Ci. Solo*, 24:487-493, 2000.
- GEE, G.W. & BAUDER, J.W. Particle-size analysis. In: KLUTE, A., ed. *Methods of soil analysis: Physical and mineralogical methods*. 2.ed. Madison, American Society of Agronomy, 1986. Part 1. p.383-411.
- GUBIANI, P.I.; REINERT, D.J. & REICHERT, J.M. Método alternativo para a determinação da densidade de partícula do solo - exatidão, precisão e tempo de processamento. *Ci. Rural*, 36:664-668, 2006.
- HÅKANSSON, I. A method for characterizing the state of compactness of the plough layer. *Soil Tillage Res.*, 16:105-120, 1990.
- HÅKANSSON, I. & LIPIEC, J. A review of the usefulness of relative bulk density values in studies of soil structure and compaction. *Soil Tillage Res.*, 53:71-85, 2000.
- HILLEL, D. *Environmental soil physics*. New York, Academic Press, 1998. 771p.
- KELLER, T. & HÅKANSSON, I. Estimation of reference bulk density from soil particle size distribution and soil organic matter content. *Geoderma*, 154:398-406, 2010.
- LIPIEC, J.; HÅKANSSON, I.; TARKIEWICZ, S. & KOSSOWSKI, J. Soil physical properties and growth of spring barley as related to the degree of compactness of two soils. *Soil Tillage Res.*, 19:307-317, 1991.
- MARCOLIN, C.D. *Propriedades físico-hídrico-mecânicas de solos sob plantio direto, na região de Passo Fundo - RS*. Passo Fundo, Universidade de Passo Fundo, 2006. 92p. (Tese de Mestrado).
- MARCOLIN, C.D. & KLEIN, V.A. Determinação da densidade relativa do solo por uma função de pedotransferência para a densidade do solo máxima. *Acta Sci. Agron.*, 33:349-354, 2011.
- MEURER, E.J.; RHENHEIMER, D. & BISSANI, C. Fenômenos de superfície. In: MEURER, E.J., ed. *Fundamentos de química do solo*. Porto Alegre, Genesis, 2000. 174p.
- OJENIYI, S.O. & DEXTER, A.R. Soil factors affecting the macrostructures produced by tillage. *Trans. Am. Soc. Agron. Eng.*, 22:339-343, 1979.
- OLIVEIRA, A.M.S. & BRITO, S.N.A. Caracterização e classificação dos solos. In: PASTORE, E.L. & FORTES, R.M., eds. *Geologia de engenharia*. São Paulo, ABGE, 1998. p.197-211.
- PANDOLFO, C.; BRAGA, H.J.; SILVA JR, V.P.; MASSIGNAM, A.M.; PEREIRA, E.S.; THOMÉ, V.M.R. & VALCI, F.V. *Atlas climatológico digital do Estado de Santa Catarina*. Florianópolis, EPAGRI, 2002. CD ROM.
- REICHERT, J.M.; SUZUKI, L.E.A.S.; REINERT, D.J.; HORN, R. & KANSSON, I.H. Reference bulk density and critical degree-of-compactness for no-till crop, production in subtropical highly weathered soils. *Soil Tillage Res.*, 102:242-254, 2009.
- SILVA, A.P.; LIBARDI, P.L. & CAMARGO, O.A. Influência da compactação nas propriedades físicas de dois Latossolos. *R. Bras. Ci. Solo*, 10:91-95, 1986.
- SKEMPTON, A.W. The colloidal "Activity" of clays. In: *INTERNATIONAL CONFERENCE ON SOIL MECHANICS AND FOUNDATION ENGINEERING*, 3., Zurich, 1953. Proceeding... Zurich, 1953. p.57-61.
- STANCATI, G.; NOGUEIRA, J.B. & VILAR, O.M. *Ensaio de laboratórios em mecânica dos solos*. São Carlos, Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, 1981. 208p.
- STONE, R.J. & EKWUE, E.I. Maximum bulk density achieved during soil compaction as effected by the incorporation of three organic materials. *Trans. Am. Soc. Agron. Eng.*, 36:1713-1719, 1993.
- 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. *Pesq. Agropec. Bras.*, 42:1159-1167, 2007.
- TAYLOR, H.M. & HENDERSON, D.W. Some effects of organic additives on compressibility of Yolo silt loam soil. *Soil Sci.*, 88:101-106, 1959.
- TEDESCO, M.J.; GIANELLO, C.; BISSANI, C.A.; BOHNEN, H. & VOLKWEISS, S.J. *Análise de solo, plantas e outros materiais*. 2.ed. Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1995. 174p.
- VARGAS, M. *Solos porosos e colapsíveis*. São Carlos, Departamento de Geotecnia - EESC - USP, 1993. 39p. (Apostila).