

JULIANA MAZZUCCO BOEIRA

**PROPRIEDADES FÍSICO-MECÂNICAS DE UM CAMBISSOLO HÚMICO E DE UM
NITOSSOLO BRUNO SOB CONDIÇÕES NATURAIS**

**Trabalho de conclusão de curso apresentado à
Coordenação de Curso do Programa de Pós
Graduação em Ciência do Solo do Centro de
Ciências Agroveterinárias – CAV da
Universidade do Estado de Santa Catarina –
UDESC para obtenção do Título de Mestre em
Ciência do Solo.**

Orientação: David José Miquelutti.

LAGES

2020

AGRADECIMENTOS

A Universidade de Santa Catarina – UDESC e ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo pela oportunidade do ensino gratuito e de qualidade.

A todos os professores do PPGCS pelos conhecimentos transmitidos, em especial ao meu orientador Prof. Dr. David José Miquelluti e aos membros do meu comitê de orientação Prof.(a) Dra. Letícia Sequinatto e Prof. Dr. Jean Alberto Sampietro.

Ao laboratório de pedologia, no qual realizei meu trabalho durante esse período e no qual convivi com colegas que em muito contribuíram para a realização desse trabalho.

Ao laboratório de operações e estradas florestais, do qual também obtive todo o suporte necessário.

A todos os colegas, mestrandos, doutorandos e bolsistas de iniciação científica que me auxiliaram em coletas, análises, estudos e compartilhamento de conhecimentos durante os dois últimos anos.

A Prefeitura Municipal de Lages e a Secretaria de Planejamento e Obras, da qual sou funcionária e obtive todo o apoio e compreensão durante esse período.

A todos os meus familiares e amigos que, por vezes, precisei abdicar da companhia, mas que, com suas presenças, compreensão e palavras de apoio puderam me dar suporte para a conclusão dessa etapa.

RESUMO

O presente trabalho teve por objetivo analisar as características físicas de textura, estrutura natural, compactação e consistência de um Cambissolo Húmico Alumínico típico e um Nitossolo Bruno Distrófico típico comparativamente aos seus respectivos teores de carbono orgânico. O Cambissolo Húmico localiza-se em Lages – SC, no campus da UDESC-CAV e o Nitossolo Bruno está localizado em Paineira – SC. Foram coletados anéis volumétricos em três profundidades de 2 a 7 cm, 7 a 12 cm e 12 a 17 cm para determinação de densidade do solo e porosidade total. Foram também coletadas amostras deformadas, em cada uma das camadas para a determinação de granulometria e uma amostra deformada da profundidade de 2 a 17 cm para a realização do ensaio Proctor de compactação, nas energias Normal e Intermediária, Limite de Liquidez (LL), Limite de Plasticidade (LP) e determinação de quantidade total de carbono orgânico. A partir dessas determinações obteve a densidade máxima ($D_{m\acute{a}x}$) e umidade ótima de compactação (UOC), o índice de plasticidade (IP) e a atividade da argila (A). O Cambissolo Húmico apresentou teor de argila médio de $364,3 \text{ g kg}^{-1}$ e o Nitossolo Bruno de $437,6 \text{ g kg}^{-1}$ e a textura de ambos foi classificada como franco-argilosa. O Cambissolo Húmico apresentou um teor de carbono orgânico de $46,9 \text{ g kg}^{-1}$ e o Nitossolo Bruno, de $62,1 \text{ g kg}^{-1}$. A densidade do solo do Cambissolo Húmico variou entre $1,12 \text{ g kg}^{-1}$ e $1,25 \text{ g kg}^{-1}$ e sua porosidade total entre 43,04% e 48,96%, enquanto densidade do solo do Nitossolo Bruno variou entre $1,03 \text{ g kg}^{-1}$ e $1,19 \text{ g kg}^{-1}$ e sua porosidade total entre 45,95% e 53,71%. A $D_{m\acute{a}x}$ do Cambissolo Húmico foi de $1,33 \text{ g cm}^{-3}$ na compactação com energia normal e $1,45 \text{ g cm}^{-3}$ com energia intermediária, atingindo as umidades ótimas para compactação em 26,64% e 25,90%, respectivamente. Para o Nitossolo Bruno, a $D_{m\acute{a}x}$ foi de $1,19 \text{ g cm}^{-3}$ na compactação com energia normal e $1,40 \text{ g cm}^{-3}$ com energia intermediária, atingindo suas umidades ótimas, para compactação em 39,92% e 32,95%, respectivamente. Os valores de LL e LP situaram-se na faixa de 53,37% e 53,16% e 35,55% e 40,00% para o Cambissolo Húmico e o Nitossolo Bruno, respectivamente. A susceptibilidade a compactação dos solos estudados foi inversamente proporcional aos seus teores de argila e de carbono orgânico. A aplicação de uma maior energia de compactação fez com que os solos atingissem a sua umidade ótima de compactação em menor conteúdo de água.

Palavras-chave: Propriedades físicas. Compactação do solo. Proctor.

ABSTRACT

The present work aimed to analyze the physical characteristics of texture, natural structure, compactness and consistency of a typical Cambissolo Húmico Alumínico típico and a Nitossolo Bruno Distrófico típico compared to their respective levels of organic carbon. The Cambissolo Húmico is located in Lages - SC, in the campus of UDESC-CAV and the Nitossolo Bruno is located in Painei - SC. Volumetric rings were collected at three depths, 2 to 7 cm, 7 to 12 cm and 12 to 17 cm to determine bulk density and total porosity. Deformed samples were also collected in each of the layers for the determination of soil texture and a sample from the depth of 2 to 17 cm for the Proctor compaction test, in normal and intermediate energies, liquidity limit (LL), plasticity limit (LP) and determination of total amount of organic carbon. From these determinations, the maximum density (D_{max}) and optimum compaction moisture (UOC), the plasticity index (PI) and the clay activity (A) were obtained. The Cambissolo Húmico had an average clay content of $364,3 \text{ g kg}^{-1}$ and the Nitossolo Bruno of $437,6 \text{ g kg}^{-1}$ and the texture of both was classified as clayey. Cambissolo Húmico had an organic carbon content of $46,9 \text{ g kg}^{-1}$ and Nitossolo Bruno, $62,1 \text{ g kg}^{-1}$. The Cambissolo Húmico bulk density varied between $1,12 \text{ g kg}^{-1}$ and $1,25 \text{ g kg}^{-1}$ and its total porosity between 43,04% and 48,96%, while the Nitossolo Bruno bulk density varied between $1,03 \text{ g kg}^{-1}$ and $1,19 \text{ g kg}^{-1}$ and its total porosity between 45,95% and 53,71%. The Cambissolo Húmico D_{max} was $1,33 \text{ g cm}^{-3}$ in the compaction with normal energy and $1,45 \text{ g cm}^{-3}$ with intermediate energy, reaching the optimum moisture for compaction in 26,64% and 25,90%, respectively. For Nitossolo Bruno, the D_{max} was $1,19 \text{ g cm}^{-3}$ in the compaction with normal energy and $1,40 \text{ g cm}^{-3}$ with intermediate energy, reaching its optimum humidity, for compaction in 39,92% and 32,95%, respectively. The values of LL and LP were in the range of 53,37% and 53,16% and 35,55% and 40,00% for Cambissolo Húmico and Nitossolo Bruno, respectively. The susceptibility to compaction of the studied soils was inversely proportional to their content of clay and organic carbon. The application of a higher compaction energy caused the soils to reach their optimum compaction moisture in a lower water content.

Keywords: Physical properties. Soil compaction. Proctor.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Triângulo textural com as 13 classes texturais.	14
Figura 2 - Fases do solo.	16
Figura 3 – Limites de consistência.	18
Figura 4 – Curva de compactação do solo obtida no ensaio de Proctor.	23
Figura 5 – Mapa de localização das amostras do Cambissolo Húmico.	27
Figura 6 – Mapa de localização das amostras do Nitossolo Bruno.	28
Figura 7 – Figura 7 – Curvas de compactação Proctor nas energias Normal e Intermediária, para o Cambissolo Húmico e o Nitossolo Bruno.	37
Figura 8 – Percentual de vazios antes e após a compactação pelo ensaio Proctor no Cambissolo Húmico e no Nitossolo Bruno	40
Figura 9 – Densidade do solo antes e após a compactação pelo ensaio Proctor no Cambissolo Húmico no Nitossolo Bruno	41

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – classificação da consistência conforme o índice de plasticidade	19
Tabela 2 – Granulometria do Cambissolo Húmico e do Nitossolo Bruno, em cada profundidade	34
Tabela 3 – Densidade de partículas (Dp) do Cambissolo Húmico e do Nitossolo Bruno.	35
Tabela 4 – Densidade do solo (Ds) e Porosidade Total (Pt) do Cambissolo Húmico e do Nitossolo Bruno em cada profundidade	35
Tabela 5 – Valores de limite de liquidez (LL) (%), limite de plasticidade (LP) (%) e índice de plasticidade (IP) (%) no Cambissolo húmico e no Nitossolo bruno	36
Tabela 6 – Atividade da argila.	36
Tabela 7 – Tabela 7 – Densidade máxima (DMáx) e umidade ótima de compactação (UOC) atingidas no ensaio Proctor para o Cambissolo Húmico e o Nitossolo Bruno, em duas energias de compactação.....	38
Tabela 8 – Grau de Compactação (%) do Cambissolo Húmico e do Nitossolo Bruno considerando a densidade máxima atingida no ensaio Proctor com energia normal e a com energia intermediária.	39
Tabela 9 – Relação entre Umidade ótima de compactação (UOC) atingida no ensaio Proctor e limite de plasticidade (LP), para o Cambissolo Húmico e o Nitossolo Bruno	42
Tabela 10 – Carbono orgânico do Cambissolo Húmico e do Nitossolo Bruno.	43

LISTA DE SIGLAS

A – Atividade da argila
COT – Carbono Orgânico Total
CV – Coeficiente de variação
Dmax – Densidade máxima
Dp – Densidade de partículas
Ds – Densidade do solo
GC – Grau de compactação
IP – Índice de plasticidade
IV – Índice de vazios
LC – Limite de contração
LL – Limite de liquidez
LP – Limite de plasticidade
MOS – Matéria orgânica do solo
Pt – Porosidade total
TFSA – Terra fina seca ao ar
TFSE – Terra fina seca em estufa
UOC – Umidade ótima para compactação

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	12
1.1. HIPÓTESES	13
1.2. OBJETIVOS	13
1.2.1. Geral.....	13
1.2.2. Específicos	13
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
2.1. PROPRIEDADES FÍSICAS	14
2.1.1 Textura do solo	14
2.1.2 Estrutura do solo	15
2.1.3 Densidade e porosidade do solo	16
2.1.4 Consistência do solo	18
2.1.5 Compactação do solo	20
2.2. INFLUENCIA DA MATÉRIA ORGÂNICA NAS PROPRIEDADES FÍSICAS DOS SOLOS.	24
2. MATERIAIS E MÉTODOS	27
3.1. SOLOS.	27
3.2. COLETA DE MATERIAIS	29
3.3. DETERMINAÇÕES DE LABORATÓRIO	29
3.3.1. Textura.....	29
3.3.2. Densidade de partículas	29
3.3.3. Densidade do solo	30
3.3.4. Porosidade total	30
3.3.5. Limite de Liquidez	30
3.3.6. Limite de plasticidade	31
3.3.7. Índice de plasticidade e atividade da argila	31
3.3.8. Ensaio Proctor	31
3.3.9. Grau de compactação	32
3.3.10. Índice de vazios do solo após compactação	32
3.3.11. Carbono orgânico total	32
3.4. ANÁLISE ESTATÍSTICA.....	33
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	34

4.1. TEXTURA	34
4.2. DENSIDADE DE PARTÍCULAS.	34
4.3. DENSIDADE DO SOLO E POROSIDADE TOTAL	35
4.4. LIMITES DE CONSISTÊNCIA	36
4.5. ENSAIO DE COMPACTAÇÃO PROCTOR	37
4.6. CARBONO ORGÂNICO.	42
5. CONCLUSÃO.....	44
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	45

1. INTRODUÇÃO

O Planalto Sul Catarinense apresenta baixos índices de produção e produtividade agrícola (RAIHER et. al., 2016), o que está relacionado à forma de cultivo e ao desconhecimento por parte dos produtores sobre o uso sustentável do solo. Muitas áreas são utilizadas, por exemplo, para a criação de bovinos, em pastejo em campo nativo. No entanto, não se dispõe de informações sobre a capacidade de suporte desses solos, que poderiam servir como orientação aos agricultores sobre as técnicas de manejo dessas áreas, priorizando o uso sustentável dos recursos naturais. Outras áreas da região são utilizadas para a produção de grãos e para o extrativismo da madeira; igualmente, nesse caso, há carência de informações referentes às propriedades mecânicas dos solos, no que diz respeito a sua compressibilidade, a qual indica a sua capacidade de suporte de carga para evitar a compactação irreversível, degradação da estrutura e empobrecimento do solo com repercussões nas suas funções básicas de suportar o crescimento vegetal.

Alakukku e Elomen (1994) afirmam que a compactação do solo é um dos fatores limitantes da qualidade física das terras agrícolas, prejudicando a obtenção de maiores índices de produtividade.

A compressibilidade dos solos, que dá a medida da capacidade de suporte dos solos, é influenciada, entre outras, pela granulometria e teores de matéria orgânica do solo. O teor de matéria orgânica em um solo pode ter forte influência sobre a compressibilidade do mesmo, devido a sua alta capacidade de absorção de água (SCHEINOST et al., 1997; CARVALHO et al., 1999; TORMASELLA et al., 2000). A influência que o material orgânico possui sobre a compressibilidade é dependente das propriedades de cada solo, podendo ser significativa ou não.

Considerando-se o alto teor de absorção de água que a matéria orgânica possui e a sua capacidade de aumentar a força de ligação entre as partículas minerais do solo (EKWUE, 1990; HORN & LEBERT, 1994; ZHANG, 1994, TRANNIN et al., 2008), é esperado que com a variação da quantidade de matéria orgânica no solo ocorra alguma alteração no seu comportamento mecânico, especialmente a susceptibilidade a compactação. Essa característica sofre influência da natureza das partículas, densidade do solo e umidade

Diversos estudos citados por Richart et. al. (2005) têm demonstrado que diferentes classes de solos apresentam comportamentos distintos quando submetidos ao processo de compactação, devido a vários fatores, tais como: energia de compactação, textura, teor de

matéria orgânica, umidade e história de tensão induzida pelos processos pedogenéticos ou devido ao manejo que o solo foi submetido no passado. Dessa forma, o estudo da compactação em diferentes classes de solos com diferentes graus de umidade, granulometria e teores de carbono orgânico é de grande importância.

1.1 HIPÓTESES

1. A textura e o teor de carbono orgânico influenciam na compactação do solo;
2. A umidade ótima para compactação será menor que a umidade correspondente ao Limite de Plasticidade.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Geral

Relacionar as características físicas de um Cambissolo e de um Nitossolo do Planalto Sul Catarinense aos diferentes teores de carbono orgânico, textura e ao grau de compactação do solo.

1.2.2 Específicos

1. Relacionar a umidade ótima para compactação e a densidade máxima atingida no ensaio Proctor aos teores de carbono orgânico e à textura do solo;
2. Relacionar o índice de vazios do solo compactado pelo ensaio Proctor ao tipo de solo e às umidades utilizadas;
3. Relacionar a umidade ótima de compactação cada um dos solos ao limite de plasticidade;
4. Relacionar o grau de compactação natural dos solos, nas diferentes camadas aos teores de carbono orgânico e à textura do solo;
5. Determinar qual a faixa de umidade recomendada para os solos serem trabalhados, mantendo a porosidade favorável ao crescimento de raízes.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

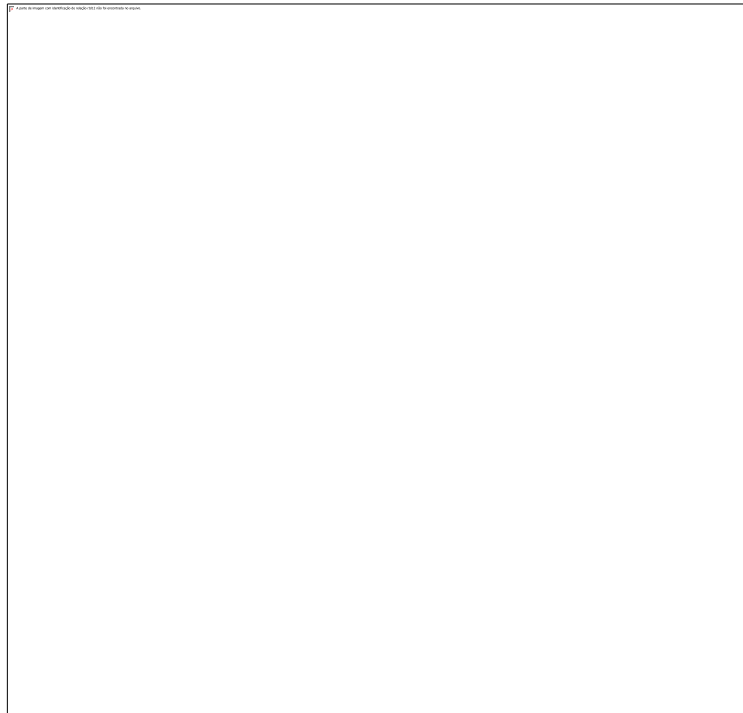
2.1 PROPRIEDADES FÍSICAS DO SOLO

2.1.1 Textura do solo

A textura do solo representa a distribuição quantitativa das partículas sólidas minerais quanto ao tamanho (FERREIRA, 2010). A distribuição do tamanho das partículas do solo interfere diretamente no grau de compactação, na disponibilidade de água, na capacidade de troca de cátions, além de afetar a dinâmica da adesão e coesão entre as partículas de solo (KLEIN, 2014).

A Sociedade Brasileira de Ciência do Solo (SBCS) define quatro classes de tamanho de partículas menores do que 2 mm, usadas para a definição da classe de textura dos solos (REINERT e REICHERT, 2006): Areia grossa – 2 a 0,2 mm ou 2000 a 200 μm ; Areia fina – 0,2 a 0,05 mm ou 200 a 50 μm ; Silte – 0,05 a 0,002 mm ou 50 a 2 μm ; Argila – menor do que 2 μm .

Figura 1 - Triângulo textural com as 13 classes texturais.



Fonte: Adaptado de Reinert e Reichert (2006).

Há diversas combinações possíveis de proporções entre essas frações texturais. Para classificação das classes texturais, pode-se utilizar um sistema de classificação gráfico e funcional para a definição das classes de textura dos solos (Figura 1).

Segundo EMBRAPA (2007), solos de textura arenosa, que possuem teores de areia superiores a 70% e de argila inferiores a 15%, são permeáveis, possuem baixa capacidade de retenção de água e baixos teores de matéria orgânica. Solos de textura média, que apresentam um certo equilíbrio entre os teores de areia, silte e argila, normalmente apresentam boa drenagem e boa capacidade de retenção de água. Finalmente, solos de textura argilosa, com teores de argila superiores a 35%, possuem baixa permeabilidade e alta capacidade de retenção de água e maior força de coesão entre as partículas.

2.1.2 Estrutura do solo

A estrutura do solo é a condição física do material do solo expressa pela dimensão, forma e arranjo das partículas sólidas e dos poros a elas associados, incluindo partículas primárias e as originadas pela união destas últimas (KLEIN, 2014).

Caputo (1988) resume da seguinte forma os principais arranjos das partículas do solo:

- Estrutura granular simples: Predominam as partículas dispostas pela própria ação da gravidade, apoiando-se umas sobre as outras. Estrutura característica das areias e pedregulhos.
- Estrutura alveolar: quando um grão cai sobre um sedimento já formado e há predominância da atração molecular sobre o seu peso, ele se fixa na posição em que se deu o primeiro contato, dispondo-se assim em forma de arcos. Estrutura comum em siltes finos e algumas areias.
- Estrutura floclulenta: Apenas possível de ocorrer em solos com partículas muito pequenas. As partículas, assim como na estrutura alveolar, depositam-se em arco, que, por sua vez, formam outros arcos. Na formação de tais estruturas desempenham uma função importante as ações elétricas entre as partículas.
- Estrutura em esqueleto: Ocorre nos solos onde há partículas de tamanhos variados. Os grãos mais grossos dispõem-se em forma de esqueleto, cujos interstícios são ocupados por estruturas de grãos mais finos.

Segundo Senço (2007), a estrutura alveolar é que acarreta a grande porosidade das argilas. Apesar disso, devido a sua estrutura, o solo no estado natural pode apresentar elevada

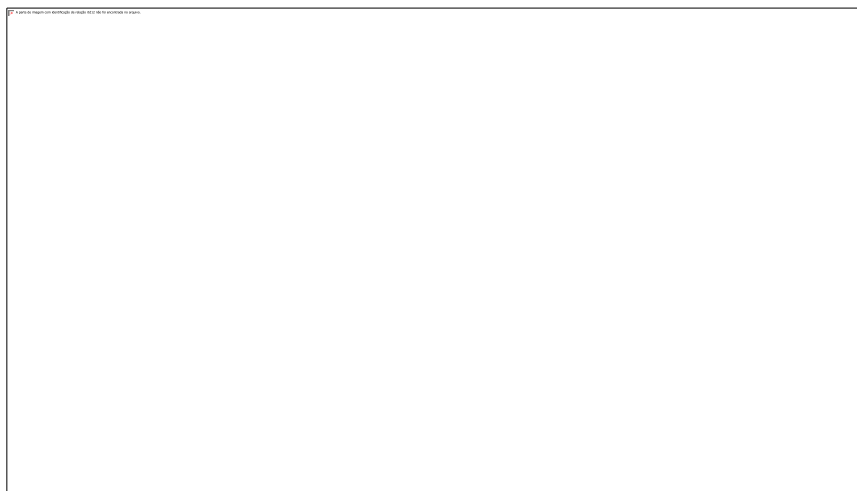
resistência, mas quando se destrói a estrutura de um solo as suas propriedades passam a ser reflexo da forma, da distribuição granulométrica e da composição mineralógica das partículas, podendo assim, perder muitas de suas características.

2.1.3 Densidade e porosidade do solo

A densidade e a porosidade são indicadores da qualidade física de um solo, pois tais características influenciam na infiltração de água no solo, na resistência ao crescimento de raízes e na difusão de gases. De modo geral, o solo mantido em estado natural, sob vegetação nativa, apresenta características físicas, como permeabilidade, estrutura, densidade do solo e porosidade, adequadas ao desenvolvimento normal de plantas (ANDREOLA et al., 2000). Porém, diante do desenvolvimento tecnológico observa-se uma crescente mecanização da produção resultando em um maior tráfego de maquinários sobre solos cultivados, e esse tráfego pode alterar a estrutura natural do solo, diminuindo sua porosidade e, como consequência, aumentando sua densidade.

O solo é um meio poroso, não rígido, trifásico (constituído pelas fases sólida, líquida e gasosa), formado por partículas que apresentam complexidade de forma, tamanho e estrutura mineralógica (REICHERT et. al, 2010). As propriedades de um solo dependem das características herdadas de sua rocha de origem, seu processo de formação (ação do intemperismo sobre o material de origem e ocorrência de processos de adição, remoção, transformação ou translocação de materiais), de sua constituição química e do tamanho das partículas e do arranjo delas em seu interior.

Figura 2 - Fases do solo.



Fonte: DNIT, 2006.

As relações entre a massa e o volume do solo permitem a identificação de propriedades físicas importantes, tais como densidade, porosidade, índice de vazios, grau de saturação, dentre outros. Todos esses índices físicos correlacionam-se entre si, permitindo a resolução de problemas referentes às três fases.

A densidade do solo é a relação entre a massa do solo e o volume que essa massa ocupa, relacionando-se diretamente à porosidade do solo (fase gasosa) e à densidade das partículas sólidas (fase sólida). Solos ou camadas mais arenosas apresentem valores mais elevados de densidade do solo (FERREIRA, 2010), devido a maior densidade de partículas da areia.

A densidade de partículas dependerá da proporção entre os minerais e materiais orgânicos constituintes do solo. Klein (2014) cita os seguintes valores estimados de densidade de partículas para os seguintes materiais: quartzo: 2,5 – 2,8 g/cm³; feldspato: 2,5 – 2,6 g/cm³; mica: 2,7 – 3,0 g/cm³; argila: 2,2 – 2,6 g/cm³ e matéria orgânica: < 1,00 g/cm³.

A porosidade total do solo é uma consequência da estrutura natural formada pelas partículas sólidas do solo. Segundo Hatano et al. (1988), existe uma estreita relação entre porosidade do solo e crescimento radicular.

Segundo Kiehl (1979), os solos arenosos possuem menor de porosidade total, variando entre 30% a 50%. Nos solos mais finos, a argila coloidal contribui para a formação de agregados, o que aumenta a porosidade, variando de 40% a 60%. Além da textura há também influência da matéria orgânica no aumento da porosidade, pois, além de contribuir para a agregação do solo, a matéria orgânica em si é um material poroso (KIEHL, 1979). O índice total de poros do solo é dividido em duas classes, de acordo com o seu diâmetro: macroporos, com diâmetro superior a 0,06mm e os microporos, com diâmetro inferior a 0,06mm (KIEHL, 1979).

Segundo Baver et al. (1972), os macroporos são os principais responsáveis pela infiltração e circulação rápida da água e pela aeração do solo. Nos microporos, em virtude do seu tamanho reduzido, a água circula lentamente pela ação das forças capilares, sendo eles responsáveis pela retenção e distribuição de água no solo. Acrescente-se, ainda, o conceito de porosidade de aeração, que, segundo Klein (2014), significa a quantidade de poros vazios de água, sendo os macroporos os responsáveis por essa aeração. Valores menores que 0,1m³/m³ de poros livres de ar limitam o pleno desenvolvimento do sistema radicular das plantas (ERICKSON, 1982; TORMENA et. al., 1998).

2.1.4. Consistência do solo

A consistência do solo é a manifestação das forças físicas de coesão e adesão atuando entre as partículas do solo em diferentes níveis de umidade (KLEIN, 2014). Além do teor de argila e do conteúdo de água no solo, outros fatores que podem afetar a consistência do solo são: o tipo de mineral de argila, a textura, o conteúdo de matéria orgânica e a estrutura do solo (REICHERT et. al., 2010).

A classificação do comportamento do solo quanto a consistência é feita a partir dos Limites de Atterberg (Figura 4), segundo o método desenvolvido no início do século XX, eles são representados pelo teor de umidade, em porcentagem, no qual ocorrem as transições de um estado para o outro, são: limite de contração (LC), limite de plasticidade (LP) e limite de liquidez (LL) (DAS, 2007):

Figura 3 – Limites de consistência.



Fonte: Caputo (1986).

Segundo Suzuki et. al. (2013), para que os efeitos da compactação sejam minimizados, é fundamental que as atividades agrícolas sejam realizadas na faixa de umidade do solo abaixo do limite de plasticidade, o que caracteriza seu estado de friabilidade. Abaixo desse limite o efeito lubrificante da água entre as partículas do solo é reduzido.

Dos limites de consistência derivam-se outros índices que definem o comportamento mecânico do solo, como o índice de plasticidade (IP), que informa a amplitude da faixa de plasticidade e é dado pela seguinte equação:

$$IP = LL - LP$$

O índice de plasticidade, portanto, indica uma faixa de conteúdo de água na qual o solo coesivo apresenta as propriedades de um material plástico (REICHERT et. al., 2010).

A consistência do solo pode ser determinada de acordo com o valor do índice de plasticidade (Tabela 1, KIEHL, 1979).

Tabela 1 – classificação da consistência conforme o índice de plasticidade.

Índice de Plasticidade	Consistência
1 a 7	Fracamente plástico
7 a 15	Medianamente plástico
Acima de 15	Altamente plástico

Fonte: Kiehl (1979)

A partir do índice de plasticidade obtém-se o índice de atividade da argila (A), resultante de atividades físicas e químicas decorrentes da carga superficial presentes na superfície do mineral. (CAPUTO, 1988).

$$A = \frac{IP}{\% < 0,002mm}$$

Em função desse valor as argilas classificam-se como inativas se $A < 0,75$, normais se $0,75 < A < 1,25$ e ativas se $A > 1,25$. Esse índice apresenta uma boa correlação com o tipo de argilomineral. (REICHERT et. al., 2010).

A presença de argilominerais no solo dá-se de forma de diferentes espécies minerais, cuja ocorrência é condicionada pelo material de origem, pelo intemperismo e pela pedogênese (KAMPF, MARQUES & CURI, 2012).

A estrutura dos argilominerais é formada por lâminas tetraedrais, ajustadas a lâminas octaedrais, formando camadas. As lâminas tetraedrais são formadas por tetraedros individuais compostos de um átomo de silício, ligado a quatro átomos de oxigênio, enquanto as lâminas octaedrais são constituídas por octaedros individuais constituídos por um átomo de alumínio e seis átomos de oxigênio. Essas lâminas se associam em unidades estruturais 1:1 (uma lâmina de tetraedros e uma de octaedros) ou 2:1 (uma lâmina de octaedros e duas de tetraedros) (KAMPF, MARQUES & CURI, 2012).

Minerais 2:1, por exemplo, a montmorilonita, em geral, apresenta alta atividade. (REICHERT et. al., 2010), enquanto minerais 1:1, como a caulinita, apresentam menor atividade (CAPUTO, 1988).

2.1.5. Compactação do solo

A compactação é definida como um aumento da densidade do solo, causado pelo homem ou por animais, resultado do rearranjo de partículas do solo e consequente redução da porosidade. O aumento da densidade do solo é chamado adensamento, quando é causado por processos pedogenéticos (REICHERT, 2010).

A compactação do solo pode ser causada pelo tráfego de máquinas agrícolas, equipamentos de transporte ou animais (LIMA, 2004) ou mesmo pelo impacto mecânico das gotas de chuva sobre a superfície do solo (SCHAEFER et. al., 2002).

Segundo Reichert (2010), as forças que atuam no solo e podem causar compactação são classificadas em externas e internas. O tráfego de veículos, animais ou pessoas, bem como o crescimento de certas raízes são responsáveis pelas forças externas. Os ciclos de umedecimento e secagem, congelamento e degelo, expansão e contração da massa do solo são responsáveis pelas forças internas.

O processo de compactação do solo é influenciado pela textura de suas partículas sólidas, a quantidade de matéria orgânica presente no solo, a umidade do solo no momento de aplicação da energia de compactação e da pressão exercida sobre o solo que, por sua vez, é dependente do peso do equipamento que transita sobre o solo e da área de contato dos seus rodados sobre o solo.

Segundo Caputo (1986), a compactação do solo reduz o volume de vazios e aumenta a resistência à penetração. Da compactação, resulta o aumento da densidade do solo, pela ação da pressão, impacto ou vibração; com a diminuição de vazios de tende a reduzir a variação dos teores de umidade do pavimento (DNIT, 2006).

Segundo Gonçalves et. al. (2006), a compactação do solo assume crescente importância em face à mecanização nas atividades agrícolas, plantio direto e aumento na intensidade de cultivo (safra e safrinha) acarretando elevação na resistência do solo ao crescimento de raízes, fazendo com que as mesmas se desenvolvam mais superficialmente. As alterações físicas, provocadas pela compactação, afetam o fluxo ou a concentração de água, oxigênio, dióxido de carbono, nutrientes e temperatura, que podem limitar o crescimento e desenvolvimento das plantas. (STEPNIEWSKI et al., 2002).

O aumento da densidade do solo e a diminuição de sua porosidade, em virtude do excessivo tráfego de máquinas, é um dos fatores que contribuem para a redução do crescimento das plantas e desenvolvimento das raízes (DUMAS et. al., 1973; MULLIGAN et al., 1985; HADAS et al., 1985).

Segundo Reichert et al. (2007) mesmo que um solo seja quimicamente bom, a compactação impede as plantas de se beneficiarem adequadamente dos nutrientes disponíveis. Isso ocorre devido ao fato de que a maior taxa da absorção de nutrientes se dá nas raízes novas e as mesmas tem seu desenvolvimento prejudicado na presença de compactação. Além disso, a compactação pode limitar a adsorção e a absorção de nutrientes, infiltração de água, trocas gasosas e desenvolvimento radicular, resultando no decréscimo da produção, aumento da erosão e da potência necessária para o preparo do solo (DIAS JUNIOR & PIERCE, 1995). A diminuição dos macroporos devido à compactação pode restringir a difusão de CO₂ e a entrada de O₂ (STARTSEV; McNABB, 2009).

A compactação também aumenta a perda de solo por erosão. Isso ocorre devido à dificuldade de infiltração da água da chuva no solo, através das camadas compactadas, o que faz com que essa água escoe superficialmente, levando consigo partículas de solo. Canillas e Salokhe (2002) apontam que a compactação dos solos tem sido um dos principais causadores da degradação de solos agrícolas.

Em solos arenosos, o atrito entre as partículas é maior, dificultando a movimentação dessas (LIMA, 2004). Já em solos formados por partículas de diferentes tamanhos, as menores podem encaixar-se nos espaços formados entre as partículas maiores, fazendo que esses solos, de forma geral, sejam mais facilmente compactados (TORRES; SARAIVA, 1999).

A umidade do solo, no momento da aplicação da energia, exerce influência sobre a compactação (SENÇO, 2007). Isso acontece porque a água tende a ser atraída para as partículas sólidas de forma a formar um filme ao seu redor, o que faz com que ela aja como lubrificante entre essas partículas, facilitando o deslizamento de uma sobre a outra, porém, após um certo valor de umidade, a compactação passa a ser dificultada pelo aumento do conteúdo de água, pois essa água excedente passa a ocupar os espaços onde antes havia partículas sólidas, fazendo com que a densidade do solo diminua.

O conteúdo crítico de água varia de solo para solo, visto que a quantidade de água suficiente para formar uma película de água entre as partículas sólidas do solo depende diretamente da área superficial específica dessas partículas, característica física dependente da quantidade e tipo de argila e teor de matéria orgânica do solo. Dias Junior e Miranda (2000) observaram que os valores das umidades ótimas de compactação seguiram uma ordem crescente de valores que seguiu a mesma tendência da ordem crescente para o teor de argila desses solos.

A matéria orgânica do solo é composta por material de origem vegetal ou animal em diferentes estados de decomposição, e seu acúmulo no solo geralmente está relacionado a uma

maior coesão entre as partículas minerais e maior retenção de água, características que podem influenciar a susceptibilidade a compactação.

O conteúdo de matéria orgânica pode aumentar a resistência do solo à compactação, devido ao aumento da coesividade, fazendo com que o limite de plasticidade seja maior. Isso faz com que o intervalo de umidade em que o solo pode sofrer tráfego seja maior (BRAIDA, et al., 2006; REICHERT et al., 2010). Segundo Soane (1990), existem vários mecanismos pelos quais a matéria orgânica influencia a resistência a compactação, tais como a força de união entre partículas e entre agregados, a elasticidade, o efeito de diluição, o efeito de cargas elétricas e o efeito na fricção.

Ao estudarem o efeito da incorporação de material orgânico no solo, Zhang, Hartge e Ringe (1997) afirmaram que a susceptibilidade do solo à compactação decresce com o incremento no teor de carbono orgânico no solo devido à redução da faixa de umidade na qual o solo exibe propriedades plástica.

Braida et. al. (2006), medindo a compactação do solo pelo ensaio Proctor, concluíram que o acúmulo de matéria orgânica tornou o solo mais resistente a compactação, por meio do aumento da umidade crítica e da redução da densidade.

Braida et al. (2010) sugerem que o acúmulo de matéria orgânica no solo está associado a mudanças na susceptibilidade a compactação, mas a magnitude e o tipo de efeito são dependentes da textura do solo e de efeitos associados sobre a retenção de água, coesão e densidade do solo. Além disso, foi encontrada correlação entre o aumento do teor de carbono orgânico e o aumento da elasticidade do solo (BRAIDA et al., 2008), propriedade que pode beneficiar a recuperação da estrutura do solo após o descarregamento.

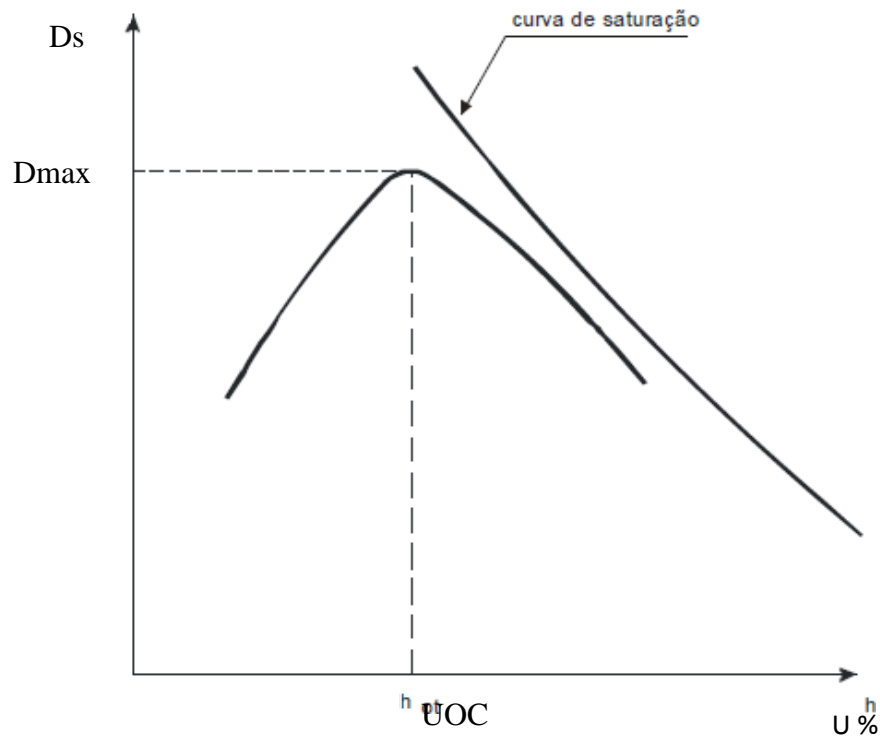
Morais et.al. (2017) encontraram valores baixos de densidade em solos sob sistema de manejo que apresentaram altos teores de carbono orgânico total, o que evidencia que o solo sofreu menos compactação.

A compressibilidade do solo é a capacidade que ele tem de reduzir o seu volume. Para avaliar essa característica, em 1933, Ralph R. Proctor observou que a densidade atingida na operação, dependia da umidade do solo, quando da compactação (SENÇO, 2007). Segundo Reichert et. al (2010), tal fenômeno ocorre, pois, em condições de baixo conteúdo de água, não há formação de um filme sobre as partículas do solo. À medida que o conteúdo de água no solo aumenta, o filme de água expande-se, formando uma película cada vez maior entre as partículas, que se orientam de modo a deslizar umas sobre as outras. Após atingir o conteúdo de água ótimo para compactação, ainda que a película aumente, ocorre redução da densidade do solo, em virtude do efeito da diluição sobre a concentração das partículas por unidade de volume.

O objetivo do ensaio de compactação Proctor, que consiste em compactar o solo em um cilindro em diferentes teores de umidade, é encontrar o teor de umidade ótimo, ou seja, que permita maior compactação e sem que a água ocupe o volume que seria ocupado pelas partículas sólidas do solo.

Com os valores de umidade de cada ensaio, calcula-se a massa específica e então pode ser traçado um gráfico no qual, o eixo das ordenadas representa os valores de Densidade do solo (D_s), e o eixo das abscissas os valores de umidade ($U\%$) em que as amostras foram compactadas, ligando os pontos do gráfico correspondentes a cada amostra, pode ser traçada a curva de compactação para o solo (Figura 4).

Figura 4 – Curva de compactação do solo obtida no ensaio de Proctor.



Fonte: DNIT (2006).

No ponto máximo da curva de compactação encontramos o valor do peso específico máximo e a umidade ótima de compactação.

Esse conteúdo crítico de água varia de solo para solo, visto que a quantidade suficiente para formar uma película entre as partículas sólidas do solo depende diretamente da área superficial específica dessas partículas, característica dependente da quantidade e tipo de mineral de argila e teor de matéria orgânica do solo. Dias Junior e Miranda (2000) observaram

que os valores das umidades ótimas de compactação relacionaram-se diretamente ao teor de argila desses solos.

O grau de compactação do solo depende, também, da energia empregada. Para cada energia de compactação, há uma umidade ótima. Conforme Pinto (2006) quando um solo se encontra abaixo da umidade ótima, uma energia de compactação maior provoca o aumento da densidade seca, mas, quando a umidade é maior que a ótima, a aplicação de uma energia maior, praticamente, não altera o grau compactação, pois o solo não consegue expelir o ar de seus vazios.

Segundo Lelis (2004), Proctor deu início aos estudos de compactação com a energia padrão Proctor Normal (5,95 kg/cm²). Na década de 40, ele aumentou a energia de compactação para o Proctor Modificado (27,35 kg/cm²). Posteriormente as empresas de pavimentação passaram a utilizar uma energia intermediária (12,93 kg/cm²). O ensaio Proctor pode ser executado com quaisquer das energias normatizadas, de acordo com a necessidade do estudo. Dificilmente em condições de campo, a energia aplicada pelos rodados das máquinas agrícolas atingirá a energia de compactação referente a energia Proctor Normal (KLEIN, 2014).

2.2. INFLUENCIA DA MATÉRIA ORGÂNICA NAS PROPRIEDADES FÍSICAS DOS SOLOS

A matéria orgânica do solo é produto de resíduos da biota, principalmente dos vegetais, parcialmente decompostos e sintetizados, em vários estádios de complexidade e diversidade estruturas (SILVA E RESCK, 1997; BATJES, 1999).

Do ponto de vista agrônômico, a MO pode ser dividida em uma fração lábil (ativa) e uma fração estável (passiva, humificada). A fração lábil é composta por substâncias de baixo peso molecular, por resíduos de plantas e de animais (fração leve, matéria orgânica grosseira ou particulada) e seus produtos primários de decomposição e pela biomassa microbiana. A fração estável é composta por macromoléculas orgânicas intrinsecamente resistentes ao ataque microbiano, devido a sua proteção química pela associação às superfícies minerais, ou pela localização no interior de agregados (PILLON, 2002).

A adição de matéria orgânica (MO) ao solo ocorre pela deposição de resíduos orgânicos, principalmente de origem vegetal. (PILLON, 2002), ela exerce influência em quase todas as propriedades do solo, atuando de maneira marcante no crescimento dos vegetais. A sua presença caracteriza solos de boa fertilidade, aos quais proporciona uma estruturação favorável à vida das plantas (KIEHL, 1979).

A matéria orgânica atua na regulação de vários processos do solo, como a ciclagem e a disponibilidade de nutrientes, a solubilização de fertilizantes, a complexação de metais tóxicos, o poder tampão, o fluxo de gases para a atmosfera e a estabilidade de agregados (STEVENSON, 1994).

O conteúdo de matéria orgânica do solo é considerado um dos principais indicadores de sustentabilidade e qualidade ambiental em agrossistemas. (ROSSI et. al., 2010). A dinâmica da matéria orgânica influencia os principais processos químicos, físicos e biológicos nos solos, e determina muitas vezes seu comportamento químico e fertilidade (COLEMAN et. al., 1989; HERMLE et al., 2008). O carbono promove aos solos melhor agregação, devido ao seu efeito cimentante sobre as partículas e agregados e, conseqüentemente tornam-se menos suscetíveis a compactação. (SILVA et. al., 2018)

Segundo Figueiredo, Ramos e Tostes (2008), a importância da matéria orgânica nos solos é abrangente. Sua atuação se dá tanto na melhoria das condições físicas, como na aeração, na maior retenção e armazenamento de água, quanto nas propriedades químicas e físico-químicas, no fornecimento de nutrientes às plantas e na maior capacidade de troca catiônica, além de proporcionar um ambiente adequado ao estabelecimento e à atividade da microbiota.

As influências mais evidentes da matéria orgânica do solo em relação às condições físicas do solo são: estabilização da temperatura do solo, favorecendo as plantas; aumento da capacidade de retenção de água no solo, favorecendo o desenvolvimento das raízes, principalmente em regiões com riscos de veranicos; melhor estabilidade dos agregados e redução do escoamento de água superficial, diminuindo os riscos de erosão (CONCEIÇÃO et al., 2005). Alguns estudos mostram que a estabilidade de agregados é positivamente correlacionada com a concentração de matéria orgânica do solo (MOS) (BLANCO-CANQUI & LAL, 2009).

Diversos estudos investigaram a influência da matéria orgânica nos atributos físicos do solo. Braida et. al (2006) concluiu que o acúmulo de matéria orgânica, reduz a densidade máxima e aumentou a umidade crítica para compactação do solo, significando que ele se tornou mais resistente à compactação.

Reichert et. al. (2018), estudou a compressibilidade e a elasticidade de solos subtropicais, e observou uma relação positiva entre o conteúdo de matéria orgânica e o coeficiente de compressibilidade, e uma relação negativa entre matéria orgânica e pressão de preconsolidação, o que sugere que solos com mais matéria orgânica são menos resistentes a compressão, porém podem se recuperar melhor da compactação. Assim como observado em

2008, por Braida, que concluiu que um aumento no teor de carbono orgânico resulta em aumento da elasticidade do solo.

A matéria orgânica também tem influência sobre o atrito existente entre as partículas do solo. Nos solos arenosos, onde o ângulo de atrito interno é alto, a matéria orgânica, por possuir partículas de menor tamanho e de menor dureza que as partículas minerais, ao recobrir os grãos de areia e preencher os espaços entre os mesmos, poderá reduzir o atrito e, portanto, reduzir o ângulo de atrito interno. Nos solos de textura média e argilosa, a matéria orgânica poderá elevar o ângulo de atrito interno interagindo ao favorecer a formação de agregados e por aumentar sua resistência (LEBERT & HORN, 1991).

Segundo Braida (2004), a matéria orgânica interfere na coesão do solo, devido a sua natureza coloidal, que lhe confere um elevado número de cargas superficiais e uma alta área superficial específica, bem como promove maior ligação entre as partículas minerais e aumenta a força de retenção de água. Dessa forma, pode-se dizer que a matéria orgânica pode interferir na resistência do solo à compactação através dos seguintes efeitos: a) aumento da força de ligação entre partículas minerais; b) aumento da elasticidade do solo; c) diluição da densidade; d) filamentos, como hifas de fungos e raízes, entrelaçam partículas do solo, mantendo-as juntas; e) algumas substâncias orgânicas, ao recobrir partículas de argila, podem mudar sua carga elétrica e facilitar o fluxo de água entre elas; f) substâncias orgânicas, ao reterem fortemente a água, podem aumentar a fricção entre as partículas minerais (SOANE, 1990).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 SOLOS

O estudo foi realizado utilizando-se dois solos, em condições naturais (sem uso antrópico), coletados no estado de Santa Catarina. O clima na região é do tipo Cfb, segundo classificação de Köppen (Pandolfo et al., 2002). 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).

O primeiro solo corresponde a um Cambissolo Húmico Alumínico léptico (EMBRAPA, 2018), o qual representa aproximadamente 69% dos solos do município de Lages (EPAGRI, 2002), localizado no Campus da UDESC, em Lages-SC, situado em uma área de relevo levemente ondulado, com vegetação natural e não utilizada para pastejo de animais, em latitude 27°47'31", longitude 50°18'22" e altitude 912m.

O segundo solo foi classificado como Nitossolo Bruno Distrófico típico (EMBRAPA, 2018), localizado às margens da SC 14, em Paineira – SC, a coleta foi realizada próxima ao talude da rodovia, em relevo ondulado, em área de vegetação natural sem acesso a pastejo de animais, em latitude 27°53'42", longitude 50°07'45" e altitude 1141m.

3.2 COLETA DE MATERIAIS

Foram realizadas coletas de amostras preservadas em anéis volumétricos de, aproximadamente, 5cm de altura e 7 cm de diâmetro em três profundidades: P1 – de 2 a 7 cm, P2 – de 7 a 12 cm e P3 – de 12 a 17 cm. Para o cada um dos solos foram coletados cinco anéis em cada profundidade para as determinações de densidade do solo (Ds) e porosidade total (Pt).

Para as determinações de granulometria foram coletadas amostras deformadas, também em cada uma das camadas supracitadas. Por questões operacionais, no Cambissolo foram coletadas amostras em cinco pontos e, no caso do Nitossolo, em quatro pontos.

Para realização do ensaio de compactação Proctor foi coletada uma amostra de cada solo, na profundidade de 2 a 17 cm.

3.3 DETERMINAÇÕES DE LABORATÓRIO

3.3.1. Textura

A distribuição granulométrica do solo foi determinada, com cinco repetições, pelo método da pipeta conforme EMBRAPA (1997). A preparação das amostras seguiu o método proposto por Suzuki et. al (2015), que consiste em agitar por 4 horas 50 g de TFSA em 70 ml de água, 10ml de NaOH (dispersante químico) e duas esferas de nylon ou technyl (dispersantes físicos).

Após a dispersão foi realizada a separação da areia por meio de peneiramento e lavagem, utilizando a peneira de malha 0,053mm, tendo logo abaixo uma proveta de 1000 ml, para a determinação do teor de argila. Esta foi realizada através da coleta com pipeta, na profundidade de 5 cm, após o tempo de sedimentação, calculado com base na média da temperatura das amostras (20,4°C), através da Lei de Stokes.

A areia restante na peneira foi então seca em estufa, para a determinação do teor de areia. O teor de silte foi determinado por diferença, conforme a seguir:

$$\% \text{ silte} = 100 - (\% \text{ argila} + \% \text{ areia})$$

3.3.2. Densidade de Partículas

O procedimento para a determinação da densidade de partículas (D_p) consistiu em transferir 20 gramas de TFSE para um balão volumétrico de 50ml e então lentamente adiciona-se álcool etílico até completar o volume do balão. Dessa forma, a D_p foi calculada através da seguinte expressão:

$$D_p = \frac{\text{massa da amostra}}{50 - \text{volume de álcool gasto}}$$

A determinação foi efetuada em triplicata.

3.3.3. Densidade do solo

As amostras foram preparadas regularizando-se as suas extremidades, de modo que a amostra representasse o volume real do anel. Posteriormente, os anéis com solo foram

transferidos para latas de alumínio previamente pesadas e levados para estufa a 105°C por 48 horas.

A densidade do solo (D_s) foi determinada pela fórmula:

$$D_s = \frac{\text{peso da amostra seca}}{\text{volume do anel}}$$

3.3.4. Porosidade total

A porosidade total (P_t) foi determinada indiretamente, a partir dos valores de densidade do solo e densidade de partículas, com o uso da fórmula:

$$P_t = 1 - \frac{D_s}{D_p}$$

3.3.5. Limite de Liquidez

O limite de liquidez (LL) foi determinado, com a utilização do aparelho de Casagrande, segundo Embrapa (1997), e calculado pela equação:

$$LL = U\% \times \left(\frac{N}{25}\right)^{0,12}$$

Em que LL é o limite de liquidez (%), representado pela umidade gravimétrica ajustada para 25 rotações do aparelho; U% é a umidade gravimétrica (%) correspondente às rotações da determinação; e N é o número de rotações da determinação.

3.3.6. Limite de Plasticidade

O limite de plasticidade (LP) foi determinado conforme EMBRAPA (1997), retirando-se 10 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.

3.3.7. Índice de plasticidade e Atividade da argila

O índice de plasticidade (IP) foi determinado pela diferença entre os limites de liquidez e o de plasticidade.

$$IP = LL - LP$$

A atividade da argila (A) foi calculada com base nos dados de percentual de argila e índice de plasticidade (IP).

$$A = \frac{IP}{\% < 0,002mm}$$

3.3.8. Ensaio de Proctor

O ensaio de Proctor foi realizado, utilizando-se duas energias de compactação (normal e intermediária), sem o reuso do material de solo, em duplicata, em cada umidade testada por perfil de solo, utilizando-se um equipamento automático (Solotest®), segundo ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas), de acordo com a norma NBR 7.182 (ABNT, 1986). Foi utilizado o cilindro Proctor pequeno, com volume de 1000cm³. Para as curvas de energia normal o solo foi compactado, em três camadas, aplicando-se sobre cada camada 26 golpes com o soquete pequeno, massa de 2,500kg e altura de lançamento de 305mm. Para as curvas de energia intermediária o solo foi compactado, em três camadas, aplicando-se sobre cada camada 21 golpes com o soquete grande, massa de 4,536kg e altura de lançamento de 457mm.

Após essas determinações, foram plotados gráficos com a umidade gravimétrica (variável independente) e a D_s (variável dependente), para cada classe de solo, conforme Stancati et al. (1981). Para cada solo foi ajustada uma equação polinomial de segundo grau. No seu ponto de máxima obteve-se, na abscissa, a densidade máxima (D_{máx}) e, na ordenada, a umidade ótima de compactação (UOC). A partir dessas determinações, foi calculada a densidade relativa (D_r), utilizando-se a equação $D_r = D_s/D_{máx}$.

3.3.9. Grau de compactação

O grau de compactação (GC), ou densidade relativa, foi obtido com o uso da seguinte relação:

$$G_c = \frac{D_s}{D_{m\acute{a}x}}$$

3.3.10. Índice de vazios do solo após compactação

O índice de vazios (IV) representa a fração de espaços vazios (fase gasosa) que permanecem no solo após a sua compactação, ou seja, é um índice correspondente à porosidade, e pode ser calculado pela mesma expressão, através dos valores de densidade do solo (após compactação) e densidade de partículas:

$$IV = 1 - \frac{D_{m\acute{a}x}}{D_p}$$

3.3.11. Carbono Orgânico

Para a determinação do carbono orgânico total (COT) as amostras de solo foram maceradas em almofariz e peneiradas (malha de 0,053 mm) sendo analisadas por combustão seca a 950 °C no analisador TOC modelo multi/NC 2100, equipado com módulo para sólidos.

As determinações foram efetuadas em quintuplicata.

3.4. ANÁLISES ESTATÍSTICAS

Os resultados foram submetidos a análise descritiva e análise probabilística (quando foi o caso) pelo teste F, de acordo com o delineamento inteiramente casualizado. Quando houve significância, as médias foram testadas pelo teste DMS (t). Foram ajustadas curvas de regressão polinomial aos resultados dos ensaios de compactação Proctor. Todas as análises foram conduzidas com o uso do software R (R Core Team, 2019) e adotado o nível mínimo de significância de 5%.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 TEXTURA

Os teores de argila variaram entre 352,5 e 507,2 g kg⁻¹, os de areia entre 119,3 e 263,1 g kg⁻¹ e os de silte entre 373,5 e 492,5 507,2 g kg⁻¹ (Tabela 2).

Tabela 2 – Granulometria do Cambissolo Húmico e do Nitossolo Bruno, em cada profundidade.

Prof.	Argila		Silte		Areia	
	Cambissolo	Nitossolo	Cambissolo	Nitossolo	Cambissolo	Nitossolo
-----g kg ⁻¹ -----						
2-7cm	352,5 aA	353,1 aC	482,3 aA	383,8 bA	165,3 bA	263,1 aA
7-12cm	375,8 bA	452,6 aB	470,3 aA	392,9 bA	153,8 aA	154,6 aB
12-17cm	364,6 bA	507,2 aA	492,5 aA	373,5 bA	142,9 aA	119,3 aB
CV (%)	10,59		13,45		26,35	

Fonte: elaborado pela autora, 2020.

Médias seguidas pela mesma letra minúscula na horizontal e maiúscula na vertical, dentro de cada parâmetro, não diferem pelo teste DMS (P > 0,05).

Os maiores teores de argila foram observados no Nitossolo Bruno, na camada de 12-17m, enquanto o Cambissolo Húmico apresentou os maiores teores de silte, na média das três camadas estudadas (Tabela 2). Esta variação pode ser atribuída à litologia dos solos, e aos seus processos de formação. O Cambissolo, por ser um solo mais intemperizado, apresentou quantidades menores de argila em todas as camadas, enquanto o Nitossolo apresentou um incremento na quantidade de argila com a profundidade. De acordo com a textura, ambos os solos foram enquadrados na classe textural franco-argilosa.

4.2. DENSIDADE DE PARTÍCULAS

Os valores de densidade de partículas foram semelhantes (Tabela 3). Assumindo-se uma densidade de partículas média em solos tropicais e subtropicais de 2,65 g cm⁻³, estes valores são considerados baixos, o que pode ser atribuído aos teores de matéria orgânica observados nos dois solos.

Tabela 3 – Densidade de partículas (Dp) do Cambissolo Húmico e do Nitossolo Bruno.

Solo	Dp -----g cm ⁻³ -----
Cambissolo	2,20 b
Nitossolo	2,22 a
CV (%)	3,49

Fonte: elaborado pela autora, 2020.

Médias seguidas pela mesma letra não diferem pelo teste DMS (P > 0,05)

4.3. DENSIDADE DO SOLO E POROSIDADE TOTAL

A densidade do solo variou de 1,03 g cm⁻³ a 1,25 g cm⁻³ enquanto a porosidade total variou de 43,04% a 53,71% (Tabelas 4).

Tabela 4 – Densidade do solo (Ds) e Porosidade Total (Pt) do Cambissolo Húmico e do Nitossolo Bruno em cada profundidade.

Prof.	Ds		Pt	
	Cambissolo ----- g cm ⁻³ -----	Nitossolo ----- g cm ⁻³ -----	Cambissolo ----- % -----	Nitossolo ----- % -----
2-7cm	1,12 bA	1,03 bB	48,96 aB	53,71 aA
7-12cm	1,25 aA	1,16 aB	43,04 bB	47,86 bA
12 a 17cm	1,25 aA	1,19 aB	43,04 bB	45,95 bA
CV (%)	6,27		7,03	

Fonte: elaborado pela autora (2020).

Médias seguidas pela mesma letra minúscula na horizontal e maiúscula na vertical, dentro de cada parâmetro, não diferem pelo teste DMS (P > 0,05)

As maiores densidades do solo foram observadas na profundidade de 7-12 cm e de 12-17 cm do Cambissolo Húmico, enquanto os maiores valores de porosidade total encontraram-se na profundidade 2-7 cm do Nitossolo Bruno.

Os menores valores de densidade observados no Nitossolo Bruno, possivelmente, devem-se aos maiores teores de argila e de matéria orgânica encontrados neste solo. Silva et. al (2018) observaram uma relação inversa entre densidade do solo e carbono orgânico total em um Argissolo Vermelho- Amarelo. Segundo os autores, isso se deve ao baixo peso específico da matéria orgânica e ao seu efeito integrado nos atributos físicos e químicos do solo, que atuam na melhoria da qualidade da estrutura.

4.4. LIMITES DE CONSISTÊNCIA E ATIVIDADE DA ARGILA

A tabela 5 mostra os valores de umidade correspondentes aos limites de liquidez, limites de plasticidade e os índices de plasticidade.

O Nitossolo Bruno atingiu o seu limite de plasticidade em uma umidade 12,5% superior ao Cambissolo Húmico. Isso, provavelmente se deve ao maior teor de argila e de matéria orgânica presente nesse solo. Resultados semelhantes foram observados por Ellies e Gayosos (1986) em solos de origem vulcânica, no Chile, e por Marcolin et. al. (2006), que observaram o aumento do limite de plasticidade com o aumento dos teores de argila.

Tabela 5 – Valores de limite de liquidez (LL) (%), limite de plasticidade (LP) (%) e índice de plasticidade (IP) (%) no Cambissolo húmico e no Nitossolo bruno.

	Cambissolo	Nitossolo
LL	53,37	53,16
LP	35,55	40,00
IP	17,82	13,16

Fonte: Elaborado pela autora (2020).

Segundo a classificação de Kiehl (1979), de consistência do solo, baseada no índice de plasticidade, o Cambissolo Húmico é classificado como altamente plástico e o Nitossolo Bruno é classificado como medianamente plástico.

Pode-se verificar que o Nitossolo Bruno, requer um maior teor de umidade para atingir um comportamento plástico, porém, uma quantidade menor de água para iniciar a comportar-se como um líquido, o que significa que embora este solo possua partículas com grande capacidade de absorção de água, ele se comporta de forma plástica em uma menor faixa de umidade.

Os valores de atividade de argila (A) são apresentados na Tabela 6. Eles correspondem à atividade de Skempton e são determinados pelo quociente entre o índice de plasticidade e o teor de argila.

Tabela 6 – Atividade da argila

SOLO	CAMBISSOLO	NITOSSOLO
IP	17,82	13,16
% argila médio	36,43	43,76
A	0,49	0,30

Fonte: Elaborado pela autora (2020).

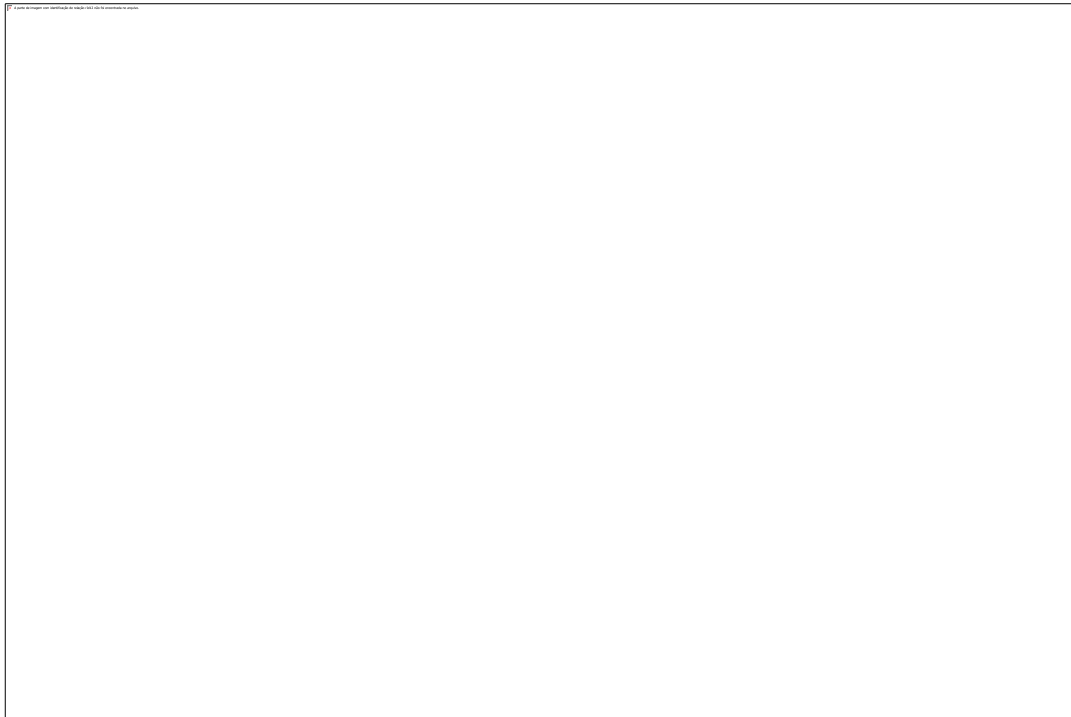
Esse índice, foi igual a 0,49 para o Cambissolo e de 0,30 para o Nitossolo, o que classifica ambos os solos como solos com argila de baixa atividade.

Segundo Caputo (1988), as argilas com menor atividade são as caulinitas. Esse índice pode, portanto, ser um indicador da provável constituição mineral desses solos.

4.5. ENSAIO DE COMPACTAÇÃO PROCTOR

Na figura 7, estão representadas as curvas de compactação no ensaio de Proctor, para os dois solos nas duas energias de compactação utilizadas.

Figura 7 – Curvas de compactação Proctor nas energias Normal e Intermediária, para o Cambissolo Húmico e o Nitossolo Bruno



Fonte: elaborado pela autora (2020).

(a) Cambissolo Húmico – energia Normal; (b) Cambissolo Húmico – energia Intermediária; (c) Nitossolo Bruno – energia Normal; (d) Nitossolo Bruno – Energia Intermediária.

Na tabela 7 são apresentados os valores de densidade máxima ($D_{m\acute{a}x}$) e umidade ótima de compactação (UOC) para o Cambissolo Húmico e o Nitossolo Bruno, em ambas as energias utilizadas.

Tabela 7 – Densidade máxima (DM_{máx}) e umidade ótima de compactação (UOC) atingidas no ensaio Proctor para o Cambissolo Húmico e o Nitossolo Bruno, em duas energias de compactação.

Energia de compactação	D _{máx}		UOC	
	Cambissolo	Nitossolo	Cambissolo	Nitossolo
	-----g cm ⁻³ -----		-----%-----	
Normal	1,33	1,19	26,64	39,92
Intermediária	1,45	1,40	25,90	32,95

Fonte: elaborado pela autora, 2020.

Nos ensaios de compactação, as densidades máximas atingidas variaram de 1,19 g cm⁻³ a 1,45 g cm⁻³ e as umidades ótimas para compactação, de 25,9% e 39,92%. O Nitossolo Bruno apresentou os menores valores de densidade máxima e maiores valores de umidade ótima de compactação para o ensaio Proctor em ambas as energias de compactação.

Os menores valores de densidade máxima atingidos, assim como os maiores valores de umidade ótima para compactação determinados no Nitossolo Bruno, podem ser atribuídos ao maior teor de argila e carbono orgânico deste solo. Isso se deve ao fato de as argilas possuírem maior área superficial específica, conseqüentemente, um solo com maior teor de argila requer uma maior quantidade de água para formar um filme entre as partículas, facilitando o seu deslizamento e resultando no aumento da compactação. Este comportamento também pode ser atribuído a matéria orgânica do solo, a qual apresenta grande capacidade de absorção de água.

Esses resultados corroboram o que foi observado por Braida et. al. (2006) e Reichert et. al. (2010), que afirmam que o conteúdo de matéria orgânica pode aumentar a resistência a compactação. Braida (2004), baseado em diversos estudos, afirma que a susceptibilidade à compactação, avaliada pelo ensaio Proctor, torna-se menor à medida que cresce a quantidade de material orgânico existente no solo e que, em geral, para um mesmo nível de energia, quanto maior o teor de matéria orgânica do solo, menor é o valor de densidade máxima obtido e maior é o teor de água necessário para atingi-lo. Marcolin e Klein (2011), também encontraram ajustes lineares negativos da densidade máxima em função do teor de argila e da densidade máxima em função do carbono orgânico.

O Cambissolo Húmico atingiu uma densidade máxima 11,76% maior que o Nitossolo Bruno, quando utilizada a energia de compactação normal, e 3,57% maior, para a energia de compactação normal. O incremento na densidade máxima seguindo o aumento de energia aplicada foi maior no Nitossolo Bruno também pode ser explicado pelo maior teor de argila

deste solo. Como as partículas de argila são menores, a aplicação de uma energia de compactação maior permite a aproximação entre as partículas, após terem a sua estrutura natural alterada, em comparação com aquela atingida pelo Cambissolo Húmico, nas mesmas condições de compactação.

Segundo Richart (2005), não existe consenso entre os autores sobre o nível crítico da densidade do solo, ou seja, o valor acima do qual o solo é considerado compactado. Torres e Saraiva (1999) afirmam que a densidade varia de acordo com as características do solo, sendo que em solos argilosos varia de 1,0 a 1,45 Mg m⁻³ para condições de mata e muito compactados, respectivamente. Camargo e Alleoni (1997) consideram crítico o valor de 1,55 Mg m⁻³ em solos franco-argilosos a argilosos.

O grau de compactação variou de 83,30% a 99,8%, considerando as densidades máximas atingidas no ensaio Proctor Normal e, de 77,32% a 86,29%, considerando as densidades máximas atingidas no ensaio Proctor intermediário (Tabela 7).

Tabela 8 – Grau de Compactação (%) do Cambissolo Húmico e do Nitossolo Bruno considerando a densidade máxima atingida no ensaio Proctor com energia normal e a com energia intermediária.

Prof.	Energia normal		Energia intermediária	
	Cambissolo	Nitossolo	Cambissolo	Nitossolo
2-7cm	83,30	86,01	77,32	73,33
7-12cm	94,07	96,87	86,28	82,59
12-17cm	94,08	99,8	86,29	85,09

Fonte: elaborado pela autora, 2020.

O Nitossolo Bruno apresentou o maior grau de compactação, o que pode ser atribuído ao fato desse solo ter sido naturalmente compactado (adensamento) ou que ele seja pouco suscetível a compactação, pois a sua densidade não foi significativamente aumentada após a compactação no ensaio de Proctor.

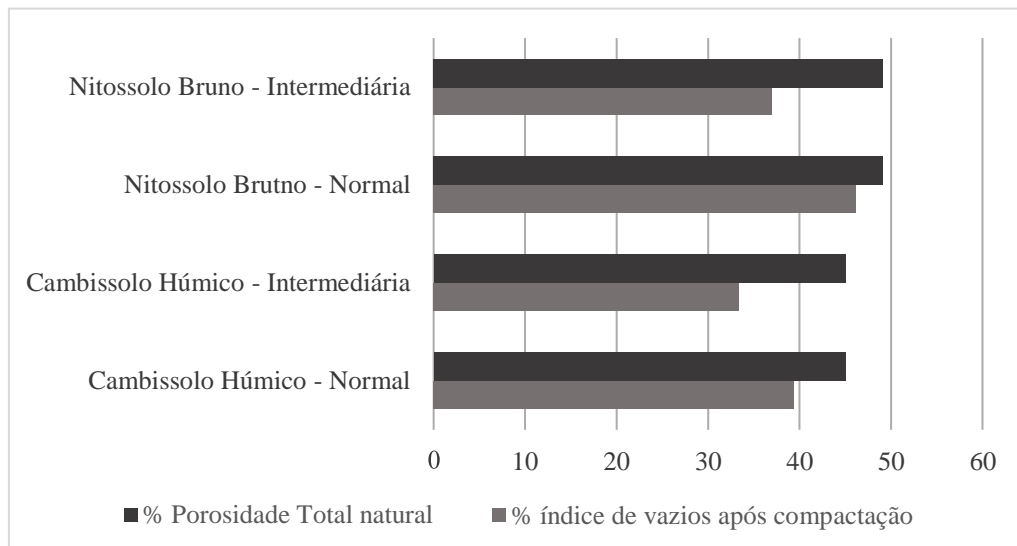
No geral, mesmo em condições naturais, ambos os solos exibem um alto grau de compactação, o que poderia comprometer o crescimento da vegetação. Carter (1990) observou um menor rendimento na cultura de cereais quando o grau de compactação do solo era superior a 89,0%. Lipiec et. al. (1991) também observou um menor rendimento de plantas e cereais em solos com grau de compactação superiores a 91,0% e 88,0%, respectivamente. Embora o grau de compactação dos solos estudados seja semelhante ou superior aos limites críticos apontados,

não se observou quaisquer restrições ao crescimento da vegetação de campo nativo no local, indicando que este tipo de vegetação não apresenta as mesmas limitações para se desenvolver em solos com alto grau de compactação, comparativamente às culturas anuais.

Pode-se ainda, observar que o grau de compactação tende, de modo geral, a aumentar com a profundidade (Tabela 8), o que é esperado, visto que nas camadas superiores a atividade biológica e a penetração de raízes tendem a gerar uma maior porosidade, além de representarem um incremento no teor de matéria orgânica.

O percentual do índice de vazios após a compactação foi reduzido, em ambas as energias de compactação, considerando como condição inicial a média da porosidade natural do solo nas três camadas (Figura 8).

Figura 8 – Percentual de vazios antes e após a compactação pelo ensaio Proctor no Cambissolo Húmico e no Nitossolo Bruno.



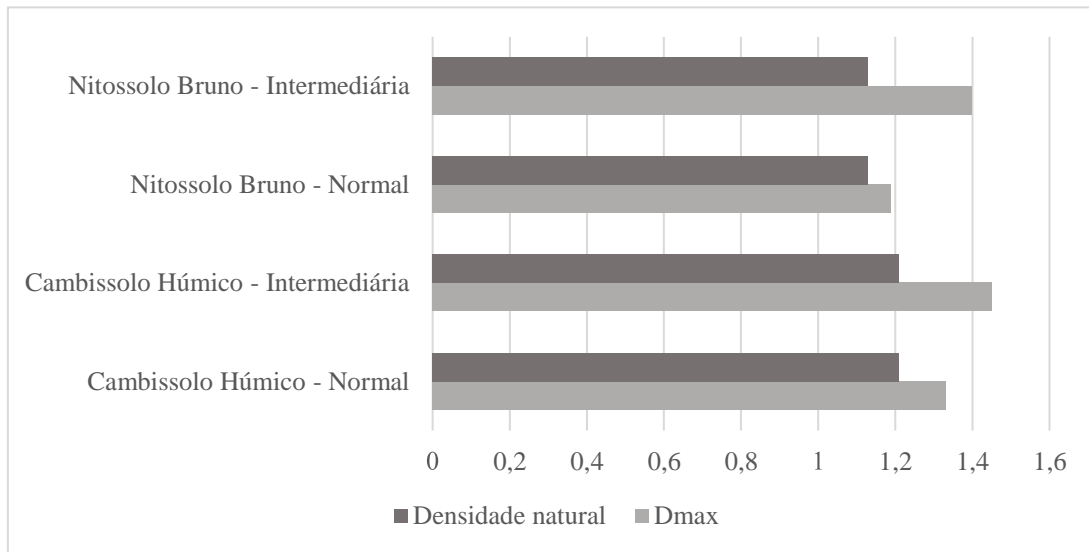
Fonte: elaborado pela autora, 2020.

No Cambissolo Húmico observou-se uma redução de 12,53% no total de poros quando foi utilizada a energia de compactação normal e de 24,68% no caso da energia intermediária. No Nitossolo Bruno, essa redução foi de 5,98% e 24,87%, respectivamente.

A redução da porosidade total do solo, no caso da compactação ocorre, principalmente pela diminuição da macroporosidade o que, provavelmente, influenciará negativamente a drenagem de água e a aeração do solo.

O mesmo comportamento pode ser constatado quando se compara a densidade natural desses solos e a densidade máxima atingida na compactação Proctor (Figura 9).

Figura 9 – Densidade do solo antes e após a compactação pelo ensaio Proctor no Cambissolo Húmico no Nitossolo Bruno.



Fonte: elaborado pela autora (2020).

A densidade máxima no Cambissolo Húmico foi 9,02% e 16,55%, respectivamente, superior à densidade natural do solo, quando se utilizou a energia de compactação normal e a intermediária. No Nitossolo Bruno os percentuais de incremento, nas mesmas condições foi de 5,04% e 19,29%, respectivamente.

Foi observado também que, para o Cambissolo Húmico, a mudança da energia de compactação de normal para intermediária incrementou a densidade máxima do solo em apenas 8,28%, enquanto isso, o Nitossolo Bruno, mesmo tendo sua densidade natural pouco aumentada pela compactação com energia normal, com a mudança para a energia intermediária, teve sua densidade máxima incrementada em 15,00%. Isso indica que a compactação do Nitossolo é mais influenciada pelo fator externo de energia de compactação.

Uma relação importante na análise da compactação é aquela entre a umidade em que um solo atinge o seu limite de plasticidade (LP) e a umidade ótima de compactação (UOC) (Tabela 9).

Tabela 9 – Relação entre Umidade ótima de compactação (UOC) atingida no ensaio Proctor e limite de plasticidade (LP), para o Cambissolo Húmico e o Nitossolo Bruno.

Solo	Energia de Compactação	UOC/LP
Cambissolo	Normal	0,79
	Intermediária	0,77
Nitossolo	Normal	1,00
	Intermediária	0,82

Fonte: elaborado pela autora, 2020.

A relação UOC/LP indica uma boa estimativa do teor de umidade em que o solo está mais suscetível à compactação, visto que a determinação do limite de plasticidade (LP) é mais simples e mais acessível que o ensaio Proctor. Nos solos analisados, a relação UOC/LP observada ficou entre os valores de 0,79 e 1,00. Esta relação foi menor para o Cambissolo Húmico, em ambas as energias de compactação (Tabela 9).

Outros trabalhos que estudaram a compactação do solo pela metodologia Proctor encontraram valores semelhantes para essa relação. Luciano et. al. (2012) encontrou uma relação UOC/LP variando entre 0,76 e 1,05 para cinco solos compactados na energia normal. Braida (2006) encontrou uma relação UOC/LP média de 0,78 para um Nitossolo.

Isso indica que a quantidade de água necessária para formar um filme lubrificante entre as partículas e facilitar a sua máxima compactação é, em geral, igual ou menor que a quantidade de água necessária para que o solo possa ser moldado (estado plástico). Também foi observado que a relação UOC/LP foi menor para a aplicação da energia de compactação intermediária do que para a aplicação da energia normal em ambos os solos. Isso se deve ao fato de a UOC ter sido atingida em uma umidade menor quando a aplicação da energia de compactação foi maior.

4.6. CARBONO ORGÂNICO

Os teores de carbono orgânico variaram de 46,9 no Cambissolo Húmico a 62,1 g kg⁻¹ no Nitossolo Bruno (Tabela 10), valores considerados altos de acordo com CQFS-RS/SC (2004).

Tabela 10 – Carbono orgânico do Cambissolo Húmico e do Nitossolo Bruno.

Solo	Carbono orgânico ----- g kg ⁻¹ -----
Cambissolo	46,9 b
Nitossolo	62,1 a
CV (%)	12,00

Fonte: elaborado pela autora, 2020.

Médias seguidas pela mesma letra não diferem pelo teste DMS ($P > 0,05$).

Os teores de carbono orgânico variaram de 46,9 no Cambissolo Húmico a 62,1 g kg⁻¹ no Nitossolo Bruno (Tabela 3), valores considerados altos de acordo com CQFS-RS/SC (2004).

Alguns trabalhos conduzidos na mesma gleba amostrada no presente estudo encontraram menores valores de carbono orgânico para o Nitossolo Bruno. Silva (2019) observou valores em torno de 46 g kg⁻¹, enquanto, Andognini, (2019) encontrou valores em torno de 53 g kg⁻¹. Essa variação, possivelmente, é devida à variação espacial no local de coleta.

Conforme mencionado anteriormente, diversos estudos sugerem que a maior presença de matéria orgânica no solo está ligada a uma maior resistência a compactação e a menores valores de densidade máxima (BRAIDA et. al., 2006; BRAIDA, 2004. REICHERT et. al., 2010). Klein (2014) observou que existe uma relação inversa entre o teor de matéria orgânica e a densidade máxima atingida pelo solo. Ainda, de acordo com este autor, isto pode ocorrer devido ao efeito positivo da matéria orgânica na estabilidade estrutural do solo, ou à baixa densidade do material orgânico.

5. CONCLUSÃO

Em condições naturais, o solo com maior teor de argila e carbono orgânico apresentou menor densidade do solo e maior porosidade total.

A susceptibilidade a compactação dos solos estudados foi inversamente proporcional aos seus teores de argila e de carbono orgânico.

A aplicação de uma maior energia de compactação fez com que os solos atingissem a sua umidade ótima de compactação em menor conteúdo de água.

A umidade ótima de compactação foi atingida entre 77% e 100% da umidade correspondente ao limite de plasticidade.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABEELS, P.F.J. Tire deflection and contact studies. *J.Terramechanics*, v.13, n.3, p.183-96, 1976.

AL-ADAWI, S.S., REEDER, R.C. Compaction and subsoiling effects on corn and soybean yields and soil physical properties. *Trans.ASAE (Am.Soc.Agric.Eng.)*, v.39, n.5, p.1641-9, 1996.

ALAKUKKU, L.; ELOMEN, P. Long-term effects of a single compaction by heavy field traffic on yield and nitrogen uptake of annual crops. *Soil and Tillage Research, Amsterdam*, v.36, p.141-152, 1994.

ANDOGNINI, J. Efeito Do Grau de Compactação nos atributos físicos de solos de Santa Catarina e nas características produtivas e nutritivas da aveia preta. 2019. 88p. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo), Universidade de Santa Catarina, Lages, SC.

ANDREOLA, F.; COSTA, L.M. & OLSZEWSKI, N. Influência da cobertura vegetal de inverno e da adubação orgânica e, ou, mineral sobre as propriedades físicas de uma Terra Roxa Estruturada. *R. Bras. Ci. Solo*, 24:857-865, 2000.

ARVIDSSON, J., RISTIC, S. Soil stress and compaction effects for four tractor tyres. *J.Terramechanics*, v.33, n.5, p.223-32, 1996.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6457: Amostras de Solo – Preparação para Ensaio de Compactação e Ensaio de Caracterização – Método de Ensaio. Rio de Janeiro, 1995.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7182: Amostras de Solo – Ensaio de compactação. Rio de Janeiro, 1986.

BAILEY, A.C., RAPER, R.L., WAY, T.R., BURT, E.C., JHOHNSON, C.E. Soil stresses under a tractor tire at various loads and inflation pressures. *J.Terramechanics*, v.33, n.1, p.1-11, 1996.

BATJES, N.H. Management options for reducing CO₂ - concentrations in the atmosphere by increasing carbon sequestration in the soil. Wageningen: Internacional Soil Reference and Information Centre, 1999. 114p. (Report 410-200-031. Dutch National Research Programme on Global Air Pollution and Climate Change & Techinal. Paper 30).

BAVER, L.D.; GARDNER, W.H.; GARDNER, W.R. Soil Phusics. New York: John Wiley, 1972. 498p.

BAYER, C.; BERTOL, I. Características químicas de um Cambissolo húmico afetadas por sistemas de preparo, com ênfase à matéria orgânica. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v.23, p.687-694, 1999.

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.

BLANCO-CANQUI, H.; LAL, R. Crop residue removal impacts on soil productivity and environmental quality. Critical Reviews in Plant Science, v.28, p.39–163, 2009.

BOUMA, J. et al. The function of diferente types of macroporos during saturated flow through four swelling soil horizons. Soil Science Society of America Journal, v. 41, p. 945-950, 1977.

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 no ensaio Proctor. R. Bras. Ci. Solo, 30:605-614, 2006.

BRAIDA, J.A.; REICHERT, J.M.; REINERT, D.J. & VEIGA, M. Teor de carbono orgânico e a susceptibilidade a compactação de um Nitossolo e um Argissolo. R. Bras. Eng. Agríc. Ambiental, v.14, n.2, p.131–139, 2010.

BRAIDA, J.A.; REICHERT, J.M.; REINERT, D.J. & SEQUINATTO, L. Elasticidade do solo em função da umidade e do teor de carbono orgânico. R. Bras. Ci. Solo, 32:477-485, 2008.

CAMARGO, O.A.; ALLEONI, L.R.F. Compactação do solo e o desenvolvimento das plantas. Piracicaba, SP: ESALQ, 1997. 132p.

CANILLAS, E. C.; SALOKHE, V. M. A decision support system for compaction assessment in agricultural soils. *Soil Tillage Research*, Amsterdam, v.65, n.2, p.221-230, 2002.

CAPUTO, H.P. Mecânica dos solos e suas aplicações, volume 1. Rio de Janeiro: Ltc, 1988.

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.

CARVALHO, E.J.M.; FIGUEIREDO, M.S. & COSTA, L.M. Comportamento físico-hídrico de um Podzólico Vermelho-Amarelo câmbico fase terraço sob diferentes sistemas de manejo. *Pesq. Agropec. Bras.*, 34:257-265, 1999.

CHANCELLOR, W.J. Compaction of soil agricultural equipment. *Bull. Div. Agric. Sci.. Univ. Calif.*, n.1881, p.1-53, 1977.

COLEMAN, D.C., OADES, J.M., UEHARA, G. Dynamics of soil organic matter in tropical ecosystems. Honolulu: NifTAL Project, University of Hawaii at Manoa, USA, 1989. p.173-200.

CONCEIÇÃO, P.C.; AMADO, T.J.C.; MIELNICZUK, J.; SPAGNOLLO, E. Qualidade do solo em sistemas de manejo avaliada pela dinâmica da matéria orgânica e atributos relacionados. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.29, p.777-788, 2005.

DAS, M. Braja. Fundamentos da engenharia geotécnica. São Paulo: Thomson Learning, 2007.

DEFENSE MAPPING SCHOOL. Soil trafficability. Fort Belvoir, Virginia, 1986. 62 p. (Student pamphlet, DMS no. ST222).

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES - DNIT. Manual de pavimentação. 3ª ed. Rio de Janeiro, 2006.

DIAS JUNIOR, M.S.; MIRANDA, E.E.V. Comportamento da curva de compactação de cinco solos da região de lavras (MG). *Ciência Agrotécnica, Lavras*, v.24, n.2, p.337- 346, 2000.

DIAS JUNIOR, M. S., PIERCE, F.J. A simple procedure for estimating preconsolidation pressure from soil compression curves. *Soil Tech.*, v.8, p.139-51, 1995.

DUMAS, W.T., TROUSE, A.C. SMITH, L.A., KUMMER, F.A., GILL, W.R. Development and evaluation of tillage and other cultural practices in a controlled traffic system for cotton in the southern coastal plains. *Trans.ASAE (Am.Soc.Agric.Eng.)*, v.16, p.872-5, 880, 1973.

EKWUE, E. I. Organic matter effects on soil strength properties. *Soil & Tillage Research*, v.16, n.3, p.289-297, 1990.

EMBRAPA. Serviço Nacional de Levantamento e Classificação dos Solos-SNLCS, Manual e métodos de análise do solo. 2.ed. Rio de Janeiro, 1997. 212 p.

EMBRAPA. Sistema brasileiro de classificação de solos. Brasília: Embrapa, 2018. 590 p.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. 2 ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2006.

EMBRAPA. Solos do estado de Santa Catarina. Rio de Janeiro: Embrapa solos, 2004. 745 p.

EPAGRI. Dados e Informações Biofísicas da Unidade de Planejamento Regional Sul Catarinense – UPR 3. Florianópolis. 2002. 76 p.

ERICKSON, A. E. Tillage effects on soil aeration. Predicting tillage effects on infiltration. In: VAN DOREN, D. M. et. al. Ed.) Predicting tillage effects on soil physical proprieties and processes. Madson: ASA, 1982. Cap. 6. P. 91-104. (ASA. Special Publication, 44).

FERREIRA, M. M. Caracterização Física do Solo. In: JONG VAN LIER, Q. Física do Solo. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, v. 1, p. 1–27, 2010.

FIGUEIREDO, C. C.; RAMOS, M. L. G.; TOSTES, R. Propriedades físico-hídricas em Latossolo do Cerrado sob diferentes sistemas de manejo. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.13, p.146–151, 2009.

GODBOLE, R., ALCOCK, R., HETTIARATCHI, D. The prediction of tractive performance on soil surfaces. *J.Terramechanics*, v.30, n.6, p.443-59, 1993.

GONCALVES, Wainer G. et al. Sistema radicular de plantas de cobertura sob compactação do solo. *Eng. Agríc.* [online]. 2006, vol.26, n.1

GREGORICH, E.G.; CARTER, M.R.; ANGERS, D.A.; MONREAL, C.M. & ELLERT, B.H. Towards a minimum data set to assess soil organic matter quality in agricultural soils. *Can. J. Soil Sci.*, 367-375, 1994.

HADAS, A., WOLF, D., RAWITZ, E. Residual compaction effects on cotton stand and yields. *Trans.ASAE (Am.Soc.Agric.Eng.)*, v.30, n.3, p.691-6, 1985.

HAKANSSON, I.; MEDVEDEV, V.W. Protection of soils from mechanical overloading by establishing limits for stresses caused by heavy vehicles. *Soil and Tillage Research, Amsterdam*, v.35, p.85-97, 1995.

HAKANSSON, I.; VOORHEES, W.R.; RILEY, H. Vehicle and wheel factors influencing soil compaction and crop response in different traffic regimes. *Soil and Tillage Research, Amsterdam*, v.11, p.239-282, 1988.

HALLONBORG, U. Super ellipse as tyre-ground contact area. *J.Terramechanics*, v.33, n.3, p.125-32, 1996.

HATANO, R.; IWANAGA, K.; OKAJIMA, H.; SAKUMA, T. Relationship between the distribution of soil macropores and root elongation. *Soil Science and Plant Nutrition, Tokyo*, v.34, n.4, p.535-546, 1988.

HERMLE, S.; ANKEN, T.; LEIFELD, J.; WEISSKOPF. The effect of the tillage system on soil organic carbon content under moist, cold-temperate conditions. *Soil and Tillage Research*, v. 98, p.94- 105, 2008.

HOLTZ, R.D. & KOVACS, W.D. An introduction to geotechnical engineering. New Jersey, Prentice-Hall, 1981. 733 p.

HORN, R.; LEBERT, M. Soil compactability and compressibility. In: Soane, B. D.; Ouwerkerk, C. van. *Soil compaction in crop production*. Amsterdam: Elsevier. 1994. 662p.

KÄMPF, N.; MARQUES, J.J.; CURI, N. Mineralogia dos solos brasileiros. In: KER, J.C.; CURI, N.; SCHAEFER, C.E.G.R.; VIDAL-TORRADO, P. (Eds.). *Pedologia: fundamentos*. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2012. p. 81-145.

KLEIN, Vilson Antônio. Física do solo. 3 ed. Passo Fundo: Ed. Universidade de Passo Fundo, 2014.

KIEHL, E. J. Manual de edafologia: relações solo-planta. São Paulo: Ceres, 1979. 262p.

KONDO, M.K. Compressibilidade de três Latossolos sob diferentes usos. 1998. 95p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Departamento de Solos e Nutrição de Plantas, Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG.

LAL, R. Soil Carbon Sequestration Impacts on Global. *Science*, v.304, p.1623, 2004.

LANÇAS, K.P. A compactação do solo agrícola. Botucatu: Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, 1996a. 23p.

LEBERT, M. & HORN, R. A method to predict the mechanical strength of agricultural soils. *Soil Tillage Res.*, 19:275-286, 1991.

LELIS, Thatiana A. Influência da energia de compactação nas relações entre o módulo resiliente, CBR e resistência à compressão não confinada de solos da Zona da Mata norte de Minas Gerais. Dissertação de mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. 123

p. Orientador: Cláudio Henrique de Carvalho Silva. Universidade Federal de Viçosa – UFV. Viçosa, abril de 2004.

LIMA, C.L.R. Compressibilidade de solos versus intensidade de tráfego em um pomar de laranja e pisoteio animal em pastagem irrigada. 2004. 70p. Tese (Doutorado em Agronomia) – Departamento de Solos e Nutrição de Plantas, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, SP.

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.

LUCIANO, Rodrigo Vieira et al. Atributos físicos relacionados à compactação de solos sob vegetação nativa em região de altitude no Sul do Brasil. *Rev. Bras. Ciênc. Solo* [online]. 2012, vol.36, n.6, pp.1733-1744. ISSN 1806-9657

LYASKO, M.I. The determination of deflection and contact characteristics of a pneumatic tire on a rigid surface. *J.Terramechanics*, v.31, n.4, p.239-246, 1994.

MACEDO, V.R.M. Compressibilidade de um Podzólico Vermelho-Escuro fisicamente degradado e recuperado. 1993. 88f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS.

MARCOLIN, C. D.; KLEIN, V. A. Determinação da densidade relativa do solo por uma função de pedotransferência da densidade do solo máxima. *Acta Scientiarum Agronomy*, v. 33, p. 231-239, 2006.

MARIOTI, Juliana. Erosão hídrica em Cambissolo Húmico cultivado com milho e soja sem preparo do solo, nas direções da pendente em contorno ao declive, comparada ao solo sem cultivo. 2012. 74p. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo), Universidade de Santa Catarina, Lages, SC.

MORAIS, D. H. O.; ROSSET, J. S.; SILVA, C. A.; SANTOS, T. M. D. & CASTILHO, S. C. P. Frações físicas da matéria orgânica em diferentes sistemas de manejo. In: VIII CONGRESSO BRASILEIRO DE GESTÃO AMBIENTAL. Campo Grande: IBEAS, 2017.

MULLIGAN, M.F., SMUCKER, A.J.M., SAFIR, G.F. Tillage modifications of dry edible bean root colonization by VAM fungi. *Agron.Jour.*, v.77, n.1, p.140-4, 1985.

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.

PILLON, Clenio Nailto. Dinâmica da matéria orgânica no ambiente / Clenio Nailto Pillon, João Mielniczuk, Ladislau Martin Neto. - Pelotas: Embrapa Clima Temperado, 2002.

PINTO, Carlos de Sousa. Curso básico de mecânica dos solos. São Paulo: Oficina de textos, 2006.

R Core Team **R: A language and environment for statistical computing**. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>. 2019.

RAIHER, Augusta Pelinski. OLIVEIRA, Renato Alves de. CARMO, Alex Sander Souza do. STEGE, Alysson Luiz. Convergência da Produtividade Agropecuária do Sul do Brasil: uma análise espacial. *RESR*. Piracicaba-SP. Vol. 54. Nº 03. p. 517-536. 2016.

RAPER,R.L., BAILEY,A.C., BURT,E.C., JOHNSON,C.E. Prediction of soil stresses caused by tire inflation pressures and dynamic loads. Atlanta: Am.Soc.Agric.Eng., 1994. 14p. (Paper, 94-1547).

REINERT, D.J.; REICHERT, J.M. Propriedades físicas do solo. Santa Maria, UFSM, 2006. 18 p.

REICHERT, J.M.; MENTGES, M. I.; RODRIGUES M. F.; CAVALLI, J.P.; AWE, G.O.; MENTGES, L.R. Compressibility and elasticity of subtropical no-till soils varying in granulometry, organic matter, bulk density and moisture. *Catena*. Amsterdam: Elsevier. 1994.

- REICHERT, J.M.; REINERT, D.J.; SUZUKI, L.E.A.S.; HORN, R. Mecânica do Solo. In: JONG VAN LIER, Q. Física do Solo. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, p.29-102, 2010.
- REICHERT, J. M.; SUZUKI, L. E. A. S.; REINERT, D. J. Compactação do solo em sistemas agropecuários e florestais: identificação, efeitos, limites críticos e mitigação. Tópicos Ciência do Solo, v.5 p.49-134, 2007.
- RESCK, D.V.S.; PEREIRA, J; SILVA, J.E. da. Dinâmica da matéria orgânica do solo na região dos Cerrados. Planaltina: EMBRAPA – CPAC, 1991. 22p. (EMBRAPA – CPAC. Documentos, 36).
- RICHART, A.; TAVARES FILHO, J.; BRITO, O. R.; LLANILLO, R. F.; FERREIRA, R. Compactação do solo: Causas e efeitos. Semina, v.26, p.321-344, 2005.
- SCHAEFER, C.E.R.; SILVA, D.D.; PAIVA, K.W.N.; PRUSKI, F.F.; ALBUQUERQUE FILHO, M.R.; ALBUQUERQUE, M.A. Perdas de solo, nutrientes, matéria orgânica e efeitos microestruturais em Argissolo Vermelho-Amarelo sob chuva simulada. Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília, v.37, n.5, p.669-678, 2002.
- SCHEINOST, A.C.; SINOWSKI, W. & AUERSWALD, K. Rationalization of soil water retention curves in a highlyvariable soils cape, I. Developing a new pedotransferfunction. Geoderma, 78:129-143, 1997.
- SCHWANGHART, H. Measurement of contact area, contact pressure and compaction under tires in soft soil. In: INTERNATIONAL CONFERENCE OF THE ISTVS, 10, 1990, Kobe, Japão. Proceedings... Kobe, Japão, 1990. p.193-204.
- SENÇO, Wlastermiler de. **Manual de técnicas de pavimentação**: volume I. São Paulo: PINI, 2007.
- SILVA, A. P.; TORMENA, C. A.; DIAS JUNIOR, M. S.; IMHOFF, S.; KLEIN, V. A. Indicadores de qualidade física do solo. In: JONG VAN LIER, Q. Física do Solo. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, p.242-281, 2010.

SILVA, J. G. Ordens de gradagem e sistemas de aração do solo: desempenho operacional, alterações na camada mobilizada e respostas do feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.). 1992. 180p. Tese (Doutorado em Agronomia), Universidade Estadual Paulista, Botucatu, SP.

SILVA, L. da. Retração do solo e a relação com as propriedades físico-hídricas de Latossolos e Nitossolos do sul do Brasil. 2019. 109p. Tese (Doutorado em Ciência do Solo), Universidade de Santa Catarina, Lages, SC.

SILVA, Thais Palumbo; BRUM, Rodrigo Paiva de; LIMA, Cláudia Liane Rodrigues de; NUNES, Maria Cândida Moitinho; TUCHTENHAGEN, Ivana Kruger; SALE, Mussa Mamudo. Carbono orgânico e densidade em um Argissolo Vermelho- Amarelo de uma propriedade agrícola familiar. Cadernos de Agroecologia – ISSN 2236-7934 – Anais do VI CLAA, X CBA e V SEMDF – Vol. 13, N° 1, Jul. 2018.

SILVA, J.E.; RESCK, D.V.S. Matéria orgânica do solo. In: VARGAS, M.A.T.; HUNGRIA, M. (Ed.). Biologia dos solos dos cerrados. Planaltina: EMBRAPA Cerrados, 1997. p.467-524.

SILVA, V.R. da; REINERT, D.J. & REICHERT, J.M. Densidade do solo, atributos químicos e sistema radicular do milho afetados pelo pastejo e manejo do solo. R. Bras. Ci. Solo, 24:191-199, 2000.

SILVA, A.J.N & CABEDA, M.S.V. Compactação e compressibilidade do solo sob sistemas de manejo e níveis de umidade. R. Bras. Ci. Solo, 30:921-930, 2006.

SILVA, M. L .N.; CURI, N.; BLANCANEAUX, P. Sistemas de manejo e qualidade estrutural de Latossolo Roxo. Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília, v.35, p.2485- 2492, 2000.

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.

SOANE, B.D. The role of organic matter in soil compactability: a review of some practical aspects. Soil and Tillage Research, Amsterdam, v.16, n.1/2, p.179-201, 1990.

SOANE, B.D. The role of organic matter in soil compactability: a review of some practical aspects. *Soil and Tillage Research*, Amsterdam, v.16, n.1/2, p.179-201, 1990.

SÖHNE, W. Fundamentals of pressure distribution and soil compaction under tractor tires. *Agricultural Engineering*, v.39, p.276-281, 1958.

SPERA, S.T.; SANTOS, H.P.; FONTANELI, R.S.; TOMM, G.O. Efeitos de sistemas de produção de grãos envolvendo pastagens sob plantio direto nos atributos físicos de solo na produtividade. *Revista Brasileira Ciência do Solo*, Viçosa, v.28, p.533-542, 2004.

STARTSEV, A.D.; McNABB, D.H. Effects of compaction on aeration and morphology of boreal forest soils in Alberta, Canada. *Canadian Journal of Soil Science*, v.89, p.45-56, 2009.

STEPNIEWSKI, W.; HORNN, R. & MARTYNIUK, S. Managing soil biophysical properties for environmental protection. *Agr. Ecosyst. Environ.* 88:175-181, 2002.

STEVENSON, F.J. *Humus chemistry: genesis, composition, reactions*. 2.ed. New York: John Wiley & Sons, 1994. 496p.

SUZUKI, L. E. A. S.; REICHERT, J. M.; REINERT, D. J. Degree of compactness, soil physical properties and yield of soybean in six soils under no-tillage. *Soil Research*, Clayton South, v. 51, n. 4, p. 311-321, 2013.

TORRES, E.; SARAIVA, O.F. Camadas de impedimento mecânico do solo em sistema agrícolas com soja. Londrina: EMBRAPA-CNPSoja, 1999. 58p. Circular Técnica, n. 23.

TORMASELLA, J.; HODNETT, M. & ROSSATO, L. Pedotransfer functions for the estimation of soil water retention in Brazilian soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 64:327-38, 2000.

TORMENA C. A.; SILVA A. P.; LIBARDI, P. L. Caracterização do intervalo hídrico ótimo de um latossolo roxo sob plantio direto. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 22, p. 573-581, 1998.

TRANNIN, I. C. de B.; SIQUEIRA, J. O.; MOREIRA, F. M. S. Atributos Bquímicos e físicos de um solo tratado com biossólido industrial e cultivado com milho. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.12, n.3, p.223-230, 2008.

UPADHYAYA, S.K., WULFSOHN, D. Relationship between tire deflection characteristics and 2-D tire contact area. *Trans.Agric.*
v.33, n.1, p.25-30, 1990.

ZHANG, H. Organic matter incorporation affects mechanical properties of soil aggregates. *Soil & Tillage Research*, v.31, n.2, p.263-275, 1994.

ZHANG, H.; HARTGE, K.H.; RINGE, H. Effectiveness of organic matter incorporation in reducing soil compactability. *Soil Science Society of America Journal, Madison*, v.61, n.1, p.239-245, 1997.