



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO

DEPARTAMENTO DE AGRONOMIA

ÁREA DE SOLOS

Diagnóstico de compactação via atributos físico-hídricos dos solos coesos: da amostragem à geração de dados

Aluno: Paulo Henrique Ribeiro Marques

Orientador: Brivaldo Gomes de Almeida

RECIFE PE

MAIO/2022

INFORMAÇÕES GERAIS

Diagnóstico de compactação via atributos físico-hídricos dos solos coesos: da amostragem à geração de dados.

Aluno: Paulo Henrique Ribeiro Marques

E-mail: phr.marques@gmail.com

Telefone: (81) 997089751

Relatório de Estágio Supervisionado Obrigatório (ESO) vinculado ao Curso de Agronomia da Universidade Federal Rural de Pernambuco (Sede), como requisito para a obtenção do Título de Engenheiro Agrônomo.

RECIFE PE

MAIO/2022

Sumário

1 Apresentação	4
2 Resumo	5
3 Introdução	6
4 Objetivos	7
4.1 Objetivo Geral	7
4.2 Objetivo Específico	7
5 Metodologia	7
6 Resultados e Discussões	15
7 Considerações Finais	18
8 Referências	18

1 Apresentação

A qualidade física do solo influencia diretamente a produção agrícola, tanto para o grande produtor rural como para aqueles que trabalham na agricultura familiar. O desenvolvimento de novos métodos de análises para obtenção de dados de campo e de laboratório, fundamentais para a compreensão das propriedades do solo, resultam hoje da soma do conhecimento das diversas áreas, notadamente, a física, química, fertilidade do solo, mineralogia e micromorfologia do solo (EMBRAPA, 2017).

Embora todas as áreas precisem de pesquisa, incrementando assim o manejo e o diagnóstico adequado para tomadas de decisões, há áreas no nordeste brasileiro onde os solos cultivados necessitam de mais atenção, como no caso dos solos coesos. Esses solos, no seu horizonte diagnóstico, apresentam-se adensados, com baixo volume total de poros; variando sua consistência de dura à extremamente dura (quando sob baixa umidade), mas que se esboroam quando em alta umidade.

Tais condições, prejudicam o desenvolvimento das plantas e justificam a baixa produtividade das áreas de cultivo dos agricultores familiares, principalmente aquelas sob milho e feijão, como no caso dos solos de Tabuleiros Costeiros em Carpina-PE. Além disso, os manejos adotados por esses agricultores nestas áreas carecem de atualizações, que sem elas, podem levar a degradação dos solos, diminuindo, ainda mais, a produtividade.

A Estação Experimental de Cana-de-Açúcar de Carpina (EECAC) é um dos Campi Avançados da UFRPE e está situado no município do Carpina-PE, na Zona da Mata Norte. A Estação realiza pesquisas no setor sucroenergético, por meio de estudos com a cultura da cana-de-açúcar, seus produtos e subprodutos, como também abriga experimentos de outras culturas agrícolas como milho, feijão, sorgo e silvicultura. Dentre os programas realizados na EECAC, destacam-se os de melhoramento genético, manejo varietal, controle biológico de pragas e estudos sobre a viabilidade de novos produtos, a partir da cana-de-açúcar, além de oferecer a possibilidade de desenvolvimento de projetos de pesquisa na Ciência do Solo, via extensão.

A compactação e/ou o adensamento do solo, associados ou não às limitações de natureza química, implicam em restrições ao desenvolvimento do sistema radicular das plantas, à disponibilidade de água às plantas e, conseqüentemente, à disponibilidade de nutrientes e à absorção de nutrientes pelas plantas (DENARDIN, 2018).

Uma alternativa para o uso mais racional dos solos coesos tem sido o uso de polímero à base de poliácridamida (PAM), que tem reduzido a coesão desse solos, com aumento das classes de poros que disponibilizam água às plantas (MARCELO et al., 2016). Apesar desses resultados, nem sempre o atributo do solo selecionado para o diagnóstico da coesão, ou de sua redução, é suficiente para representar a realidade do solo, antes e depois da ação mitigadora, como é o caso de densidade do solo. Nesse sentido, o conhecimento, alcance, exatidão e metodologia adequada para os ensaios de determinação dos atributos dos solos é fundamental para previsão e monitoramento da qualidade estrutural do solo.

2 Resumo

A qualidade do solo é frequentemente quantificada por meio de seus atributos, com destaque para os físicos, químicos e biológicos. Os mais utilizados para esta avaliação são aqueles que estão relacionados ao arranjo das partículas e espaços porosos do solo: densidade do solo (Ds); porosidade total (P); condutividade hidráulica saturada (Ksat); resistência tênsil de agregados (RT); resistência do solo à penetração de raízes (RP); índices de estabilidade de agregados. O objetivo deste projeto foi avaliar o nível de compactação e coesão dos solos representativos da região da Mata Norte, que abrigam grande número de agricultores familiares. O experimento está sendo conduzido em áreas da EECAC. Para avaliar os atributos físicos do solo foram coletadas amostras com a estrutura preservada, em forma de blocos de solos e em cilindros volumétricos, além de amostras deformadas, obtidas via trado. Os blocos foram coletados a partir da abertura de mini trincheiras, selecionando as camadas de 0 - 15 cm e 15 - 30 cm, assim como as amostras deformadas. As amostras foram embaladas em plástico filme e acondicionadas em caixa de isopor. Em laboratório, as amostras de solos foram utilizadas nos ensaios para determinação dos índices de estabilidade de agregados dos solos, P, Ds e RP. Os ensaios para determinação dos índices de estabilidade de agregados dos solos consistiu na obtenção do: diâmetro médio ponderado de agregados do solo (DMP); diâmetro médio geométrico de agregados do solo (DMG); podendo-se calcular o índice de estabilidade de agregados (IEA). A análise de variância (ANOVA) juntamente com o teste F foram utilizados para avaliar a ocorrência de diferenças significativas entre os cálculos. Os resultados apontam que a P e Ds se apresentam como uma ferramenta valiosa nas análises sobre a compactação do solo em

função da praticidade de execução e do baixo custo da análise, tornando viável para atender à comunidade de pequenos agricultores familiares.

3 Introdução

A caracterização do solo se refere à composição de sua matriz sólida e do conteúdo dos poros. Em relação à matriz sólida, têm-se o tamanho (as frações granulométricas), o formato dos sólidos, a natureza (minerais, componentes orgânicos) e o arranjo (ou estruturação) de seus componentes. Quanto ao conteúdo dos poros pode se fazer a separação entre líquido (água) e gás (ar), ou, em maior detalhe, a composição da solução do solo e da fase gasosa (VAN LIER, 2020). Para a realização dos ensaios em laboratório para obter resultados que visam desvendar a qualidade física do solo requer esforços diferenciados, como uma análise de menor complexidade, ou aquelas que requerem determinações altamente precisas, assim como determinação de propriedades do solo.

O conjunto de características determina as propriedades físicas do solo. Entre os atributos físicos os mais utilizados para esta avaliação são aqueles que estão relacionados ao arranjo das partículas e espaços porosos do solo. Destes, destacam-se: densidade do solo; porosidade; condutividade hidráulica saturada; resistência tênsil de agregados; resistência do solo à penetração de raízes; índices de estabilidade de agregados.

A precisão e exatidão dos resultados desses atributos físicos têm relação direta com escolha correta do método a ser utilizado na sua respectiva determinação. Nesse contexto, considerando o solo como um sistema trifásico (sólido, líquido e gasoso), heterogêneo, particulado, disperso e poroso, onde a área interfacial por unidade de volume pode ser muito grande (HILLEL, 1998), aqueles atributos físicos, que dependem do arranjo estrutural do solo, variam consideravelmente dentro de um volume. Portanto, para determinar tais atributos, a amostragem deve considerar um volume de solo que seja estatisticamente representativo e adequado para a sua caracterização (VIK et al., 2013).

O ambiente agrícola, principalmente, tem sido frequentemente alterado em decorrência da intensa utilização de máquinas pesadas que promovem a compactação do solo e, conseqüentemente, a degradação das condições físicas. Essa degradação tem sido avaliada pelo uso de alguns atributos físicos do solo, tendo maior destaque a resistência do solo à penetração de raízes (RP). Os ensaios de resistência do solo à penetração de raízes

podem ser realizados *in situ* (no campo) utilizando-se penetrômetro de campo ou em laboratório utilizando penetrômetro eletrônico de bancada.

A porosidade, que está diretamente relacionada à textura e estrutura dos solos, capacidade de drenagem interna do solo, retenção de água de um perfil e suas condições de aeração. Os diferentes tipos de poros no solo possuem funções específicas, sendo: os microporos os poros responsáveis pela retenção e armazenamento da água; os macroporos, responsáveis pela aeração e pela maior contribuição na infiltração de água; e os mesoporos, responsáveis pela redistribuição da água (REINERT e REICHERT, 2006). A densidade do solo está relacionada com a porosidade total e com a composição orgânica e mineralógica média do solo. A porosidade total do solo é a fração do volume total em um determinado volume de solo passível de ser ocupado por água e/ou ar. O conhecimento da porosidade total é importante para se entender o movimento e a retenção de água, ar e solutos no solo, entre outros aspectos (TEIXEIRA et al., 2017).

Outro atributo muito usado para avaliar a qualidade estrutural de solos é a estabilidade de agregados (EA). Ela expressa a resistência à desagregação que os agregados apresentam quando submetidos a forças externas; seja pela ação de implementos agrícolas e impacto gota chuva, ou por forças internas; compressão de ar e expansão-contração do solo, que tendem a rompê-los. Uma das suas medições mais utilizadas é pela força aplicada pela água, que é uma medida que tem relação com a capacidade de um solo de resistir a erosão (REINERT e REICHERT, 2006).

4 Objetivos

4.1 Objetivo Geral

Avaliar alguns atributos físicos do solo, desde a coleta específica de amostras no campo até os ensaios em laboratório, visando indicar aqueles que são mais eficientes (praticidade e custos) para diagnosticar a compactação do solo.

4.2 Objetivo Específico

- Avaliar os atributos físicos do solo por meio da coleta de amostras em blocos de solos, subdivididos em torrões/agregados, obedecendo uma graduação no volume das amostras, além da coleta de amostras desestruturadas, nas mesmas profundidades, obtidas via trado.

- Determinar os atributos físicos (distribuição granulométrica, densidade do solo, porosidade, estabilidade de agregados e resistência do solo à penetração de raízes).
- Confrontar os resultados, indicando aqueles que apontam para o diagnóstico da compactação do solo.

5 Metodologia

A área de estudo está localizada na Estação Experimental de Cana-de-açúcar de Carpina (EECAC), pertencente à UFRPE, localizada no município de Carpina ($7^{\circ}51'18.9''S$, $35^{\circ}14'15.3''W$), região da Mata Norte de Pernambuco, distante aproximadamente 60 km do Recife.

Foram coletadas amostras com a estrutura preservada, em forma de blocos de solos. Esses, foram coletados a partir da abertura de mini trincheiras, selecionando as camadas de 0 - 15 cm e 15 - 30 cm (Figura 1A e 1B), obtidos conforme metodologia sugerida em MARCELO et al. (2016). Para manter a estrutura do solo, protegendo de perturbações durante o transporte do campo ao laboratório, os blocos foram embalados com plástico filme (Figura 1C e 1D), e acondicionados em caixa de isopor.



Figura 1 - Coleta de amostras de solos estruturados. (A) e (B) Abertura das mini trincheiras, para remoção dos blocos; (C) e (D) Blocos de solos, e processo de empacotamento para proteção da estrutura (plástico filme). **Fonte:** O Autor.

Em laboratório, os blocos de solos foram submetidos aos procedimentos para geração dos torrões/agregados, a serem utilizados nos ensaios para determinação dos índices de estabilidade de agregados dos solos.

Desse modo, foram obtidos: diâmetro médio ponderado de agregados do solo (DMP); diâmetro médio geométrico de agregados do solo (DMG); podendo-se calcular o índice de estabilidade de agregados (IEA) e o índice de sensibilidade (IS). Para tanto, a quantificação do volume de solo em classes de tamanho de agregados de amostras naturais de solo, foi realizada por peneiramento, utilizando dos processos: via seca, com a exposição da amostra ao fluxo turbulento de água; e por via úmida, em aparato desenvolvido para esse fim (agitador tipo Yoder). A medição das frações separadas em cada peneira foi feita por meio de pesagem (TEIXEIRA et al., 2017).

Os ensaios para determinação dos índices de estabilidade de agregados foram realizados com base na metodologia proposta em Nimmo e Perkins (2002), onde 25g de agregados de solo (secos ao ar) são colocados sobre um conjunto de peneiras com malhas de 2,0, 1,0, 0,21 e 0,105 mm. A desagregação foi realizada por peneiramento em meio úmido e seco, utilizando-se o agitador mecânico vibratório (Figura 2A) e agitador do tipo Yoder (Figura 2B), respectivamente.



Figura 2 - Equipamentos utilizados para peneiramento dos agregados dos solos para os ensaios de sua distribuição por tamanhos: A) via seca, agitador eletromagnético; B) via úmida, tipo Yoder. **Fontes:** A) <https://www.directindustry.com/pt/prod/jisico-co-ltd/product-40518-1351607.html>; e B) https://tecnal.com.br/pt-BR/produtos/detalhes/5938_mesa_para_peneiramento_por_via_umida.

A partir da massa de agregados retida em cada peneira, nos ensaios específicos (seco e úmido), foram calculados os estabilidade de agregados. O diâmetro médio ponderado de agregados do solo (DMP) foi obtido usando-se a equação (01).

$$DMP = \sum (X_i \times W_i) \quad (01)$$

onde: DMP é expresso em mm; X_i é o diâmetro médio de cada classe (mm); e W_i é a proporção de agregados em cada classe/peneira.

O diâmetro médio geométrico de agregados do solo (DMG), foi calculado segundo Brizzi et al. (2019), por meio da equação (02).

$$DMG = \text{EXP} \left(\frac{\sum W_i \times \ln X_i}{\sum W_i} \right) \quad (02)$$

onde: DMG é expresso em mm; W_i é a proporção de agregados em cada classe/peneira; e X_i é o diâmetro médio de cada classe (mm).

O índice de estabilidade de agregados (IEA), foi calculado de duas maneiras. Na primeira (IEA_1), os cálculos foram realizados conforme a metodologia proposta por Salton et al. (2017), a partir da relação entre o diâmetro médio ponderado via úmida e via seca, conforme equação (03).

$$IEA_1 = \left(\frac{DMP_u}{DMP_s} \right) \times 100 \quad (03)$$

onde: IEA_1 é o índice de estabilidade de agregados (%); DMP_u é o diâmetro médio ponderado via úmida (mm); e DMP_s é o diâmetro médio ponderado via seca (mm).

Na segunda forma de cálculo do IEA, considerando os dados gerados pelos ensaios sob condição seca e úmida (IEA_2), foram utilizados os procedimentos sugeridos em Brizzi et al. (2019), que podem ser resumidos pela equação (04).

$$IEA_2 = \left(\frac{\text{peso total dos agregados} - \text{peso dos agregados} < 0,25\text{mm}}{\text{peso da amostra}} \right) \times 100 \quad (04)$$

onde: IEA_2 é o índice de estabilidade de agregados (%), considerando apenas os dados via úmida; sendo os pesos citados na equação (04) todos expressos como secos à 105° C.

As alterações no tamanho dos corpos de prova, submetidos aos procedimentos de ruptura (seco / úmido) foram medidas pelo diâmetro equivalente ($\varnothing_{eq.}$) dos agregados, que foram separados em três: 5,2; 10,4 e 15,6 mm. A partir dos resultados dos DMP para cada $\varnothing_{eq.}$, foram determinados os índices de sensibilidade (IS).

Assim, o IS foi calculado pela comparação entre os DMP, determinados nos solos, relacionando os pares de dados: i) $\varnothing_{eq.}$ padrão 1 (5,2 mm) e $\varnothing_{eq.} = 10,4$ mm;

ii) $\varnothing_{eq.}$ padrão 1 (5,2 mm) e $\varnothing_{eq.} = 15,6$ mm; iii) $\varnothing_{eq.}$ padrão 2 (10,4 mm) e $\varnothing_{eq.} = 15,6$ mm; utilizando-se a equação (05).

$$IS = \frac{DMP_{\varnothing_{eq.} \text{ padrão}}}{DMP_{\varnothing_{eq.} \text{ testado}}} \quad (05)$$

onde: IS é o índice de sensibilidade (adimensional); $DMP_{\varnothing_{eq.} \text{ padrão}}$ é o diâmetro médio ponderado (mm), para cada $\varnothing_{eq.}$ padrão (1 ou 2); $DMP_{\varnothing_{eq.} \text{ testado}}$ é o diâmetro médio ponderado (mm), para cada $\varnothing_{eq.}$ testado (10,4 ou 15,6 mm), tendo, $\varnothing_{eq.}$ maior que o padrão adotado (1 ou 2), conforme o caso.

As amostras em agregados foram pesadas em triplicata, com aproximação de casa decimais, sendo uma quarta pesagem destinada à correção dos agregados pelo uso do fator f, que converte o peso para seco em 105°C. A Figura 3 ilustra parte desses procedimentos.

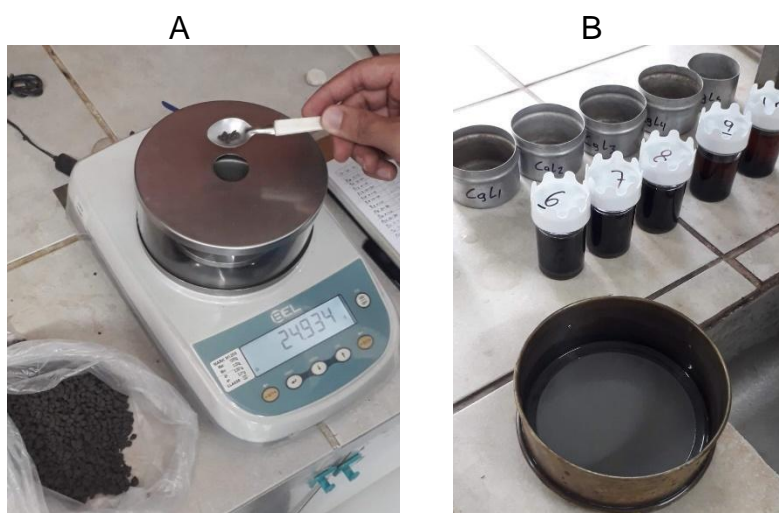


Figura 3 – Procedimentos de pesagem e pré-tratamentos dos agregados, sendo em: A) Pesagem de amostras (agregados); B) identificação das amostras e sua transferência das latas de alumínio (após peneiramento) para copos plásticos, e aplicação do dispersante químico calgon. **Fonte:** O Autor

Paralelamente à amostragem dos blocos foram coletadas amostras desestruturadas, nas mesmas profundidades, obtidas via trado (Figura 4A e 4B), acondicionadas em sacos plásticos (Figura 4C), sendo devidamente identificadas. Essas amostras foram secas ao ar, destorroadas e passadas em peneira com malha de 2 mm (9 mesh), obtendo-se assim a terra fina seca ao ar (TFSA), que foram reservadas para os ensaios de caracterização física dos solos.

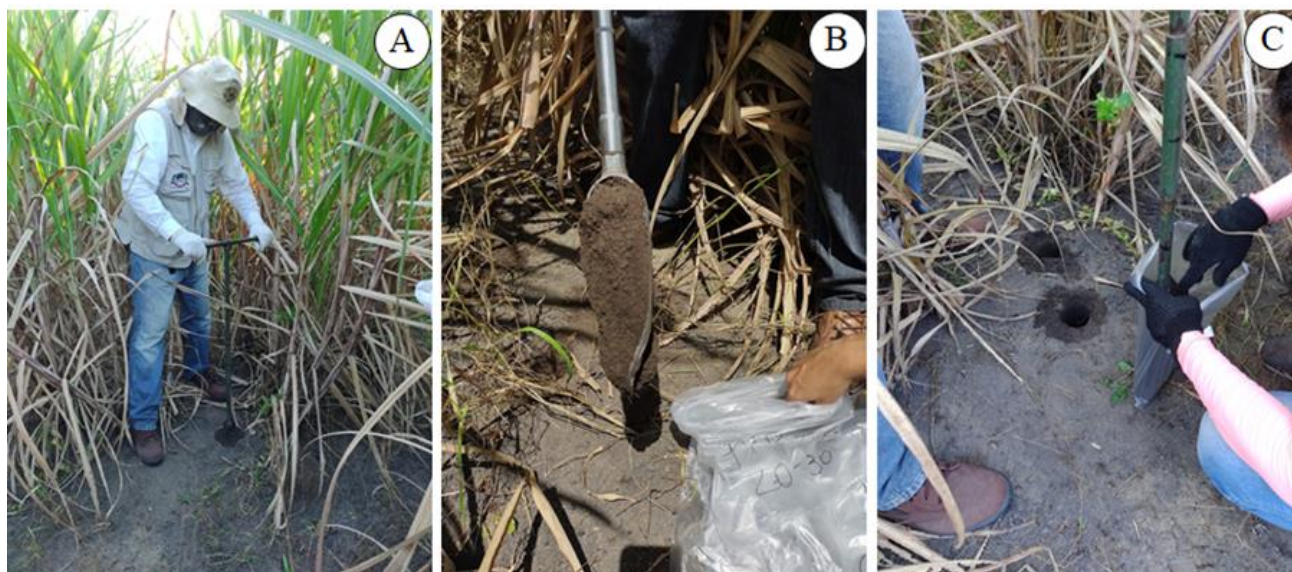


Figura 4 - Coleta de amostras deformadas. A) Coleta da amostra com auxílio de trado tipo holandês; B) Aspecto da amostra de solo após furo com trado; C) Processo de embalagem das amostras. **Fonte:** O Autor

O princípio deste ensaio é a dispersão mecânica e estabilização da amostra por meio de agitador em uma solução dispersante adequada, seguida da separação das frações por peneiramento e sedimentação. Medição das frações separadas por meio de pesagem após secagem em estufa (método padrão) ou da densidade da suspensão (TEIXEIRA et al., 2017).

Parte da TFSA foi utilizada nos ensaios para determinação dos atributos de caracterização dos solos. Em relação aos atributos físicos foram determinadas as frações granulométricas (areia, silte e argila), utilizando o método do densímetro, segundo Gee e Or (2002), com adaptações conforme comentadas em Almeida (2008). Desse modo, depois da dispersão química (calgon) e física (agitador tipo Wagner, por 16h), a leitura da fração argila total (AT) foi realizada após 24 h de repouso da suspensão; sendo a areia total obtida por peneiramento úmido; e o silte calculado por diferença, segundo a expressão: $\text{silte}\% = 100 - (\text{areia}\% + \text{argila total}\%)$.

Também foram coletadas amostras estruturadas, mas dessa fez utilizando-se cilindros volumétricos ($\cong 100 \text{ cm}^3$), inseridos ao solo com auxílio do amostrador tipo Uhland (Figura 5), sendo estas destinadas para as análises de porosidade total. As profundidades das coletas foram 0-15 e 15-30 cm, sendo nas mesmas profundidades coletadas amostras em forma de torrão, para determinação da estabilidade de agregados (EA).

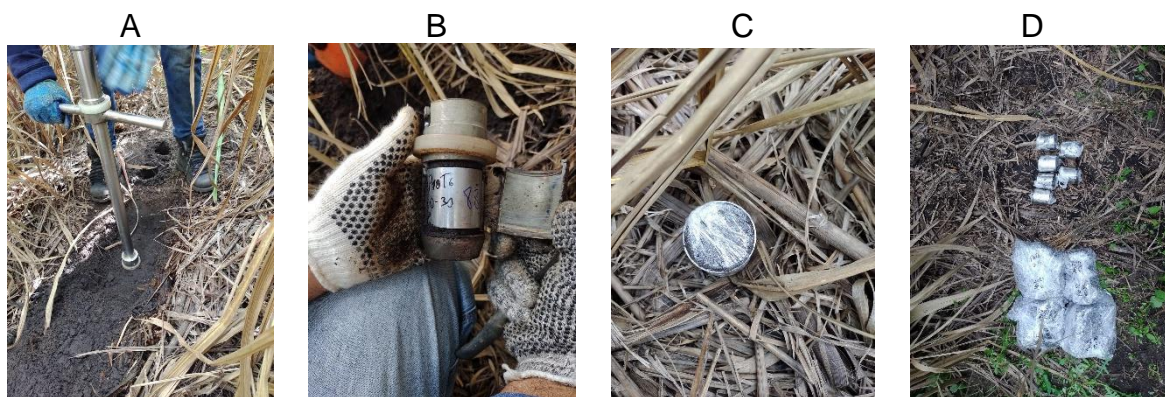


Figura 5 - Coleta de amostras de solos estruturados em anel volumétrico. A) amostrador tipo Uhland; B) Amostra em cilindro volumétrico dentro do “cachimbo”; C) e D) Cilindros com as amostras e processo de empacotamento para proteção da estrutura (plástico filme).

Fonte: O Autor.

A medida direta da porosidade total foi obtida pela mensuração da massa de água necessária para saturar uma amostra de solo de volume total conhecido (volume do cilindro volumétrico). Baseia-se na saturação do solo com água, que deve ocupar todo o volume de poros. Assume-se a densidade da água igual a 1.000 kg m^{-3} , e a massa de água obtida pela diferença do solo saturado e do solo seco em estufa, por pesagem em balança semi-analítica, igual a seu volume (TEIXEIRA et al., 2017).

Assim, a porosidade total foi determinada pelo método da saturação, onde os cilindros volumétricos contendo o solo (conjunto cilindro-amostra) foram saturados e pesados, seco em estufa por 16h a 105°C , e pesado novamente, que, por diferença, obteve-se o volume de poros e assim calculado a porosidade total (P), conforme equação 06:

$$P = \frac{[(a-b) - (c-d)]}{e} \quad (06)$$

onde: P – Porosidade total, em $\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$; a – massa do conjunto cilindro-amostra-tecido-liga saturado, em kg; b – massa do conjunto cilindro-amostra-tecido-liga seco a 105°C , em kg; c – massa do conjunto cilindro-tecido-liga saturado, em kg; d – massa do conjunto cilindro-tecido-liga seco a 105°C , em kg; e – volume total da amostra, em m^3 .

O método de determinação da densidade do solo visa medir a densidade média de um volume conhecido de solo, estando a densidade relacionada com a porosidade total e com a composição orgânica e mineralógica média do solo (TEIXEIRA et al., 2017).

A determinação da densidade do solo envolve duas etapas, sendo a obtenção da massa da amostra por pesagem e a determinação de seu volume. O volume foi obtido por meio da coleta de amostra com cilindro de volume conhecido (Figura 5). A massa da amostra é obtida por meio de sua pesagem após secagem em estufa, e o volume, por meio da medida do volume interno do cilindro metálico utilizado na coleta conforme Almeida (2012).

Deve-se medir e anotar as dimensões do cilindro que contém a amostra usando um paquímetro. Com esses dados calcula-se o volume do cilindro. Em relação a obtenção da massa, remover a amostra do cilindro e transferir para o recipiente numerado e de massa conhecida. Posteriormente secar em estufa a 105 °C por 48 horas, retirar, deixar esfriar em dessecador e pesar. Com esses resultados podemos calcular a densidade do solo (D_s) conforme a equação 07.

$$D_s = \frac{M_a}{V} \quad (07)$$

onde: D_s - Densidade do solo em kg dm^{-3} (equivalente a g cm^{-3}); M_a - Massa da amostra de solo seco a 105 °C até peso constante, em g; V - volume do cilindro, em cm^3 .

Os ensaios de campo para determinação da resistência à penetração das raízes (RP) foram realizados nos pontos da área experimental, nas profundidades de 0-30 cm e de 30-60 cm. Foram feitas medições totalmente automatizadas utilizando-se penetrômetro de campo da marca Falker®, modelo Solo Track PLG5300 (Figura 6A). Este equipamento mede a força necessária para que uma haste, com ponta em formato de cone, penetre o solo em diferentes profundidades realizando leituras de RP (em kPa) de 0 a 60 cm, a intervalos de 1 cm, até se atingir a profundidade definida. As leituras foram registradas e armazenadas no equipamento e depois transferidos para um computador onde puderam ser analisados e posteriormente foram feitas as médias das leituras para cada ponto, obtendo-se dessa forma, o valor da RP para cada camada.

Os ensaios de resistência do solo à penetração de raízes em laboratório foram realizados nos conjuntos de anéis-amostras que foram pesados e levados a um penetrômetro eletrônico de bancada, para realização dos ensaios de RP. Foi utilizado o modelo MA 933, da marca MARCONI® (Figura 6B), que por meio da inserção de uma agulha nas amostras, simula a penetração das raízes no solo. A RP foi determinada a partir da média das medições realizadas nos 3 três cm centímetros centrais de cada amostra, uma vez que foram desprezados os dados de medição do primeiro e o último centímetro, buscando-se evitar o efeito de bordadura. O aparelho é conectado a um computador para

aquisição dos dados, obtendo-se os resultados da RP em MPa, por meio de um software próprio do equipamento.

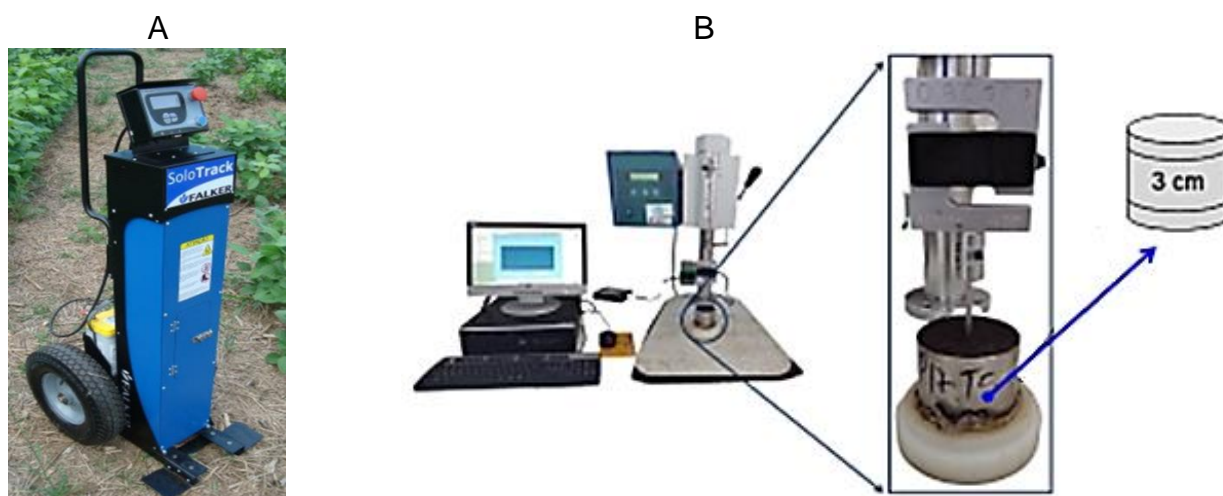


Figura 6 – Equipamentos penetrômetro para medir a RP. A) Penetrômetro de campo; B) Penetrômetro de bancada (utilizado em laboratório). **Fonte:** Silva (2022).

6 Resultados e Discussões

Os resultados indicam que os solos da área experimental apresentam problemas de compactação, podendo ser reflexo da textura mais arenosa/eu altos valores de densidade do solo altos ($> 1,2 \text{ g cm}^{-3}$), conforme dados apresentados na Tabela 1.

Tabela 1- Atributos físicos utilizados para a caracterização das amostras do Argissolo da área em estudo, sob cultivo de cana-de-açúcar.

Prof	Areia			Silte	Argila	ADA	GF	GD	S/A	Ds
	Grossa	Fina	Total							
- cm -	----- g kg ⁻¹ -----			----- % -----			-adm-	- g cm ⁻³ -		
0-15	545	239	784	61	155	135	12,90	87,10	0,40	1,71
15-30	516	240	756	63	181	161	11,05	88,95	0,35	1,73

Prof. = profundidade amostrada; ADA= argila dispersa em água; GF = Grau de flocculação; GD = Grau de dispersão; S/A = relação silte/argila; adm = adimensional; Ds = densidade do solo.

Os valores da argila dispersa em água ficaram próximos aos da argila total, tendo-se como consequência um baixo grau de flocculação; sendo, portanto, a maior parte da argila do solo dispersa pela ação da água, isto é, o solo tem alto grau de dispersão (87,10 e

88,95 %). Conforme comentado em Tavares Filho et al. (2010), estes altos valores dos GD pode ser o indicativo da menor estabilidade de agregados, que podem promover o aumento do escoamento superficial, afetando a susceptibilidade do solo à erosão.

Além das frações granulométricas, a densidade do solo (D_s) também foi utilizada como atributo físico de caracterização, para avaliar a relação com os índices de estabilidade dos solos. Nota-se que os valores de D_s são altos, variando de 1,71 a 1,73 g cm⁻³, nas profundidades de 0-15 e 15-30cm, respectivamente.

Outro atributo utilizado na pesquisa foi a estabilidade de agregados, aqui avaliada pelos índices DMP, DMG e IEA (Tabela 2)

Tabela 2. Diâmetro médio ponderado (DMP), diâmetro médio geométrico (DMG) dos agregados dos solos nas profundidades de 0 a 15 e 15 a 30 cm.

Via	DMP (mm)	CV (%)	DMG (mm)	CV (%)	DMP (mm)	CV (%)	DMG (mm)	CV (%)
	----- 0 – 15 cm -----				----- 15 – 30 cm -----			
Úmida	2,55B	16,66	1,98B	25,60	2,45B	17,89	1,90B	27,39
Seca	3,55A	2,11	3,42A	5,68	3,56A	1,85	3,44A	4,29

As letras indicam a diferenças entre os tratamentos no teste de Tukey a 5%, onde as maiúsculas comparam os resultados entre a mesma coluna.

Maiores valores de DMP e DMG estão relacionados com as forças de união da estrutura do solo, que podem ser modificados de acordo com o histórico de cultivos. A maior proporção de agregados do solo nas peneiras superiores (quando, conseqüentemente o DMP é alto, maior que 2 mm, por exemplo) indica que as forças envolvidas na formação e manutenção da estrutura do solo são maiores que as forças envolvidas nos processos de quebra e separação dos agregados.

Conforme pode ser observado na Tabela 2, os valores do DMP ficaram acima de 2 mm nas duas profundidades, independentemente das vias para separação, indicando que a maior parte dos agregados ficaram retidos nas peneiras superiores, refletindo a ação dos agentes cimentantes desses solos, mesmo tendo textura franco arenosa.

Observa-se também que os valores dos índices DMP e DMG determinados sob via úmida são menores que os determinados em via seca, devido aos altos valores dos GD (Tabela 1). De fato, nestas condições, a energia de ruptura, imposta aos agregados pela

ação da água durante os ensaios, aliada a alta capacidade da fração argila em se dispersar, colaboram com a diminuição da agregação, em ação contrária à dos agentes cimentantes.

Além dos atributos físicos dos solos, os químicos, apresentados na Tabela 3, também foram usados para explicar os resultados da alta compactação em profundidade.

Tabela 3. Resultados dos atributos químicos utilizados e estoque de carbono para a caracterização das amostras dos solos do talhão 6, sob cultivo de cana-soca, 2ª folha

Prof. (cm)	pH (H ₂ O)	COT		MOS	EstC (t ha ⁻¹)
		(g kg ⁻¹)			
0-15	6,63	20,12	34,68	51,48	
15-30	6,56	19,31	33,29	50,19	

Prof. = profundidade amostrada; COT = carbono orgânico total; MOS = matéria orgânica do solo; EstC = estoque de carbono no solo.

Os resultados da caracterização química, indicaram que os valores de pH em água (acidez ativa), confirmam que as amostras têm reação do solo classificada como levemente ácida, com valores entre 6,63 e 6,56, nas camadas superior e inferior, respectivamente (Tabela 3). O teor de carbono orgânico total (COT) variou de 20,12 g kg⁻¹ (na superfície) a 19,31 g kg⁻¹ (na subsuperfície).

Os teores de matéria orgânica dos solos (MOS), estimados a partir do COT variaram entre 34,68 e 33,29 g kg⁻¹ nas camadas superficiais e subsuperficiais, nessa ordem. Já o estoque de carbono (EstC), considerado como atributo físico, mas, por sua dependência do COT, teve valores que podem ser classificados como médios, tendo-se 51,48 e 50,19 t ha⁻¹, respectivamente para as camadas de 0 a 15 e 15 a 30 cm.

Os ensaios realizados para medir a resistência do solo à penetração das raízes (RP), quanto aos valores obtidos pelos penetrômetros (campo e laboratório), observa-se que os resultados determinados via penetrômetro de campo foram superiores quando comparado com os de laboratório, via penetrômetro de bancada (Tabela 4).

Esse comportamento se deve à diferença na umidade do solo durante a realização dos ensaios, que foram superiores quando realizados em laboratório. De fato, em laboratório as condições de umidades são controladas, determinando-se a RP em uma faixa de umidade mais ampla. Já os ensaios de campo, a determinação é realizada sob as condições naturais que, no momento dos ensaios, apresentou umidades mais baixas, e, conseqüentemente, resultando em valores mais altos de RP.

Tabela 4 - Estatística descritiva e teste de médias para umidade e resistência à penetração de raízes do solo em áreas cultivadas nas camadas 0-0,30m e 0,30-0,60m.

Parâmetros	Dados de campo				Dados de laboratório			
	0 - 0,30 m		0,30 - 0,60 m		0 - 0,30 m		0,30 - 0,60 m	
	U _c	RP _c	U _c	RP _c	U _L	RP _L	U _L	RP _L
	(%)	(MPa)	(%)	(MPa)	(%)	(MPa)	(%)	(MPa)
Média	11,08 a	1,42 b	13,76 A	1,75 A	18,80 c	0,88 a	18,80 AB	0,52 B
Mediana	11,08	1,36	13,73	1,77	17,72	0,58	19,26	0,33
Mínimo	8,19	0,69	9,74	1,01	13,00	0,17	7,00	0,10
Máximo	12,70	2,12	15,86	2,34	32,59	3,43	26,68	2,31
DP	1,02	0,40	1,25	0,31	4,78	0,83	4,41	0,55
Variância	1,04	0,20	1,57	0,10	22,87	0,70	19,42	0,30
CV (%)	9,19	28,12	9,12	17,71	25,44	95,11	23,44	106,08
Assimetria	-0,85	0,12	-0,65	0,02	1,67	2,22	-1,02	2,57
Curtose	0,55	-0,86	1,54	-0,26	3,77	5,50	2,75	7,49

RPC - Resistência do solo à penetração medida em campo; RPL - Resistência do solo à penetração medida em laboratório; UC – Umidade gravimétrica determinada com amostras úmidas diretamente do campo; UL – Umidade gravimétrica determinada em laboratório; DP – Desvio padrão; CV – Coeficiente de variação. **Fonte:** Adaptado de SILVA, N.B.N. (2022)

7 Considerações Finais

O objetivo desse trabalho foi aprofundar os conhecimentos na área de física do solo e determinar alguns de seus atributos (densidade do solo, porosidade, estabilidade de agregados e resistência à penetração das raízes).

Avaliamos a influência do tamanho das amostras nos índices de estabilidade de agregados de solos. Os resultados aqui apresentados, DMP e DMG, para as amostras com $\varnothing_{eq.} = 5,2$ mm, permitiram avaliar as relações entre esses índices de agregação e suas associações com os atributos físicos e químicos de caracterização dos solos. Desse modo, pode-se concluir que:

- Os DMP e DMG têm valores considerados altos, sendo estes influenciados, positivamente, pelos teores de matéria orgânica dos solos; e negativamente pelos altos valores de argila dispersa.

- Os valores de resistência do solo à penetração de raízes (RP), tanto de campo como em laboratório, são úteis para diagnosticar áreas degradadas e as limitações físicas do solo, sendo neste estudo verificado que solos coesos apresentaram piores condições. Verificamos a importância deste ensaio, mas cientes das limitações de seu alcance em função do alto custo das análises.

- Desta forma os ensaios de porosidade total e densidade do solo se apresentam como uma ferramenta valiosa nas análises sobre a compactação do solo em função da praticidade de execução e do baixo custo da análise, que se torna viável para atender a comunidade de pequenos agricultores familiares.

8 Referências

ALMEIDA, B. G. Métodos alternativos de determinação de parâmetros físicos do solo e uso de condicionadores químicos no estudo da qualidade do solo. Piracicaba, 2008, 103p. Tese (Doutorado: Solos e Nutrição de Plantas). Escola Superior de Agricultura —Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo.

ALMEIDA, B. G. de; DONAGEMMA, G. K.; RUIZ, H. A.; BRAIDA, J. A.; VIANA, J. H. M.; REICHERT, J. M. M.; OLIVEIRA, L. B.; CEDDIA, M. B.; WADT, P. G. S.; FERNANDES, R. B. A.; PASSOS, R. R.; DECHEN, S. C. F.; KLEIN, V. A.; TEIXEIRA, W. G. Padronização de métodos para análise granulométrica no Brasil. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2012. 11 p. (Embrapa Solos. Comunicado técnico, 66).

BRIZZI, R. R.; CARRERO, H. P.; SOUZA, A. P.; COSTA, A. J. S. T.; RANGEL, L. A. Avaliação macro e microestrutural de solos sob diferentes usos a partir de análises físicas, microscopia eletrônica e espectroscopia por energia dispersiva. *Raega - O Espaço Geográfico em Análise*, v. 46, n. 1, p. 25-40, 2019. <http://dx.doi.org/10.5380/raega.v46i1.53023>

DENARDIN, J. E. Compactação e Adensamento de Solo: caracterização, origem, riscos, danos e soluções. Embrapa, 2018.

HILLEL, D. Environmental soil physics: fundamentals, applications, and environmental considerations. New York: Academic Press, 1998. 771p.

MARCELO, V. F.; ALMEIDA, B. G.; ARAÚJO FILHO, J. C.; SOUZA, W. L. S. Disponibilidade hídrica de solo coeso sob a ação de poliacrilamida: qualidade física ambiental. Rev. Bras. Ci. Amb. n. 42, p. 12-25. 2016.

PEREIRA, J.O.; SIQUEIRA, J.A.C.; URIBE-OPAZO, M.A. & SILVA, S.L. Resistência do solo à penetração em função do sistema de cultivo e teor de água do solo. R. Bras. Eng. Agríc. Amb., 6:171-174, 2002.

REINERT, D.J. & REICHERT, J.M. 2006. Propriedades físicas do solo. Santa Maria: Departamento de Solos, UFSM. 18 p.

SALTON, J. C.; SILVA, W. M.; TOMAZI, M.; HERNANI, L. C. Agregação do solo e estabilidade de agregados. In: TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. (eds.). Manual de métodos de análise de solo. 3.ed. rev. ampl. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2017. p.129-138. ISBN: 978-85-7035-771-7.

TAVARES FILHO, J.; BARBOSA, G. M. C.; RIBON, A. A. Water-dispersible clay in soils treated with sewage sludge. Revista Brasileira de Ciência do Solo, [S. l.], v. 34, p. 1527–1534, 2010. DOI: 10.1590/S0100-06832010000500005.

TEIXEIRA, P. C. ... [et al.], Editores técnicos, Manual de métodos de análise de solo. – 3. ed. rev. e ampl. – Brasília, DF: Embrapa, 2017. 574 p.

VAN LIER, Q. de J. Física do solo - baseada em processos / editado por Quirijn de Jong van Lier. - Piracicaba: Edição do autor, 2020. 413 p.

VIK, B., BASTESSEN, E., SKAUGE, A. Evaluation of representative elementary volume for a vuggy carbonate rock – part I: porosity, permeability, and dispersivity. Journal of Petroleum Science and Engineering, 112, p. 36-47, 2013.