



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIAS DO SOLO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DO SOLO

LUCAS DE SOUSA OLIVEIRA

**RESISTÊNCIA TÊNซิล: PROPOSTA E VALIDAÇÃO DE INSTRUMENTO
PORTÁTIL PARA VALORAR CONSISTÊNCIA EM SOLO SECO**

FORTALEZA

2021

LUCAS DE SOUSA OLIVEIRA

RESISTÊNCIA TÊNซิล: PROPOSTA E VALIDAÇÃO DE INSTRUMENTO PORTÁTIL
PARA VALORAR CONSISTÊNCIA EM SOLO SECO

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Ciência do Solo. Área de concentração: Manejo do Solo e da Água.

Orientador: Prof. Dr. Jaedson Cláudio Anunciato Mota.

FORTALEZA

2021

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária

Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- O48r Oliveira, Lucas de Sousa.
Resistência tênsil: Proposta e validação de instrumento portátil para valorar consistência em solo seco / Lucas de Sousa Oliveira. – 2021.
59 f. : il. color.
- Tese (doutorado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Ciências Agrárias, Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Fortaleza, 2021.
Orientação: Prof. Dr. Jaedson Cláudio Anunciato Mota.
1. Caracterização morfológica. 2. Instrumentação na agricultura . 3. Qualidade estrutural do solo. I. Título.
CDD 631.4
-

LUCAS DE SOUSA OLIVEIRA

RESISTÊNCIA TÊNซิล: PROPOSTA E VALIDAÇÃO DE INSTRUMENTO PORTÁTIL
PARA VALORAR CONSISTÊNCIA EM SOLO SECO

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Ciência do Solo. Área de concentração: Manejo do Solo e da Água.

Aprovada em: 28/10/2021.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Jaedson Cláudio Anunciato Mota (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dra. Mirian Cristina Gomes Costa
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Ricardo Espíndola Romero
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Dra. Francisca Gleiciane da Silva
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Aleksandro dos Santos Brito
Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia Baiano (IF Baiano)

A Deus.

Ao amigo Jaedson Cláudio Anunciato Mota.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por sempre estar comigo, pela força e coragem para continuar em caminhos de retidão.

Aos meus pais Francisco Pereira de Oliveira e Francisca de Sousa Oliveira, meu infinito agradecimento. Sempre acreditaram que esse sonho seria possível e me ensinaram a perseguir meus ideais com dedicação e coragem.

Aos meus irmãos, cunhadas e sobrinhos, pela amizade e companheirismo.

À minha companheira Ana Caroline, pelo companheirismo, paciência, compreensão, apoio e amor, essenciais para a concretização deste trabalho.

Ao Prof. Dr. Jaedson Cláudio Anunciato Mota, pela excelente orientação, pelos ensinamentos passados, amizade e presteza ao longo desses anos. Muito Obrigado!

Aos professores do Departamento de Ciências do Solo pelos ensinamentos, orientações e amizade.

Ao professor Roberto Maia pelo auxílio no desenvolvimento do instrumento proposto e pela presteza ao longo desses anos. Obrigado.

Aos colegas pós-graduandos pela amizade, momentos de descontração e ensinamentos compartilhados durante a realização deste trabalho.

Aos funcionários do Departamento de Ciências do Solo pela disponibilidade, simpatia e gentileza.

Aos colegas do Laboratório de Física do Solo, Franzé, Alexandre, Ícaro, Márcio Godofrêdo, Cillas, Thiago Leite, Tâncio, Angélica, Emanuela, Gleiciane e Ronaldo pela amizade e auxílio na realização das coletas e análises.

À Universidade Federal do Ceará e ao Departamento de Ciências do Solo.

À CAPES, pelo apoio financeiro com a manutenção da bolsa de auxílio.

Ao Programa de Apoio à Pós-Graduação (PROAP/CAPES) pelo apoio financeiro.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq (Processo: 301215/2018-9), pelo auxílio financeiro.

A todos que de alguma forma contribuíram para concretização deste trabalho.

Muito obrigado.

A menos que modifiquemos a nossa maneira de pensar, não seremos capazes de resolver os problemas causados pela forma como nos acostumamos a ver o mundo.
(Albert Einstein)

RESUMO

Equipamentos têm sido propostos para a mediação da força máxima que provoca a ruptura em agregados do solo; no entanto, nenhum portátil foi desenvolvido para mensurar a percepção do avaliador quando este atribui qualidade à consistência em solo seco, tampouco para ser utilizado na avaliação da qualidade estrutural do solo. As estimativas da qualidade da consistência na condição de solo seco e da qualidade estrutural requerem melhorias quanto à percepção do avaliador e o desenvolvimento de um instrumento torna-se necessário. Objetivou-se com esta pesquisa: 1) propor e validar um dinamômetro portátil para valorar consistência em solo seco, denominado TS-Soil; 2) definir a melhor forma do agregado e faixas de valores para os graus de consistência em solo seco e; 3) validar um dinamômetro portátil para monitorar a qualidade estrutural do solo, considerando seus usos em campo. O primeiro estudo, para fins de obtenção da resistência tênsil de agregados do solo (RT), foram realizados ensaios com agregados de cinco horizontes de superfície (A) e de subsuperfície (Bi, Bt com caráter coeso, Bt e Bw). Em cada horizonte foram selecionados 60 agregados com diâmetro entre 19 e 25 mm; destes, 30 tiveram a resistência tênsil (RT), medida no dinamômetro de bancada e 30 no instrumento TS-Soil, considerando os mesmos tratamentos descritos anteriormente. A análise dos dados foi realizada considerando o delineamento inteiramente aleatorizado em esquema fatorial 2 x 5 (dois equipamentos; cinco horizontes) com 30 repetições. No segundo estudo, para definir a faixa de valores de RT para consistência em solo utilizando o instrumento TS-Soil, foram considerados 100 agregados de cada horizonte mencionados anteriormente. A cada agregado foi atribuída nota correspondente à percepção do pedólogo ao aplicar uma força para rompê-lo. No terceiro estudo, para validação do instrumento TS-Soil, considerando os usos dos solos em campo, foram selecionadas três áreas (cultivada com banana, milho e sob mata secundária). Destas, foram coletados blocos de solo e, de cada bloco, foram selecionados 100 agregados (50 agregados tiveram a RT medida no equipamento de bancada e 50 no instrumento TS-Soil). Para determinação do carbono orgânico e densidade do solo foram selecionados 50 agregados em cada área para determinação de tais atributos. Os dados de RT foram submetidos à análise de variância considerando o experimento inteiramente aleatorizado, em esquema fatorial 3 x 2 (três áreas de estudo; dois equipamentos), com 50 repetições. Constatou-se que não há diferença na RT medida por ambos os equipamentos (bancada e TS-Soil) tanto para o teste em laboratório quanto à sua sensibilidade nas áreas manejadas. As notas atribuídas pelo avaliador corresponderam às faixas de valores de RT, possibilitando estabelecer o limiar entre as classes

de consistência. Conclui-se que: 1) há boa concordância entre os equipamentos avaliados na medição da RT de agregados em solo seco; 2) A substituição do dinamômetro de bancada pelo TS-Soil não resulta em diferenças significativas nos valores de RT em suas formas naturais, daí a validação do instrumento TS-Soil para uso no campo ou em laboratório; 3) O instrumento TS-Soil possibilita combinar a percepção do avaliador com a força aplicada para romper o agregado, tornando possível a definição de faixas de valores para os graus de consistência do solo seco; 4) A percepção qualitativa associada com valores de RT confere melhor qualidade ao processo de avaliação da consistência em solo seco; e 5) o TS-Soil é sensível o suficiente para monitorar alterações na qualidade estrutural do solo considerando seus usos em campo.

Palavras-chave: caracterização morfológica; instrumentação na agricultura; qualidade estrutural do solo.

ABSTRACT

Equipment has been proposed for measuring the maximum force that causes a rupture in soil aggregates; however, no portable device was developed neither to measure the evaluator's perception when he attributes quality to soil consistency when dry nor to be used in the evaluation of the soil structural quality. Estimates of the quality of soil consistency when dry and structural quality requires improvements in the evaluator's perception and the development of an instrument becomes necessary. The objective of this research was: 1) to propose and validate a portable dynamometer to assess soil consistency when dry, called TS-Soil; 2) define the best aggregate shape and value ranges for the degrees of soil consistency when dry and 3) validate a portable dynamometer to monitor the soil structural quality, considering its field uses. In the first study, to obtain the tensile strength of soil aggregates (TS), tests were carried out with aggregates from five surface (A) and subsurface (Bi, Bt with cohesive character, Bt, and Bw) horizons. In each horizon, 60 aggregates with a diameter between 19 and 25 mm were selected; of these, 30 had their tensile strength (TS), measured in a bench dynamometer, and 30 in the TS-Soil instrument, considering the same treatments described above. Data analysis was performed considering the completely randomized design in a 2 x 5 factorial scheme (two devices; five horizons) with 30 repetitions. In the second study, to define the range of TS values for soil consistency using the TS-Soil instrument, 100 aggregates from each horizon mentioned above were considered. Each aggregate was assigned a score corresponding to the pedologist's perception when applying a force to break it. In the third study, to validate the TS-Soil instrument, considering the uses of land in the field, three areas were selected (cultivated with banana, corn, and under secondary forest). From these, soil blocks were collected, and, from each block, 100 aggregates were selected (50 aggregates had their TS measured in the bench equipment and 50 in the TS-Soil instrument). To determine the soil organic carbon and bulk density, 50 aggregates were selected in each area. The TS data were subjected to analysis of variance considering the completely randomized design, in a 3 x 2 factorial scheme (three study areas; two equipment), with 50 repetitions. It was found that there is no difference in the TS measured by both equipment (bench and TS-Soil) both for the laboratory test and its sensitivity in the managed areas. The scores assigned by the evaluator corresponded to the TS value ranges, making it possible to establish the threshold between the soil consistency classes. It is concluded that: 1) there is good agreement between the equipment evaluated in measuring the TS of soil aggregates when dry; 2) The replacement of the bench dynamometer by the TS-Soil does not

result in significant differences in the TS values in their natural forms, hence the validation of the TS-Soil instrument for use in the field or the laboratory; 3) The TS-Soil instrument makes it possible to combine the evaluator's perception with the force applied to break the aggregate, making it possible to define value ranges for the degrees of soil consistency when dry; 4) The qualitative perception associated with TS values gives better quality to the process of evaluation of the soil consistency when dry; 5) the TS-Soil dynamometer is sensitive enough to monitor changes in the soil structural quality considering its field uses.

Keywords: morphological description; instrumentation in agriculture; soil structural quality.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	- Localização dos pontos de coleta dos blocos de solo	24
Figura 2	- Etapas realizadas na coleta e preparo dos agregados para determinação da resistência tênsil	26
Figura 3	- Dinamômetro de bancada com célula de carga com suporte até 20 kgf e sua curva de calibração	27
Figura 4	- Instrumento proposto (TS-Soil) com célula de carga com suporte até 50 kgf. Figura A – visão frontal do instrumento TS-Soil; B – localização das partes que constituem o TS-Soil; C – instrumento em operação no modo automático em laboratório; D – momento da ruptura do agregado no TS-Soil	28
Figura 5	- Fluxograma dos procedimentos realizados na coleta e preparo dos agregados para determinação da resistência tênsil	33
Figura 6	- Valores médios de umidade de agregados (%) no momento do ensaio de resistência tênsil nos instrumentos de bancada e TS-Soil. Médias seguidas pela mesma letra minúscula não diferem entre si a 0,05 de significância pelo teste de Tukey	36
Figura 7	- Valores médios de umidade dos agregados (%) no momento do ensaio de resistência tênsil nos instrumentos de bancada e TS-Soil. Médias seguidas pela mesma letra minúscula não diferem entre si a 0,05 de significância pelo teste de Tukey	37
Figura 8	- Valores médios de resistência tênsil de agregados para o equipamento de bancada e TS-Soil e para os horizontes A, Bi, Bt com caráter coeso, Bt e Bw em solo seco. Médias seguidas pela mesma letra maiúscula para os equipamentos e minúscula para os horizontes não diferem pelo teste de Tukey a 0,05 de significância	39
Figura 9	- Correlação entre os valores de resistência tênsil de agregados em solo seco para o equipamento de bancada e TS-Soil. Índices estatísticos (d - índice de concordância de Willmott; E – eficiência; CD – coeficiente de determinação; Emáx – erro máximo; EAméd – erro absoluto médio; RMSE – raiz quadrada do erro médio normalizado; CMR – coeficiente de massa residual)	42

Figura 10	- Distribuição das faixas de resistência tênsil por notas atribuídas à consistência seca de agregados (notas: 1 – <i>solta</i> ; 2 – <i>macia</i> ; 3 – <i>ligeiramente dura</i> ; 4 – <i>dura</i> ; 5 – <i>muito dura</i> ; 6 – <i>extremamente dura</i>)	46
Figura 11	- Valores médio de resistência tênsil de agregados para usos dos solos. Médias seguidas pela mesma letra maiúscula para as áreas avaliadas não diferem pelo teste de Tukey a 0,05 de significância	49
Figura 12	- Valores médios de resistência tênsil de agregados do solo obtidos pelos dinamômetros de bancada e TS-Soil. Médias seguidas pelas mesmas letras minúsculas não diferem pelo teste de Tukey a 0,05 de significância	50
Figura 13	- Valores médios de carbono orgânico total (COT) nas áreas avaliadas. Médias seguidas pela mesma letra minúscula não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 0,05 de significância	52
Figura 14	- Valores médios de densidade do solo (Ds) nas áreas estudadas. Médias seguidas pela mesma letra minúsculas não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 0,05 de significância	53

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	- Granulometria e classe textural dos horizontes dos solos em que foram coletados os agregados	25
Tabela 2	- Descrição morfológica dos horizontes dos solos em que foram coletados os agregados	25
Tabela 3	- Granulometria e classe textural das classes de solo em que foram realizadas as coletas dos agregados	32
Tabela 4	- Análise exploratória dos valores de resistência de agregados do solo, em horizontes superficiais e de subsuperfície, obtidos pelo equipamento de bancada e TS-Soil	35
Tabela 5	- Análise de variância da umidade dos agregados avaliados nos ensaios de resistência tênsil de cada horizonte no dinamômetro de bancada e TS-Soil	36
Tabela 6	- Análise de variância da resistência tênsil de agregados do solo obtidos pelo equipamento de bancada e TS-Soil em agregados em formas naturais	38
Tabela 7	- Diferença relativa (%) entre o instrumento portátil e o equipamento padrão	41
Tabela 8	- Percentagem das notas atribuídas pelo avaliador à consistência em solo seco e estatística descritiva para os respectivos valores de resistência tênsil obtidos no instrumento TS-Soil	44
Tabela 9	- Proposta de valores de resistência tênsil de agregados aos graus de consistência em solo seco	47
Tabela 10	- Análise de variância de dados de resistência tênsil de agregados obtidos pelo equipamento de bancada e TS-Soil em solo cultivado e sob mata secundária	48
Tabela 11	- Análise de variância do carbono orgânico total (COT) e densidade do solo (Ds) das áreas manejadas e mata secundária	51

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
2	REVISÃO DE LITERATURA	17
2.1	Consistência do solo: definição e importância agrônômica	17
2.2	Relação de atributos físicos e químicos com a resistência tênsil de agregados	18
2.3	Métodos de determinação da resistência tênsil de agregados	21
2.4	Influência da forma dos agregados do solo sobre a resistência tênsil	22
3	MATERIAL E MÉTODOS	24
3.1	Experimento para validar o dinamômetro portátil em laboratório	24
3.2	Análise dos dados	29
3.3	Experimento para definir faixa de valores para os graus de consistência em solo seco	30
3.4	Análise dos dados	31
3.5	Experimento para validar o instrumento portátil considerando os usos dos solos em campo	31
3.6	Análise dos dados	33
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	35
4.1	Validação do dinamômetro portátil em laboratório	35
4.2	Faixas de valores para os graus de consistência em solo seco	43
4.3	Validação do dinamômetro portátil para inferir sobre usos em campo	48
5	CONCLUSÕES	54
	REFERÊNCIAS	55

1 INTRODUÇÃO

Vários atributos são utilizados como indicadores de qualidade física do solo. É importante destacar que um bom indicador de qualidade física deve incluir os atributos que influenciam diretamente a produção das culturas, ao passo que eles possam prever sobre a magnitude com a qual a matriz do solo resiste à deformação e a sua capacidade de o solo fornecer de forma equilibrada ar e água para as culturas; e também como parte das condições para a escolha do momento adequado para realização de práticas agrícolas bem como os que influenciam indiretamente a produtividade ao determinar condições de preparo de solo e trafegabilidade. Indicadores de qualidade física como densidade, curva de retenção de água no solo e resistência tênsil de agregados do solo são frequentemente utilizados para o monitoramento das práticas de manejo do solo.

A resistência tênsil dos agregados é definida como a força por unidade de área necessária para causar ruptura dos agregados. Na literatura são ressaltados problemas no estabelecimento das culturas associados com condições físicas inadequadas do solo, decorrentes de valores elevados de resistência tênsil dos agregados. Tais problemas estão ligados sempre à dificuldade na penetração das raízes e implementos agrícolas, o que reflete diretamente em problemas na emergência de plântulas e redução do crescimento radicular em camadas secas do solo.

A resistência tênsil dos agregados pode ser determinada por meio de testes diretos e indiretos. Os testes diretos são assim denominados porque duas forças de mesma direção e sentido oposto são aplicadas de forma direta em dois extremos do agregado, separando-o em duas partes pelo efeito da ação dessas forças. Já nos testes indiretos, os mais utilizados na maioria das pesquisas, o estresse não é aplicado diretamente sobre os agregados. Nesse caso, uma força compressiva é aplicada a uma placa que transmite a força através do diâmetro do agregado, o que produz incremento do estresse dentro dele.

Os instrumentos utilizados para determinação da resistência tênsil dos agregados que apresentam resultados mais confiáveis, geralmente são de elevado valor comercial, o que os tornam onerosos. Equipamentos ao longo dos anos têm sido propostos para a obtenção da força máxima para provocar a ruptura dos agregados do solo, no entanto, há demanda por instrumento portátil para mensurar a percepção do avaliador quando este atribui qualidade à consistência em solo seco e para ser utilizado na avaliação da qualidade estrutural do solo.

No campo, a determinação da resistência tênsil do agregado de determinado horizonte do solo é quantificada conforme a força que é aplicada pelo pedólogo que tende a

rompê-lo, seja entre os dedos ou mesmo entre as mãos. Ainda existem dificuldades na identificação da resistência do agregado quando realizada em campo pela avaliação qualitativa feita com base em caracteres morfológicos. Desta forma, esse procedimento, por levar à grande variabilidade de resultados, dificulta a precisão na abordagem sobre a resistência tênsil de agregados.

Face ao exposto, foram consideradas as seguintes hipóteses: 1) o dinamômetro TS-Soil é sensível para quantificar a força aplicada pelo pedólogo na avaliação qualitativa da resistência tênsil em campo; 2) aliando a concepção do pedólogo na avaliação qualitativa com as medidas quantitativas de resistência tênsil realizadas com o uso do TS-Soil, é possível elaborar escala com valores de referência de resistência tênsil de agregados para a consistência em solo seco; e 3) o TS-Soil é sensível para o monitoramento da qualidade estrutural do solo considerando o uso no campo.

Desse modo, objetivou-se com esta pesquisa: a) propor e validar um instrumento portátil para valorar consistência em solo seco; b) definir a melhor forma do agregado e faixas de valores para os graus de consistência em solo seco e; c) validar um dinamômetro portátil para monitorar a qualidade estrutural do solo considerando seus usos em campo.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Consistência do solo: definição e importância agrônômica

O termo consistência designa modificações das forças físicas de coesão e de adesão em decorrência da variação da umidade do solo. De forma geral, o conceito de consistência do solo inclui a resistência à compressão e ao esforço cisalhante, friabilidade, plasticidade e pegajosidade, propriedades que se manifestam conforme a variação das forças de adesão e coesão (VASCONCELOS *et al.*, 2010).

Observações de campo realizadas pelo pedólogo e investigações experimentais evidenciam que a consistência é influenciada pela textura, matéria orgânica, a quantidade e natureza do material e o tipo de cátion. As formas de consistência apresentadas pelos solos, conforme o conteúdo de água tem importância agrícola quanto ao preparo mecânico das terras cultivadas (SIVARAJAN *et al.*, 2018).

A implantação de sistemas agrícolas em áreas de vegetação nativa ou em processo de regeneração acarreta alterações em propriedades e processos de ordem física, química e biológica no solo (SCHMID *et al.*, 2020). Com a remoção da cobertura vegetal, além da redução dos processos de ciclagem de nutrientes e aceleração da decomposição da matéria orgânica, há modificação dos atributos físicos como densidade, estrutura, porosidade e distribuição dos agregados, comprometendo o suprimento de água, disponibilidade de nutrientes às plantas, processos microbianos e a penetração das raízes (DEXTER, 1988; MUTUKU *et al.*, 2020).

As atividades agrícolas devem ser realizadas com solo no estado de friabilidade, que corresponde à faixa de umidade entre os limites de contração e plasticidade. Nesse estado, o solo está úmido, apresentando melhores condições para os diversos tipos de manejo; portanto, a faixa de friabilidade é definida como a faixa adequada de trabalhabilidade do solo (SIVARAJAN *et al.*, 2018).

A compactação do solo é um dos principais problemas da agricultura. Os problemas ocasionados pela compactação têm sido reportados em várias partes do mundo: nos Estados Unidos (SIVARAJAN *et al.*, 2018), na Croácia (BOGUNOVIC *et al.*, 2018), no Brasil (DE MELO *et al.*, 2021), na Austrália (CHEN *et al.*, 2014); em todos os relatos há grandes áreas degradadas, com diminuição da produtividade dos cultivos.

Diante disso, a determinação do teor de água adequado à realização das atividades mecanizadas torna-se ferramenta útil visto que, na tentativa de se atender a um cronograma

relacionado às atividades agrícolas não se considera a faixa de umidade ideal, o que aumenta os riscos de degradação física do solo (SIVARAJAN *et al.*, 2018; DE MELO *et al.*, 2021).

Desta forma, práticas de manejo do solo em áreas com condições de umidade inadequadas provocam alterações decorrentes do processo de compactação ao longo de seu perfil, e como resultado tem-se a redução da qualidade física em decorrência, principalmente, da redução da macroporosidade. Isso implica problemas nas trocas gasosas do solo com a atmosfera externa (LIMA *et al.*, 2017).

A qualidade física do solo está relacionada com a sustentabilidade de sistemas agropecuários e sua avaliação deve ser feita por meio de indicadores que reflitam seu comportamento (ESCRIBANO *et al.*, 2020). Esses indicadores físicos exercem funções de sustentação do solo, uma vez que é observada relação entre a melhoria dos indicadores físicos e qualidade química e biológica do solo (DEXTER, 1985; YANG *et al.*, 2020).

Ao considerar que o solo é um recurso limitado e que alguns de seus componentes necessitam de períodos prolongados para serem reestabelecidos, a previsão do grau das perturbações provocadas pelo seu uso e manejo inadequado, principalmente pelas operações agrícolas, se torna essencial (OLIVEIRA FILHO *et al.*, 2019; YANG *et al.*, 2020).

2.2 Relação de atributos físicos e químicos com a resistência tênsil de agregados

Vários atributos são utilizados como indicadores de qualidade física dos solos. Há um consenso que os indicadores deveriam incluir os atributos que influenciam tanto a produção das culturas, ao determinar a magnitude com a qual a matriz do solo resiste à deformação e a capacidade de o solo fornecer ar e água para as plantas de forma equilibrada, quanto aqueles que influenciam indiretamente a produtividade ao determinar condições de preparo de solo e trafegabilidade (BAVOSO *et al.*, 2010). Dentre os indicadores de qualidade física do solo frequentemente utilizados no monitoramento das práticas de manejo do solo destaca-se a resistência tênsil de agregados (MUNKHOLM *et al.*, 2016; BARBOSA; FERRAZ, 2020).

A resistência tênsil dos agregados é um dos atributos físicos amplamente utilizado como indicador da condição estrutural do solo (DEXTER; KROESBERGEN, 1985; BARBOSA; FERRAZ, 2020). Na literatura são ressaltados problemas no estabelecimento das culturas associados com condições físicas inadequadas do solo na semeadura, decorrentes de valores elevados de resistência dos agregados (STEFANOSKI *et al.*, 2013; RAESI, 2021; ZHANG *et al.*, 2021).

Elevados valores de resistência tênsil têm sido associados a vários problemas no estabelecimento de diversas culturas, relacionados sempre à dificuldade na penetração de implementos agrícolas e raízes das plantas, o que reflete diretamente em problemas na emergência de plântulas e redução do crescimento radicular em camadas secas do solo (MUNKHOLM *et al.*, 2016; WINSTONE *et al.*, 2019; Li *et al.*, 2020).

As atividades de preparo do solo podem induzir a perda da resistência tênsil dos agregados, causada principalmente pela diminuição e ou destruição das ligações químicas entre as partículas, tanto de natureza orgânica, quanto inorgânica, tornando o solo mecanicamente instável (SITHOLE; MAGWAZA; 2019; WEI *et al.*, 2021). Por outro lado, autores associaram o aumento da resistência tênsil dos agregados ao incremento da quantidade de argila dispersa em água em solos fisicamente degradados, uma vez que as argilas se depositam em espaços ou fissuras existentes entre os agregados, atuando desse modo como agente agregante (YU *et al.*, 2017). Ambos os efeitos exercem impacto negativo sobre a qualidade física do solo (ABDOLLAHI; MUNKHOLM, 2014). Agregados com menor diâmetro apresentam maiores valores de resistência tênsil (OLIVEIRA *et al.*, 2021), o que contribui para dificuldades no estabelecimento de diversas culturas.

Outro atributo do solo que merece ser destacado é a estabilidade de agregados (TISDALL; OADES, 1982). De acordo com estudos (BRONICK; LAL, 2005; CHERUBIN *et al.*, 2017; RABOT *et al.*, 2018), há indícios de que o uso do solo altera a estabilidade dos agregados maiores que 0,25 mm. A quebra dos agregados, e conseqüentemente separação das partículas constituintes do solo, faz com que as argilas se depositem na superfície dos agregados e obstruam poros que redistribuem ou armazenam água no solo, resultando em estruturas indesejáveis funcionalmente e com características bem semelhantes a superfícies compactadas (STEFANOSKI *et al.*, 2013).

Nesse contexto, as pesquisas desenvolvidas no estudo da resistência tênsil dos agregados (DEXTER; KROESBERGEN, 1985; DEXTER; WATTS, 2000; SEBEN JR *et al.*, 2013; STEFANOSKI *et al.*, 2013; MUNKHOLM *et al.*, 2016; BARBOSA; FERRAZ, 2020; FAUSTINO *et al.*, 2021) têm demonstrado que a resistência tênsil dos agregados do solo é influenciada por fatores como umidade do solo, tipo e teor de argila, mineralogia, carbonato de cálcio, óxidos e hidróxidos de ferro, alumínio e manganês, exsudados orgânicos das plantas e substâncias proveniente da ação e decomposição dos microrganismos.

O conhecimento do tipo de argila assim como seu comportamento quando submetida a diferentes condições de umedecimento e secagem devem ser considerados como

agente de aproximação entre as partículas do solo (ANNABI *et al.*, 2017), o que, por sua vez, constitui fator relevante para a formação da estrutura do solo (EDEN *et al.*, 2020).

Quanto à mineralogia do solo, é importante o conhecimento sobre o tipo de argila, atividade e quantidade que compõe o solo, silte e areia e suas frações (EDEN *et al.*, 2020). Pesquisas reportam que as argilas influenciam tanto na forma dos agregados, como em maiores níveis de dureza quando secos (ANNABI *et al.*, 2017; MUNKHOLM *et al.*, 2016; OLIVEIRA *et al.*, 2020). Melo *et al.* (2008) também observaram que em solos mais evoluídos, como os Latossolos, a formação de agregados com formas mais esféricas estava ligada a elevados teores de gibbsita, goethita e hematita, cuja causa foi relacionada à maior tendência de neutralização das cargas negativas da caulinita, o que pode ter contribuído para o aumento de diâmetro dos agregados desse solo.

A fração areia também é importante na formação de agregados e no efeito desses sobre a resistência tênsil. Segundo Portugal *et al.* (2008), solos com mineralogia constituída por areia fina combinada a argila há o favorecimento a formação de agregados maiores e com formas mais esféricas. Esse tipo de agregados constituídos por uma fração de areia mais fina é frequentemente encontrado em solos em processo avançado de intemperização, por conta das condições climáticas de elevada temperatura e precipitação pluvial, bem como de outros fatores formativos de solos. Resultados sobre a contribuição da areia na formação de agregados são observados na avaliação da qualidade estrutural de um Latossolo Vermelho, no qual foi verificado aumento na quantidade e estabilidade de agregados do horizonte superficial até os horizontes mais profundos, em decorrência do efeito de teores mais elevados de areia associados à argila (OLIVEIRA *et al.*, 2013).

Outro agente que influencia os valores de resistência tênsil dos agregados são os teores de carbonatos. Esse efeito do carbonato pode estar ligado ao efeito na alteração da composição química da solução do solo. Assim, alterações ligadas a teores elevados de carbonatos estão ligadas a dispersão ou flocculação dos colóides e por consequência, na agregação das partículas do solo (INAGAKI *et al.*, 2016).

Dentre os fatores químicos que se relacionam com a resistência tênsil, a matéria orgânica do solo contribui para o seu aumento, principalmente quando o teor de silte mais argila é elevado (FERREIRA *et al.*, 2011; BLANCO-MOURE *et al.*, 2012). O aumento nos valores de resistência tênsil influenciado pelo carbono orgânico pode ser explicado pelo efeito da cimentação entre as partículas minerais de argila e matéria orgânica mais humificada.

Apesar da assertiva de que o carbono orgânico contribui para aumentar a resistência tênsil de agregados, vale destacar que trabalhos como o de Imhoff *et al.* (2002) não

verificaram correlação significativa entre o conteúdo de carbono orgânico e a resistência tênsil de agregados de um Oxisol. Tormena *et al.* (2008), avaliando a resistência tênsil em solos com mineralogia composta por caulinita e óxidos de ferro e alumínio, com estruturas dominada por agregados arredondados e com elevada porosidade, não verificaram efeito do carbono orgânico na resistência tênsil dos agregados, corroborando os resultados obtidos por Imhoff *et al.* (2002). Valores mais elevados de resistência tênsil dos agregados do solo estão ligados a solos com maior porcentagem de argila em associação com elevados teores de carbono orgânico, atribuindo esses resultados ao efeito agregador da matéria orgânica do solo na estrutura do solo (TORMENA *et al.*, 2008).

2.3 Métodos de determinação da resistência tênsil de agregados

A resistência tênsil dos agregados, que é definida como a força por unidade de área necessária para causar a ruptura dos agregados, tem sido utilizada para quantificar efeitos dos diversos usos do solo sobre a sua qualidade (DEXTER; KROESBERGEN, 1985). Os equipamentos que apresentam resultados mais confiáveis, geralmente incluem dispositivos como motor de passo de alta precisão, célula de carga, computador e alguns softwares, o que os tornam onerosos. Outro fato a ser mencionado trata da dificuldade desde a coleta do material em campo, transporte do material ao laboratório mantendo a estrutura preservada para realização dos testes, daí o porquê de a avaliação física ou morfologia realizada no local torna-se útil para esse atributo.

A resistência tênsil dos agregados pode ser determinada por meio de testes diretos e indiretos (MUNKHOLM, 2015), sendo os métodos diretos menos utilizados na maioria das pesquisas com solos, devido, principalmente, à dificuldade de obtenção na medida da força de tração. Os testes diretos são assim denominados porque duas forças de mesma direção e sentido oposto são aplicadas de forma direta em dois extremos do agregado, separando-o em duas partes, pelo efeito da ação dessas forças.

Já nos testes indiretos, o estresse não é aplicado diretamente sobre os agregados. Para esses testes, uma força compressiva é aplicada a uma placa que transmite a força através do diâmetro do agregado, o que aumenta estresse dentro do mesmo. Durante a determinação, a força aplicada aumenta lentamente; quando o estresse tênsil supera a resistência dos agregados há o aparecimento de uma fissura no agregado, sendo dividido em unidades de menor tamanho e com maior resistência (DEXTER; WATTS, 2000; DEXTER; KROESBERGEN, 1985; MUNKHOLM, 2015).

Vários instrumentos ao longo dos anos têm sido propostos para a obtenção da força máxima para provocar a ruptura nos agregados do solo. Rogowski *et al.* (1968) fizeram uso de um aparelho com duas placas paralelas, colocando o agregado entre elas para os ensaios de ruptura. Já Öztas *et al.* (1999) fizeram proposta de uso de um instrumento mais simples, com um penetrômetro pequeno de fácil manuseio para a medição da força máxima na quebra dos agregados, embora tenham relatado que a qualidade dos resultados pode ter sido comprometida em decorrência de terem utilizado um equipamento que não fora construído para a finalidade da medição da resistência tênsil.

De modo geral, os instrumentos desenvolvidos fornecem a força máxima de ruptura dos agregados, mas problemas com a precisão dos resultados de resistência tênsil estão relacionados ao modo de aplicação da carga (velocidade de deslocamento), visualização do momento exato da ruptura do agregado, leitura da força máxima na escala utilizada e o tempo do ensaio (ÖZTAS *et al.*, 1999).

Dexter e Kroesbergen (1985) sugerem que, antes da determinação da resistência tênsil dos agregados, eles sejam secos previamente em estufa a 60°C, devido ao aumento da deformação plástica com o teor de água, levando à obtenção de resultados pouco confiáveis. Segundo esses autores, o processo de secagem dos agregados ao ar também deve ser evitado, porque mesmo pequenas diferenças na umidade do agregado podem ter efeito significativo nos resultados da sua resistência tênsil.

2.4 Influência da forma dos agregados do solo sobre a resistência tênsil

A variação dos valores de resistência tênsil depende do formato dos agregados (SEBEN Jr *et al.*, 2013). Na busca por reduzir a variabilidade nos dados da resistência tênsil, relacionados principalmente à forma dos agregados, estudos foram realizados usando agregados modelados artificialmente quanto ao formato (TORMENA *et al.*, 2008; MUNKHOLM *et al.*, 2016), uma vez que, geralmente, nos estudos de resistência tênsil de agregados do solo se assume que estes possuem forma esférica.

A maioria das pesquisas se reporta ao uso de agregados naturais, os quais estão mais relacionados com as condições estruturais do solo a ser amostrado (SEBEN Jr *et al.*, 2013). No entanto, o formato dos agregados naturais é muito variável e na maioria dos casos desuniforme, sendo influenciado pelas características do solo de onde foram coletadas as amostras (MUNKHOLM *et al.*, 2016; BARBOSA; FERRAZ, 2020).

Assim, durante a amostragem do solo para avaliar os valores de resistência tênsil, a escolha de agregados naturais pode se tornar um problema de amostragem que vai se refletir na dificuldade em identificar a forma a ser disposto ao teste e posição que agregados da mesma população fiquem mais estáveis quando sujeitos à força para o seu fraturamento. Solos com maior teor de areia apresentam agregados mais esféricos (DEXTER; KROESBERGEN, 1985; TORMENA *et al.*, 2008) do que em solos argilosos, os quais possuem forma mais prismática.

Segundo Munkholm *et al.* (2016) o tipo de manejo e/ou cultivo pode influenciar na forma dos agregados do solo. Resultados de estudo realizado em Ontario, Canadá, avaliando as relações entre a formação de agregados, forma do agregado e porosidade do solo em diferentes manejos, confirmaram que em áreas submetidas ao manejo com rotação de cultivos, os agregados ao longo do tempo assumiram formas mais alongadas, enquanto em áreas sob plantio direto verificaram-se agregados com formato mais esférico.

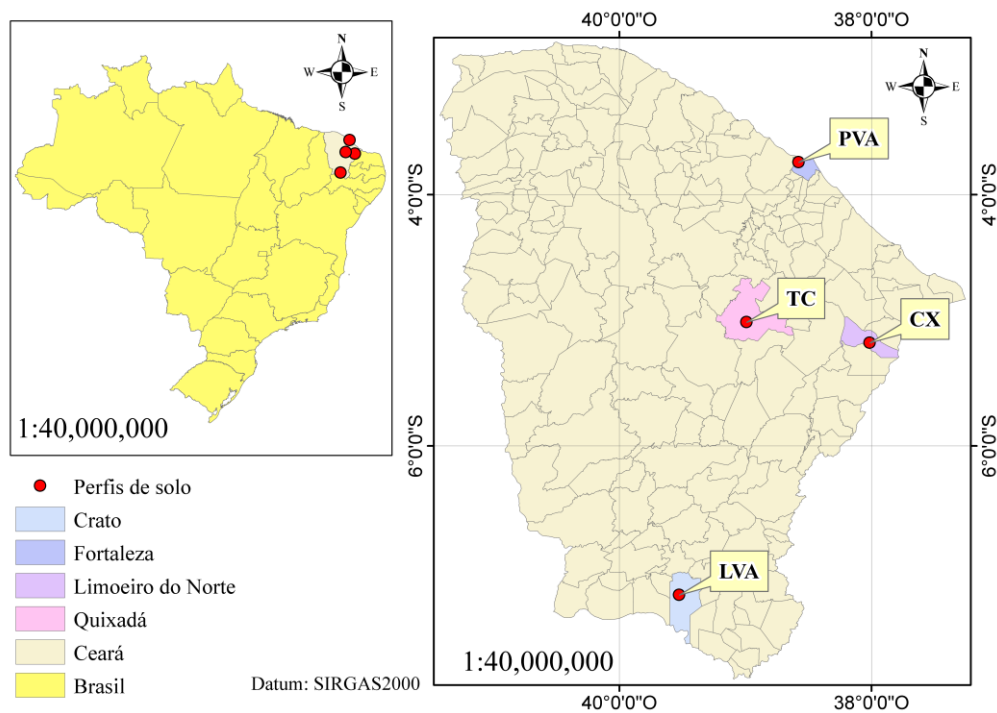
Resultados obtidos por Seben Jr *et al.* (2013), no estudo com diferentes formas de agregados, evidenciaram que agregados com base plana apresentaram menores valores de resistência tênsil quando comparados aos agregados com forma esférica. Esse resultado é explicado pelo aumento da área de contato entre o agregado e o equipamento, possibilitando melhor distribuição da força aplicada sobre o agregado; assim, menos força é aplicada para gerar estresse tênsil no interior do agregado e causar sua ruptura.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Experimento para validar o dinamômetro portátil em laboratório

A coleta de dados de resistência tênsil foi realizada em cinco horizontes: A e Bi de um Cambissolo Háplico (CX), Bt com caráter coeso de um Argissolo Vermelho Amarelo (PVA), Bt de um Luvissole Crômico (TC) e Bw de um Latossolo Vermelho Amarelo (LVA) (Figura 1), cujos solos foram classificados de acordo com o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SANTOS *et al.*, 2018). Com a coleta se buscou abranger todos os graus de consistência para solo seco: *solta, macia, ligeiramente dura, dura, muito dura e extremamente dura* (SANTOS *et al.*, 2013).

Figura 1. Localização dos pontos de coleta dos blocos de solo.



Fonte: Autor.

Concernente à granulometria, a quantidade das frações areia, silte e argila com as respectivas classes texturais das amostras de solo coletadas são apresentadas na Tabela 1. No tocante à descrição morfológica, as informações estão apresentadas na Tabela 2.

Tabela 1. Granulometria e classe textural dos horizontes dos solos em que foram coletados os agregados.

Horizontes	Areia	Silte	Argila	Classe textural
	----- g kg ⁻¹ -----			
A	398	166	436	Franco argilosa
Bi	349	117	533	Franco argilosa
Bt com caráter coeso	594	21	385	Franco argilosa
Bt	507	96	397	Franco argilosa
Bw	563	36	401	Franco argilosa

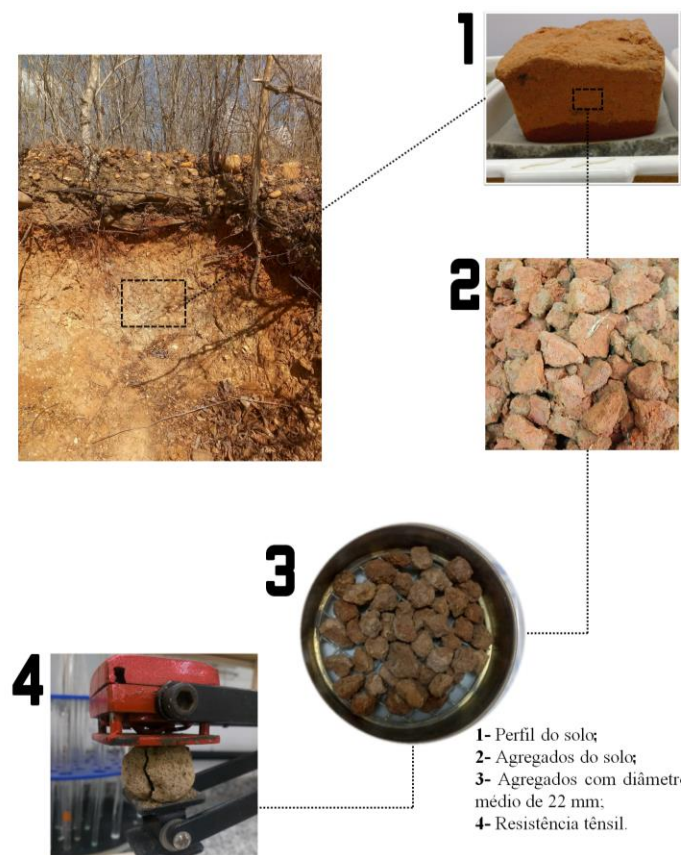
Tabela 2. Descrição morfológica dos horizontes dos solos em que foram coletados os agregados.

Local	Solo	Horizonte	Descritivo morfológico
Limoeiro do Norte - CE	Cambissolo Háplico (CX) (OLIVEIRA; MOTA, 2018)	Ap	0-14 cm; vermelho (5YR 4/6 úmido), vermelho (5 YR 5/8 seco); franco argilosa; fraca pequena a média granular e blocos subangulares; ligeiramente dura, muito friável, ligeiramente plástica e ligeiramente pegajosa; transição plana e clara.
		Bi	14-29 cm; bruno avermelhado (5YR 5/4 úmido), vermelho (5YR 5/6 seco); franco argilosa; moderada pequena a média blocos angulares; ligeiramente dura, muito friável, plástica e pegajosa; transição plana e clara.
Quixadá - CE	Luvissole Crômico (TC) (SILVA, 2018)	Bt	50-80 cm +, vermelho (2,5 YR 4/6, úmido); franco argilosa; forte grande prismática e blocos subangulares; muito dura, friável, plástica e pegajosa.
Fortaleza - CE	Argissolo Vermelho Amarelo (PVA) (MOTA; SILVA, 2017)	Bt	97-150 cm+, bruno forte (7,5 YR 5/6 úmido), amarelo-avermelhado (7,5 YR 6/6 seco) mosqueado; franco argilosa; maciça com tendência a formação de blocos subangulares, extremamente dura, friável, plástica e ligeiramente pegajosa; transição plana e difusa.
Crato - CE	Latossolo Vermelho Amarelo (LVA) (OLIVEIRA; MOTA, 2018)	Bw	42-74 cm+; bruno-avermelhado (5YR 4/3 úmido), vermelho (5 YR 4/6 seco); franco argilosa; fraca a moderada pequena a média blocos angulares; ligeiramente dura, muito friável, plástica e pegajosa; transição plana e clara.

Nos horizontes, foram coletados blocos de solo, esculpindo-os em caixa de papel cartão nas dimensões de 0,12 x 0,07 x 0,04 m. Em laboratório, cada bloco foi colocado em

bandeja forrada com esponja (2 cm de espessura, aproximadamente) e umedecido com água, por capilaridade, até aproximadamente a capacidade de campo. Atingida essa condição, as amostras foram subdivididas em agregados pela aplicação de uma força mínima, contudo suficiente para separá-los pelos seus pontos de fraqueza. Essa partição manual foi realizada até que os agregados/torrões passassem em peneira com abertura da malha de 25 mm, porém contidos em peneira com abertura da malha de 19 mm (ALMEIDA *et al.*, 2009). O fluxograma desde a coleta do material em campo à obtenção dos agregados em laboratório é apresentado na Figura 2.

Figura 2. Etapas realizadas na coleta e preparo dos agregados para determinação da resistência têsnil.

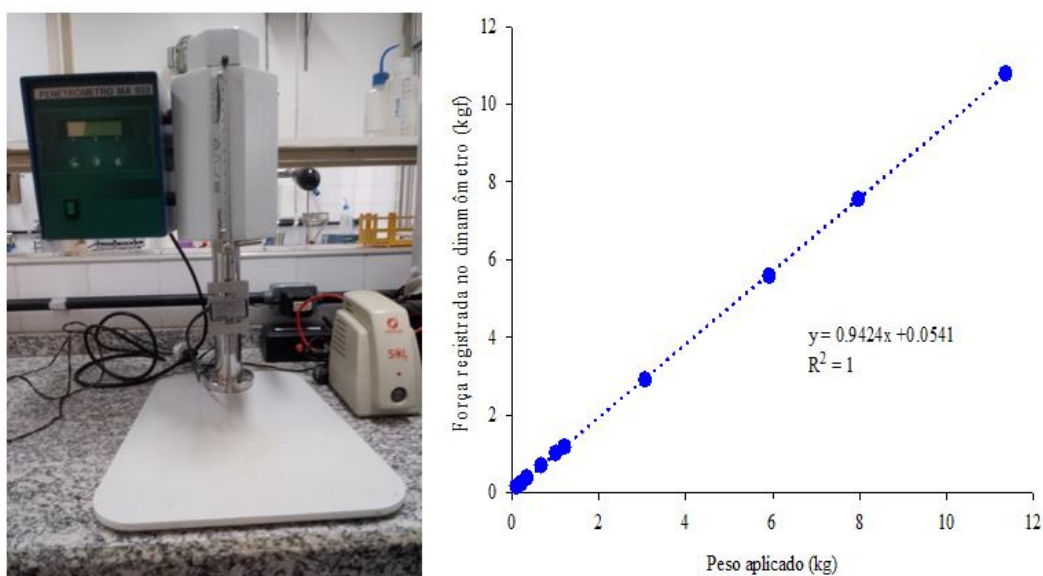


Fonte: Autor.

Os agregados foram postos ao ar por 36 horas para secagem e homogeneização do teor de água e, em seguida, postos em estufa a 60 °C por 24 horas (FIGUEIREDO *et al.*, 2011). Concluído este procedimento, os agregados foram colocados em temperatura ambiente por 24 h e, em seguida, realizados os ensaios de resistência têsnil com dois atuadores eletrônicos lineares (dinamômetros de bancada e TS-Soil) a uma velocidade constante de 0,03 mm s⁻¹ (TORMENA *et al.*, 2008). No laboratório, a resistência têsnil foi determinada em

dinamômetro de bancada, marca Marconi, uma adaptação do modelo MA 933, com célula de carga com capacidade de suporte até 20 kgf (a acurácia do equipamento é 0,01 kgf). A célula de carga foi calibrada, visto que o equipamento já estava em uso há bastante tempo no laboratório e, nesse caso, a calibração é requerida (Figura 3).

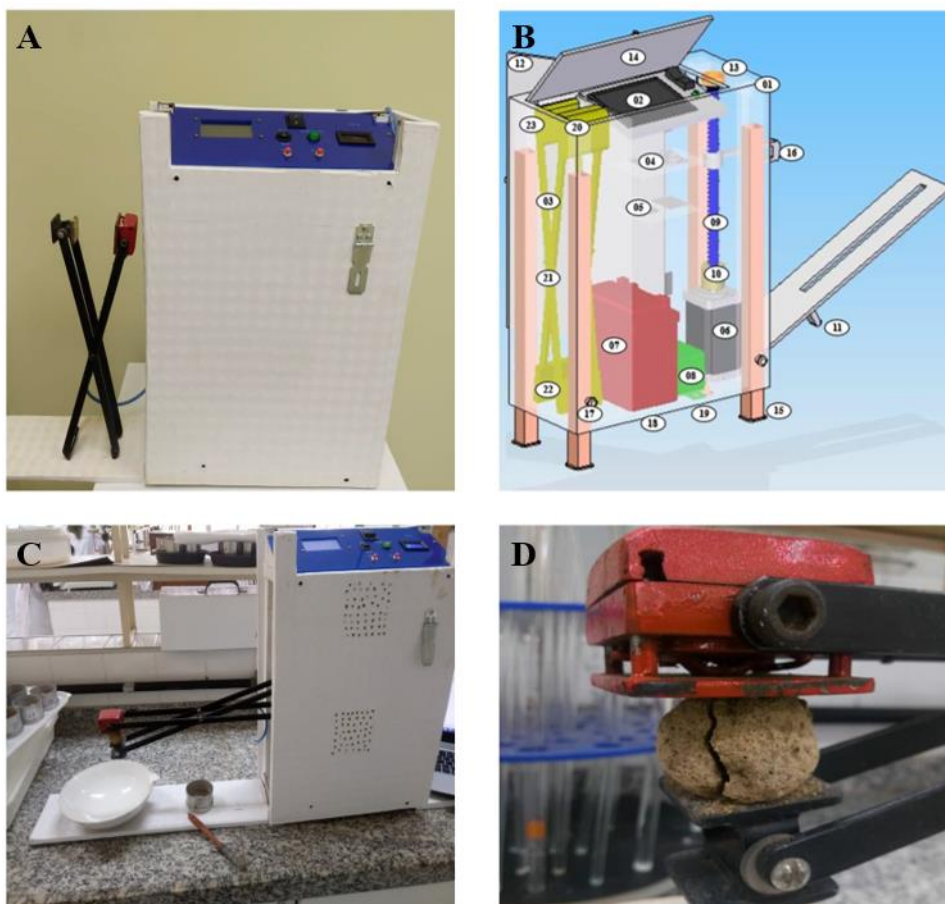
Figura 3. Dinamômetro de bancada com célula de carga com suporte até 20 kgf e sua curva de calibração.



Fonte: Autor.

No instrumento portátil proposto, TS-Soil, a resistência tênsil foi determinada utilizando célula de carga com capacidade de suporte até 50 kgf (Figura 4, com os detalhes dos componentes), cujo pedido de patente no Instituto Nacional de Propriedade Industrial foi “Sistema de aquisição de dados de resistência tênsil de materiais quaisquer – principalmente de agregados do solo”, Processo BR 10 2017 0270521. A célula de carga foi averiguada quanto aos padrões indicados pelo fabricante e não precisou de nova curva de calibração. Cada agregado foi individualmente colocado na posição mais estável entre duas placas metálicas: uma inferior, fixa à base do equipamento, e outra superior móvel que liga à extremidade da célula de carga do atuador eletrônico linear.

Figura 4. Instrumento proposto (TS-Soil) com célula de carga com suporte até 50 kgf¹. Figuras A – visão frontal do instrumento TS-Soil; B – localização das partes que constituem o TS-Soil; C – instrumento em operação no modo automático em laboratório; D – momento da ruptura do agregado no TS-Soil.



Fonte: Autor.

¹Partes que constituem o instrumento TS-Soil: (1. compartimento de proteção; 2. interface homem máquina, para mostrar e armazenar os valores adquiridos pela célula de carga e que forem processados pela placa de controle; 3. mecanismo pinça; 4. placa circuito controle; 5. placa circuito para acionamento do motor de passo; 6. motor de passo; 7. bateria 12V; 8. transformador 220/12V; 9. fuso roscado; 10. acoplamento motor de passo – fuso roscado; 11. suporte fixo da pinça; 12. porta de acesso traseira; 13. suporte de fixação do fuso roscado; 14. porta de acesso superior; 15. haste regulável de altura; 16. suporte móvel da pinça; 17. parafuso de haste regulável de altura; 18. conexão de alimentação auxiliar 12Vdc; 19. conexão de alimentação 12Vac; 20. célula de carga; 21. estrutura metálica; 22. suporte de acionamento manual/automático; 23. suporte de compressão manual.

De cada horizonte foram coletados 60 agregados: 30 tiveram a resistência tênsil em solo seco medida no dinamômetro de bancada e 30 no instrumento TS-Soil. Cada agregado teve sua massa calculada em balança analítica. O valor da carga empregada para a ruptura tênsil foi registrado por um sistema eletrônico de aquisição de dados. Depois de cada procedimento de ruptura, uma porção da amostra do agregado teve sua massa mensurada em balança analítica para, posteriormente, ser submetida à secagem em estufa a 105 °C até massa

constante, para cálculo do teor de água no agregado de solo. A resistência tênsil (RT) foi estimada, segundo Dexter e Kroesbergen (1985), por

$$RT = (0,576 P)/D^2 10^3,$$

em que RT é a resistência tênsil de agregados (kPa), 0,576 a constante de proporcionalidade da relação entre o estresse compressivo aplicado e o estresse tênsil gerado no interior do agregado, P a força aplicada (N), e D o diâmetro efetivo do agregado (mm). O diâmetro efetivo do agregado foi mensurado pela equação (WATTS; DEXTER, 1998),

$$D = D_m (M/M_o)^{0,333},$$

uma vez que, D_m o diâmetro médio dos agregados [(19 + 25)/2, em mm], explicado pela média dos tamanhos da abertura das peneiras, M a massa do agregado individual seco a 105 °C (g), e M_o a massa média dos agregados secos a 105 °C (g).

3.2 Análise dos dados

Os dados foram submetidos à análise de variância considerando o experimento inteiramente aleatorizado, em esquema fatorial 2 x 5 (dois equipamentos: dinamômetros de bancada e TS-Soil; cinco horizontes: A, Bi, Bt com caráter coeso, Bt e Bw), com 30 repetições, com o auxílio do software estatístico SISVAR[®] versão 5.6 (FERREIRA, 2019). Em seguida, foi aplicada a análise de correlação e, conseqüentemente, de regressão entre os dados do dinamômetro de bancada (variável independente) e do TS-Soil (variável dependente).

Para a análise dos erros foram utilizados o índice de concordância de Willmott - d; erro máximo – Emáx; erro absoluto médio – EAméd; raiz quadrada do erro médio normalizado – RMSE; coeficiente de determinação – CD; coeficiente de massa residual – CMR; e eficiência – E, conforme Zacharias *et al.* (1996) e Sentelhas *et al.* (1997). Esses indicadores foram obtidos considerando as equações

$$d = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|P_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)^2} \right]$$

$$Emáx = \max(|O_i - P_i|)_{i=1}^n,$$

$$EAméd = \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (O_i - P_i) \right]$$

$$RMSE = \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2 \right]^{0,5} \left(\frac{100}{\bar{O}} \right),$$

$$CD = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2}{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{O})^2}$$

$$CMR = \frac{\left[\sum_{i=1}^n O_i - \sum_{i=1}^n P_i \right]}{\sum_{i=1}^n O_i}$$

$$E = \frac{\left[\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2 - \sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2 \right]}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2}$$

em que P_i corresponde aos dados obtidos para o instrumento-padrão (dinamômetro de bancada), O_i são os dados obtidos para o instrumento objeto de comparação (dinamômetro TS-Soil); n é o número de observações e \bar{O} a média dos valores obtidos para o instrumento objeto de comparação. A perfeita concordância entre o equipamento de bancada e o TS-Soil testados resulta em $d = CD = E = 1$ e $Emáx = RMSE = CMR = EAméd = 0$.

A diferença relativa entre o instrumento portátil TS-Soil e o dinamômetro de bancada foi calculada considerando a seguinte equação:

$$\delta_r(\%) = \frac{RT_{TS-Soil} - RT_{dinamômetro\ de\ bancada}}{RT_{dinamômetro\ de\ bancada}} \times 100,$$

em que, δ_r é a diferença relativa (%); $RT_{TS-Soil}$ é a média dos valores de resistência tênsil obtida pelo TS-Soil e $RT_{dinamômetro\ de\ bancada}$ é a média dos valores de resistência tênsil obtidos no dinamômetro de bancada.

3.3 Experimento para definir faixa de valores para os graus de consistência em solo seco

Para definir faixas de valores de consistência em solo seco utilizando o instrumento portátil TS-Soil, o atuador linear de velocidade não foi posto em funcionamento e, desse modo, o instrumento foi operado por um pedólogo. Vale destacar que a força aplicada com os dedos polegar e indicador, ou com ambas as mãos, ao pressionar as hastes do instrumento pelo pedólogo é a mesma que seria empregada caso o agregado estivesse entre ambos os dedos ou mãos, daí porque, concomitantemente, o avaliador atribuiu notas para a consistência do agregado seco, conforme proposto por Dexter (1985) e considerando os graus definidos em Santos *et al.* (2013).

De cada horizonte mencionado no primeiro experimento foram coletados 100 agregados, os quais tiveram a resistência tênsil em solo seco medida no TS-Soil, lhes sendo atribuídas pelo avaliador (com aproximadamente 12 anos de experiência) uma das seguintes

notas para a consistência: 1- *solta* (não há coesão), 2- *macia* (fraca coesão, se fragmenta sob leve pressão), 3- *ligeiramente dura* (rompe-se facilmente entre os dedos indicador e polegar), 4- *dura* (moderadamente resistente à pressão, mas quebrável entre o indicador e polegar), 5- *muito dura* (muito resistente à pressão; somente com dificuldade pode ser quebrado entre as mãos; não é quebrável entre o indicador e polegar), e 6- *extremamente dura* (não se rompe entre as mãos). Para simular a deformação que os dedos ou as mãos sofrem ao pressionar o agregado, em cada face das placas metálicas do instrumento se colou uma esponja com aproximadamente 1,5 cm de espessura.

3.4 Análise dos dados

Os dados foram analisados inicialmente pela estatística descrita. Em seguida, para a definição das faixas de valores para os graus de consistência em solo seco, foram consideradas as informações obtidas pelos avaliadores – notas do avaliador e resistência tênsil pelo TS-Soil. Para definir o limiar entre as classes de consistência, quando houve notas distintas para mesma faixa de resistência tênsil se considerou o centro das sobreposições.

3.5 Experimento para validar o instrumento portátil considerando os usos dos solos em campo

Para validação do instrumento TS-Soil, considerando seu uso em campo, selecionaram-se três áreas (cultivada com banana, cultivada com milho e sob mata secundária). A área experimental está localizada nas coordenadas 5.131939518850241 e 38.052115169923844 (cultivada com banana) e, 5.131084652055653 e 38.051922050875845 (cultivada com milho), no município de Limoeiro do Norte - CE. Os blocos de solo foram coletados na profundidade de 0 – 40 cm por meio da abertura de minitrincheiras nas áreas do estudo.

A área cultivada com banana apresenta histórico de uso de cinco anos, com pomar bem estabelecido e adubações em cada ciclo de cultivo; o solo da área é mantido sem o revolvimento e o material vegetal das plantas é depositado na superfície do solo (para formação da cobertura) visando a manutenção de sua umidade. Já a área cultivada com milho apresenta histórico de uso por 10 anos, com o cultivo no sistema de sequeiro, com revolvimento do solo (aração e gradagem) e adubações anuais; terminado o ciclo do cultivo, animais são soltos na área para se alimentarem dos colmos e folhas das plantas.

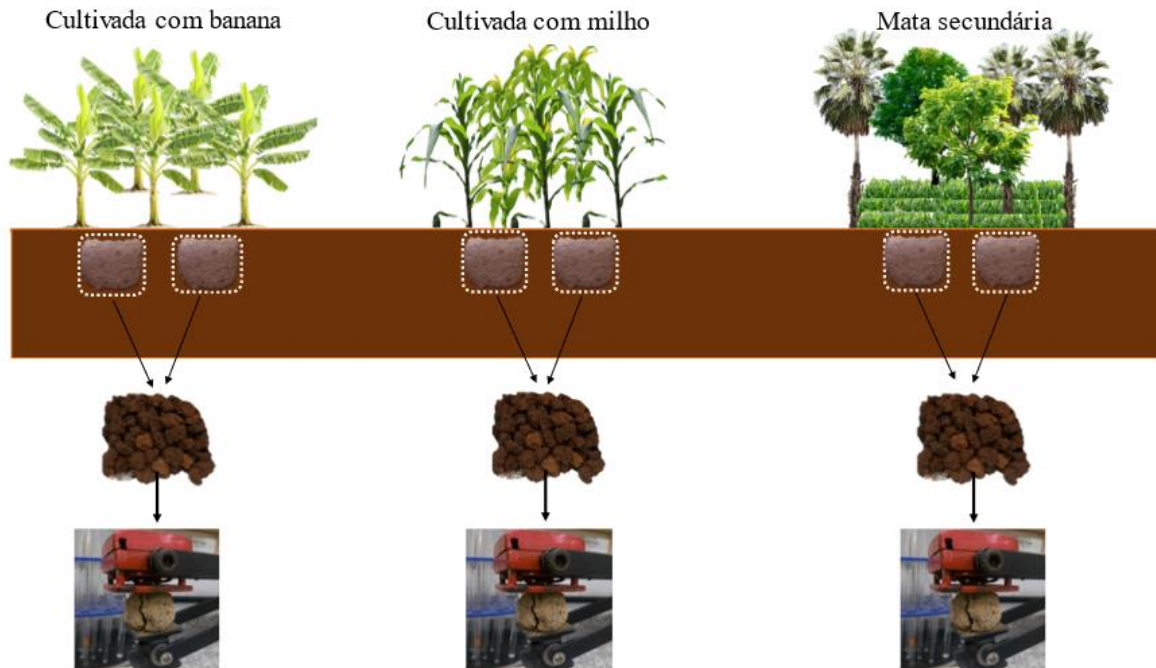
No tocante às classes texturais (SANTOS *et al.*, 2018), os solos das áreas avaliadas foram classificados com textura franco argilosa (área cultivada com milho e mata secundária) e textura arenosa (cultivada com banana), conforme apresentado na Tabela 3.

Tabela 3. Granulometria e classe textural das classes de solo em que foram realizadas as coletas dos agregados.

Classes de Solos	Areia	Silte	Argila	Classe textural
	g kg ⁻¹			
Cambissolo Háptico	349	117	534	Franco argilosa
Neossolo Flúvico	874	77	49	Arenosa

Em cada área avaliada, foram coletados quatro blocos de solo, esculpindo-os em caixa de papel cartão nas dimensões de 0,12 x 0,07 x 0,04 m (Figura 2). Em laboratório, após secagem ao ar, cada bloco foi colocado em bandeja forrada com esponja (2 cm de espessura, aproximadamente) e umedecido com água, por capilaridade, até aproximadamente a capacidade de campo. Atingida essa condição, as amostras foram subdivididas em agregados pela aplicação de uma força mínima, contudo suficiente para separá-los pelos seus pontos de fraqueza. Essa partição manual foi realizada até que os agregados/torrões passassem em peneira com abertura da malha de 25 mm, porém contidos em peneira com abertura da malha de 19 mm (ALMEIDA *et al.*, 2009). O fluxograma desde a coleta do material em campo à obtenção dos agregados em laboratório é apresentado na Figura 5.

Figura 5. Fluxograma dos procedimentos realizados na coleta e preparo dos agregados para determinação da resistência têsnil.



Dos quatro blocos de solo coletados em cada área foram selecionados 100 agregados: 50 tiveram a resistência têsnil em solo seco medida no dinamômetro de bancada e 50 no instrumento TS-Soil. Para a obtenção dos valores de resistência têsnil de agregados seguiram-se os procedimentos utilizados na validação em laboratório (Figura 2).

Para determinação do carbono orgânico total (COT) selecionaram-se 50 agregados dentre os blocos de solo extraídos em cada área. O COT foi determinado de acordo com o método descrito por Yomans e Bremmer (1988), que consiste na oxidação da matéria orgânica via úmida com dicromato de potássio na presença de ácido sulfúrico. Para densidade do solo (Ds), pelo método do torrão parafinado (Almeida *et al.*, 2009), também foram utilizados 50 agregados dos blocos coletados em cada área avaliada no estudo.

3.6 Análise dos dados

Os dados de resistência têsnil de agregados foram submetidos à análise de variância considerando o experimento inteiramente aleatorizado, em esquema fatorial 3 x 2 (três áreas de estudo: cultivada com banana, cultivada com milho e mata secundária; dois equipamentos: dinamômetros de bancada e no TS-Soil), com 50 repetições. Os dados de carbono orgânico total e de densidade do solo foram submetidos à análise de variância

considerando o experimento inteiramente aleatorizado, tendo as áreas estudadas como fonte de variação. Em todos os casos as médias foram comparadas pelo teste de Tukey a 0,05 de significância.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Validação do dinamômetro portátil em laboratório

A análise descritiva para a variável resistência tênsil de agregados do solo considerando o equipamento dinamômetro de bancada e TS-Soil (Tabela 4). Os resultados foram submetidos, primeiramente, à identificação de outliers – não encontrados no banco de dados.

Tabela 4. Análise exploratória dos valores de resistência tênsil de agregados do solo, em horizontes superficiais e de subsuperfície, obtidos pelo equipamento de bancada e TS-Soil.

Horizontes	Equipamentos	Min	Max	Média	Mediana	Desvio P.	CV	Assimetria	Curtose	Normalidade*
		----- (kPa) -----					(%)			
A	Bancada	7,21	39,80	17,39	17,03	8,46	48,65	1,00	0,72	Sim
	TS-Soil	1,86	38,69	19,03	19,16	9,92	52,12	0,17	-0,33	Sim
Bi	Bancada	4,53	24,01	12,23	12,07	4,78	39,05	0,69	0,45	Sim
	TS-Soil	1,17	21,55	8,27	7,23	5,88	71,09	0,88	-0,02	Não
Bt coeso	Bancada	16,91	84,61	48,87	50,79	19,93	40,77	0,04	-1,32	Sim
	TS-Soil	17,50	89,64	41,14	36,94	18,81	45,72	0,78	-0,15	Sim
Bt	Bancada	18,64	159,69	95,08	100,03	35,81	37,67	-0,30	-0,61	Sim
	TS-Soil	53,61	146,99	95,77	94,10	24,61	25,70	0,20	-0,63	Sim
Bw	Bancada	3,20	17,67	9,73	9,47	3,85	39,60	0,42	-0,76	Sim
	TS-Soil	0,98	16,90	7,94	8,05	4,25	53,57	0,21	-0,89	Sim

*Teste de Kolmogorov-Smirnov.

Tomando como base o critério de Warrick e Nielsen (1980) para classificar o coeficiente de variação (baixo – $CV < 12\%$, médio – $12\% < CV < 60\%$, alto – $CV \geq 60\%$), verificou-se média variabilidade para os dados analisados. Imhoff *et al.* (2002) já relataram sobre a variabilidade elevada em dados de resistência tênsil de agregados, uma vez que a ruptura dos mesmos é influenciada por fatores como umidade do solo, tipo e teor de argila, minerais do solo, exsudados orgânicos liberados pelas plantas, principalmente pelo sistema radicular, substâncias provenientes da ação e decomposição de microrganismos e pelas formas que os agregados assumem conforme a condição do ambiente (MUNKHOLM *et al.*, 2016).

No tocante à umidade dos agregados no momento dos ensaios de resistência tênsil, foram constatadas diferenças estatísticas significativas entre os agregados dos horizontes avaliados a 0,05 de significância pelo teste de Tukey. Para os agregados pertencentes ao mesmo horizonte, bem como para a interação entre estes e o equipamento de

bancada e o TS-Soil não foram observadas diferenças estatísticas para os valores de umidade (Tabela 5).

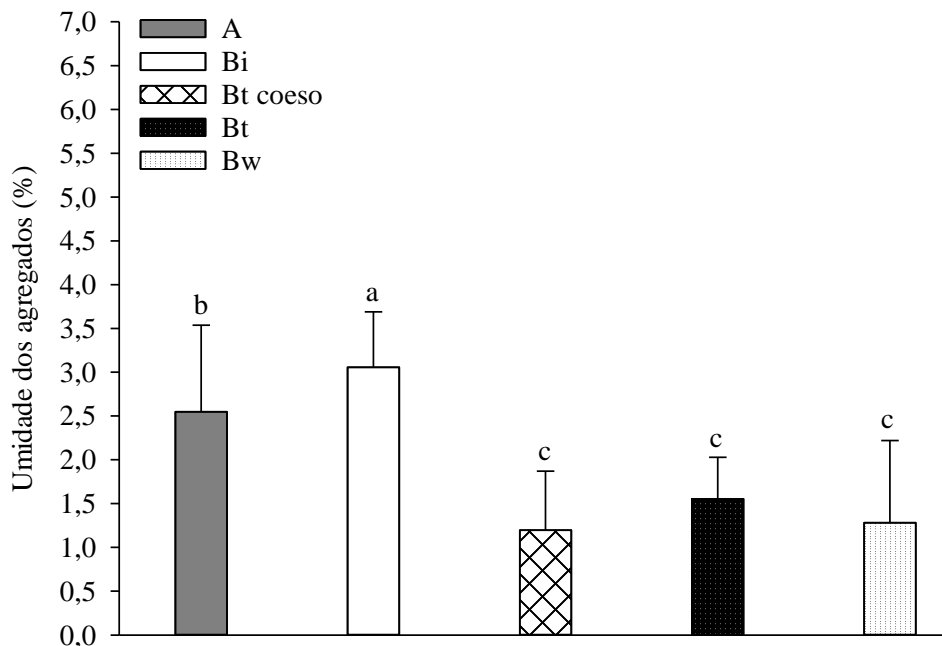
Tabela 5. Análise de variância da umidade dos agregados avaliados nos ensaios de resistência tênsil de cada horizonte no dinamômetro de bancada e TS-Soil.

Fontes de Variação	GL	SQ	QM	F
Horizontes (F1)	4	164,93	41,23	68,98**
Equipamentos (F2)	1	0,19	0,19	0,32 ^{ns}
Interação F1 x F2	4	0,13	0,03	0,05 ^{ns}
Erro	290	173,36	0,60	
Coeficiente de variação (%)		40,12		

GL = graus de liberdade; SQ = Soma que quadrados; QM = Quadrado médio; F = Teste F; *significativo a 0,05 de significância.

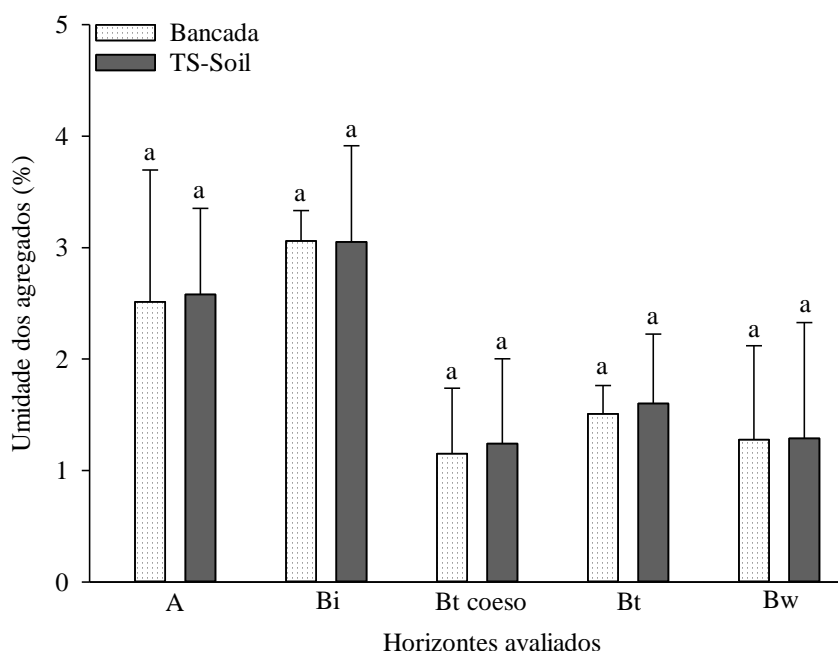
Observou-se que, em geral, os agregados obtidos do horizonte Bi estavam com maior umidade (3,05 % de umidade), seguidos dos agregados do horizonte A (2,55 % de umidade), porém todos, na faixa de umidade definida para solo seco (Queiroz, 2021). Não foram observadas diferenças estatísticas significativas na umidade dos agregados obtidos nos horizontes Bt com caráter coeso, Bt e Bw (Figura 6).

Figura 6. Valores médios de umidade dos agregados (%) no momento do ensaio de resistência tênsil nos instrumentos de bancada e TS-Soil. Médias seguidas pela mesma letra minúscula não diferem entre si a 0,05 de significância pelo teste de Tukey.



Observações de campo e investigações experimentais evidenciam que a umidade contribui para elevada variabilidade nos valores de RT (DEXTER, 1985; MUNKHOLM et al., 2016). No exame realizado no campo pelo pedólogo, pequenas variações na umidade do solo podem dificultar a percepção quanto à resistência dos agregados. No entanto, após o teste de comparação de médias, observou-se que não houve diferença estatística na umidade dos agregados pertencentes ao mesmo horizonte nos ensaios para determinação da resistência tênsil de agregados em solo seco (Figura 7).

Figura 7. Valores médios de umidade dos agregados (%) no momento do ensaio resistência tênsil nos instrumentos de bancada e TS-Soil. Médias seguidas pela mesma letra minúscula não diferem entre si a 0,05 de significância pelo teste de Tukey.



Ressalta-se que a manutenção dos agregados em condição de umidade uniforme para a realização do ensaio foi mantida, embora em condições laboratoriais o controle da umidade seja complexo (podem ocorrer alterações de temperatura e umidade no ambiente), de modo que foram seguidos protocolos para que os agregados sofressem a menor influência possível da umidade antes dos ensaios de RT – pois, como se sabe, pequenas variações na umidade de agregados comprometem a obtenção de resultados confiáveis para esse atributo dinâmico que é a resistência tênsil de agregados.

Ainda acerca da determinação da RT, em condições de campo o instrumento portátil proposto pode ser utilizado em avaliações morfológicas e físicas, pois, conforme observado por Queiroz (2021), para a condição de solo seco a faixa de umidade entre o solo

levemente seco e seco ao ar é tão estreita que as variações não foram correlacionadas com alterações na percepção do pedólogo quando este atribui avaliação qualitativa à resistência que os agregados apresentam à ruptura.

Pela análise de variância dos dados (Tabela 6), constatou-se que não há diferença na resistência tênsil de agregados medida por ambos os equipamentos (bancada e TS-Soil) considerando o conjunto dos dados a 0,05 de significância, mas observou-se diferença entre os horizontes dos solos avaliados a 0,01 de significância. Concernente à interação equipamentos x horizontes não foi constatada significância estatística.

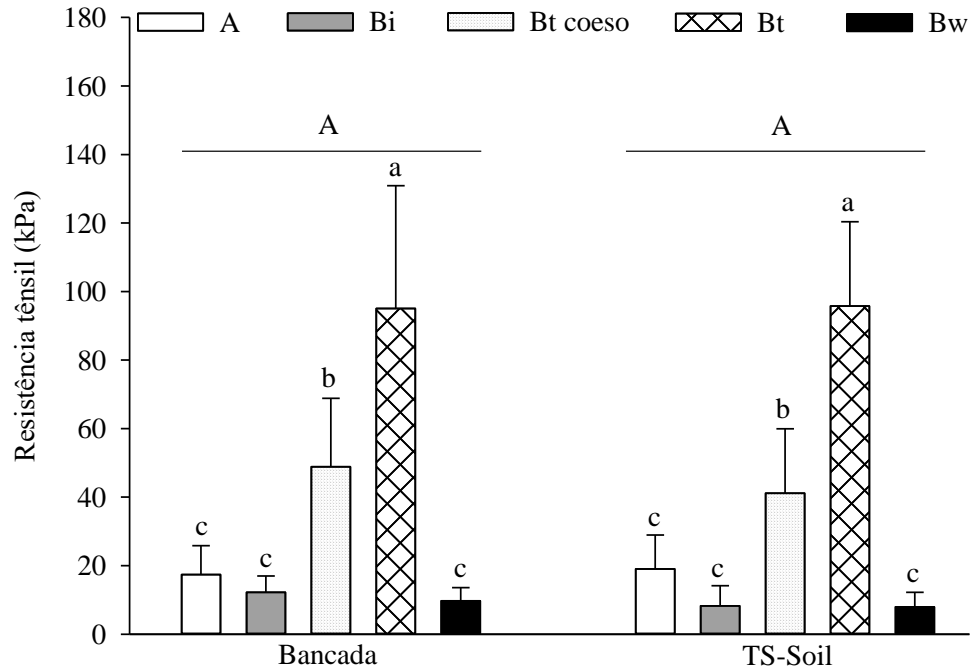
Tabela 6. Análise de variância da resistência tênsil de agregados do solo obtidas pelo equipamento de bancada e TS-Soil em agregados em formas naturais.

Fontes de variação	GL	SQ	QM	F
Equipamentos (F1)	1	373,45	373,45	1,29 ^{ns}
Horizontes (F2)	4	319725,97	79931,49	275,70 ^{**}
Interação F1xF2	4	855,03	213,76	0,74 ^{ns}
Erro	290	84076,67	289,92	
Coefficiente de variação (%)	47,90			

GL = graus de liberdade; SQ = Soma que quadrados; QM = Quadrado médio; F = Teste F; *significativo a 0,05 de significância.

Considerando que na proposta de um novo equipamento/instrumento os resultados observados devem ser estatisticamente iguais aos obtidos por equipamentos comumente utilizados ou considerados como referência, observou-se que não houve diferença estatística entre o instrumento proposto e o de bancada para valorar resistência tênsil em agregados em solo seco em ampla faixa de graus de consistência (Figura 8). Esse dado é relevante, pois vários equipamentos e algumas adaptações ao longo dos anos têm sido propostos para a obtenção da força máxima para provocar a ruptura de agregados do solo (ROGOWSKI *et al.*, 1968; ÖZTAS *et al.*, 1999), indicando a força máxima de ruptura dos agregados, mas com problemas na precisão e exatidão dos resultados, como os ressaltados anteriormente na determinação da resistência tênsil de agregados do solo.

Figura 8. Valores médios de resistência tênsil de agregados para o equipamento de bancada e TS-Soil e para os horizontes A, Bi, Bt com caráter coeso, Bt e Bw em solo seco. Médias seguidas pela mesma letra maiúscula para os equipamentos e minúscula para os horizontes não diferem pelo teste de Tukey a 0,05 de significância.



No tocante aos valores médios de resistência tênsil de agregados nos horizontes avaliados (A, Bi, Bt com caráter coeso, Bt e Bw), observou-se que os valores foram estatisticamente superiores nos horizontes Bt com caráter coeso de um Argissolo Vermelho Amarelo e Bt obtidos de um Luvissole Crômico: 48,87 e 95,01 kPa para os respectivos horizontes no equipamento de bancada, e, de mesmo modo, 41,14 e 95,77 kPa no TS-Soil.

Após a comparação de médias, constatou-se que não houve diferença estatística entre os valores de resistência tênsil de agregados nos horizontes diagnósticos A, Bi e Bw no equipamento de bancada e, de igual modo, no instrumento TS-Soil. É importante salientar que para ambos os horizontes mencionados anteriormente a consistência do material, quando seco, varia de macia a muito dura, como já observado na Tabela 2, destacando que os agregados obtidos nesses horizontes apresentaram consistência ligeiramente dura, o que leva a menores valores de resistência tênsil (Figura 8). Como já observado no Sistema Brasileiro de Classificação de Solos – SiBCS (SANTOS et al., 2018), o horizonte B incipiente pode apresentar características morfológicas semelhantes às de um horizonte Bw, o que corrobora com os resultados observados para esse atributo físico avaliado nesta pesquisa.

Considerando que horizontes Bt são caracterizados pelo acúmulo de argila em subsuperfície, e cada tipo de mineral de argila imprime diferentes atributos aos solos, esse agrupamento de solos com horizonte B textural apresenta argila de atividade baixa e/ou alta em Argissolos, e de atividade alta em Luvisolos; nos casos em que a atividade da fração argila é alta, isso contribui para que quando secos, os solos apresentem maior contração, reduzindo seu volume, lhes conferindo maior resistência à ruptura, por causa, principalmente, do maior efeito coesivo entre as partículas (EMBRAPA, 2018) – daí o porquê de o Bt do Luvisolo ter apresentado elevada resistência tênsil de seus agregados.

Nos horizontes Bt com caráter coeso, o maior endurecimento manifesta-se quando o solo está seco (EMBRAPA, 2018), condição definida nesta pesquisa para os agregados do solo no momento da avaliação da resistência tênsil. Por causas genéticas naturais, nesses horizontes há favorecimento de maior ajuste entre as partículas do solo (MENEZES *et al.*, 2018), aumentando, assim, sua coesão, influenciando os elevados valores de resistência tênsil observados pelos equipamentos de bancada e TS-Soil (Figura 8). No estudo de Araújo *et al.* (2018) foram observados elevados valores de resistência tênsil de agregados no horizonte Bt com caráter coeso de um Argissolo Vermelho Amarelo, aproximadamente 52 kPa, sendo tais valores justificados pela forte cimentação entre as partículas, favorecida pelo incremento de material fino natural ou disperso em água no horizonte, determinando, dessa forma, maior resistência nos agregados avaliados quando comparados àqueles de horizonte sem o caráter coeso.

A resistência tênsil de agregados do solo é um atributo dinâmico, conforme os resultados obtidos pelos dinamômetros, e em determinado solo reflete os efeitos de fatores naturais e do uso e manejo na organização dos agregados (BARBOSA; FERRAZ, 2020). Valores elevados de resistência tênsil, como os observados nos horizontes Bt com caráter coeso e Bt, são ressaltados na literatura a problemas no estabelecimento das culturas associados com condições físicas inadequadas do solo. Problemas comuns associados a valores de resistência tênsil superiores a 40 kPa estão ligados à dificuldade para formação de uma boa cama de semeadura, na penetração das raízes e implementos agrícolas, o que compromete o crescimento de raízes e requer maior número de operações agrícolas com máquinas em camadas secas do solo (DEXTER; KROESBERGEN, 1985; STEFANOSKI *et al.*, 2013; MUNKHOLM *et al.*, 2016).

É importante ressaltar que mesmo sendo classificados na mesma classe textural (Tabela 1), a proposta do trabalho é abranger graus de consistência em solo seco, o que foi atendida com os horizontes diagnósticos selecionados na validação do dinamômetro TS-Soil.

Dessa forma, ressalta-se que mesmo para os diferentes graus de consistência do solo seco (solta, macia, ligeiramente dura, dura, muito dura e extremamente dura) o instrumento portátil mostrou-se sensível para valorar resistência tênsil de agregados do solo.

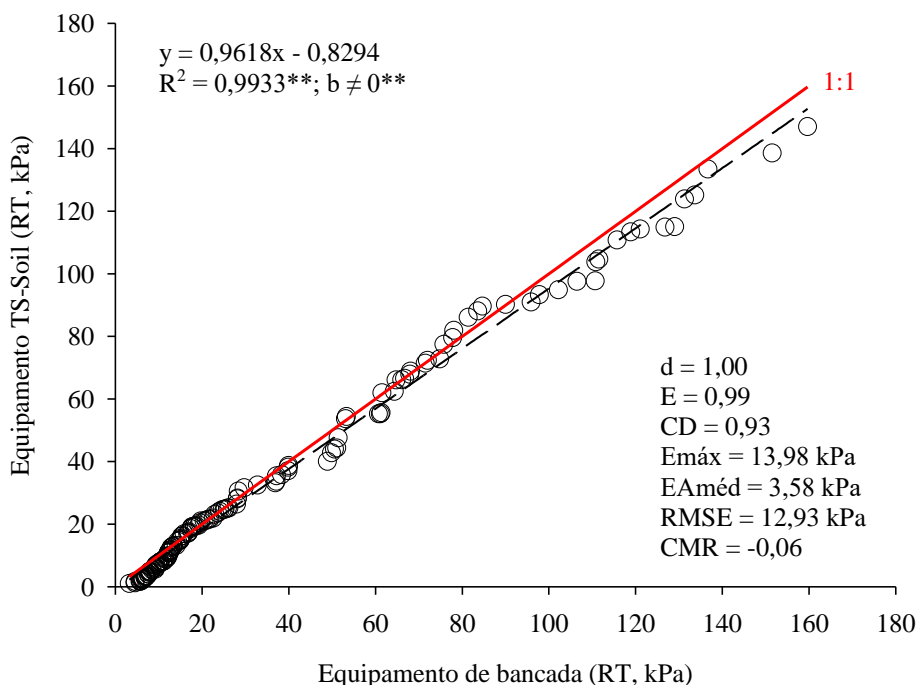
No que tange à diferença relativa entre o TS-Soil e o dinamômetro de bancada (Tabela 7), constatou-se que, em geral, as diferenças entre a resistência tênsil medida pelos equipamentos são pequenas (fato também comprovado por outras análises estatísticas), validando a possibilidade da utilização do TS-Soil como instrumento para medição da resistência tênsil de agregados do solo. É importante salientar que os testes para validação do instrumento portátil consideram solos com ampla variabilidade no atributo resistência tênsil de agregados, tratamentos e repetições que atenderam os requisitos em termos de delineamento e análise estatística.

Tabela 7. Diferença relativa (%) entre o instrumento portátil TS-Soil e o equipamento padrão.

	Horizontes diagnósticos					Média
	A	Bi	Bt coeso	Bt	Bw	
TS-Soil	-9	32	16	-1	18	6

Com relação à análise de correlação entre os valores de resistência tênsil obtidos pelos equipamentos de bancada e TS-Soil (Figura 9), observou-se que há boa relação entre os equipamentos, evidenciada pelo alto valor do coeficiente de correlação, indicando relação linear diretamente proporcional entre ambos ($R = 0,9966$, de modo que alguma variação nos valores obtidos no TS-Soil será sempre acompanhada de variação praticamente na mesma proporção no equipamento de bancada. O coeficiente angular (b) diferiu de zero, o que indica que a reta representante da relação entre os equipamentos não é paralela ao eixo das abscissas, e que 99,33% da variação nos valores de resistência tênsil de agregados do solo no TS-Soil é explicada pela variação nos valores de resistência tênsil obtidos no equipamento de bancada.

Figura 9. Correlação entre os valores de resistência tênsil de agregados em solo seco para o equipamento de bancada e TS-Soil.  ndices estatísticos (d -  ndice de concordância de Willmott; E - eficiência; CD - coeficiente de determina o; Emáx - erro máximo; EAm d - erro absoluto médio; RMSE - raiz quadrada do erro médio normalizado; CMR - coeficiente de massa residual).



Os  ndices estatísticos apresentados na Figura 9,   exce o do d de Willmot, não exigem que os dados coletados apresentem distribui o normal de probabilidade – embora nesta pesquisa a quase totalidade dos dados observados se ajusta bem   distribui o Gaussiana (Tabela 3) – mas foram calculados para complementar a análise paramétrica e a regressão entre os pares de dados observados em ambos os equipamentos. É importante ressaltar que a perfeita concordância entre os equipamentos resulta em $d = E = CD = 1$ e $Em x} = EAm d} = RMSE = CMR = 0$.

A repetibilidade ou precisão entre ambos os instrumentos, aferida pelo  ndice d de Willmot = 1, evidenciou perfeita concordância entre ambos os equipamentos, ou seja, sucessivas leituras de resistência tênsil no instrumento TS-Soil apresentam média com a tendência de equiparar-se perfeitamente   média das leituras de resistência tênsil verificadas no dinamômetro de bancada. No tocante à eficiência, o instrumento proposto se mostrou tão eficiente quanto o equipamento comumente utilizado para a determina o da resistência tênsil de agregados. Observando o coeficiente de determina o CD, constatou-se que 93% da varia o dos dados de resistência tênsil no TS-Soil é explicada pela varia o dos dados de

resistência tênsil no dinamômetro de bancada – valor coerente com aquele observado quando se fez a análise de regressão.

O maior erro observado na resistência tênsil foi de 13,98 kPa no TS-Soil que, ressalte-se, pode ter se devido não ao instrumento em si, mas, quiçá, ao agregado mais resistente no instrumento TS-Soil sido menos resistente que aquele de maior resistência mensurado no equipamento de bancada, uma vez que, como o procedimento de medição da resistência tênsil é destrutivo, não é o mesmo agregado de solo que é sujeito à ruptura em ambos os equipamentos. É importante ressaltar que EAméd, RMSE e CMR assumem valores próximos a zero quanto melhor for a similaridade de dados de ambos os equipamentos avaliados. Nesse caso, observou-se distanciamento do valor de EAméd de zero (Figura 9), o que influenciou diretamente na elevação do valor de RMSE.

Mesmo assim, a existência de valores diferentes de zero não compromete a acurácia entre os resultados obtidos nos equipamentos de bancada e TS-Soil, uma vez que tais discrepâncias no caso em apreço são fortemente influenciadas pela heterogeneidade dos agregados na avaliação da resistência tênsil em solo seco – e principalmente porque os agregados avaliados não foram os mesmos em ambos os equipamentos.

4.2 Faixas de valores para os graus de consistência em solo seco

A porcentagem das notas atribuídas pelo pedólogo para os graus de consistência em solo seco aos horizontes diagnósticos A, Bi, Bt com caráter coeso, Bt e Bw, bem como a análise descritiva aos correspondentes valores de resistência tênsil obtidos no TS-Soil, encontram-se na Tabela 8.

Com relação às notas atribuídas pelo avaliador ao horizonte A, constatou-se o predomínio de notas correspondentes à consistência *macia* (67%), 30% à *ligeiramente dura*, e 3% à *dura* – divergindo em parte do descritivo morfológico da Tabela 2. Para o horizonte Bi a quase totalidade de notas (94%) correspondeu à consistência *macia*, também divergente do descritivo apresentado na Tabela 2. Para o horizonte Bt com caráter coeso, as notas atribuídas foram predominantemente equivalentes à consistência extremamente dura, bastante coerente ao descritivo da Tabela 2. No caso do horizonte Bt, o avaliador atribuiu praticamente todas as notas à consistência extremamente dura, divergindo do apresentado na Tabela 2. Finalmente, ao horizonte Bw, as notas atribuídas pelo avaliador foram convergentes com a descrição morfológica ao referido horizonte na Tabela 2.

Tabela 8. Percentagem das notas atribuídas pelo avaliador à consistência em solo seco e estatística descritiva para os respectivos valores de resistência tênsil obtidos no instrumento TS-Soil.

Horizontes	Notas (%)									
	1	2	3	4	5	6				
A	-	67	30	3	-	-				
Bi	-	94	6	-	-	-				
Bt coeso	-	-	-	7	29	64				
Bt	-	-	-	-	8	92				
Bw	-	98	1	1	-	-				
Nota	Min.	Máx.	Média	Mediana	DP ¹	CV ²	A ³	C ⁴	Normalidade ⁵	Nº dados
	----- kPa -----			----- % -----						
1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	0,11	24,66	8,05	6,98	6,09	75,59	0,45	-0,84	Não	259
3	17,15	37,37	25,97	24,38	6,22	23,96	0,50	-1,01	Sim	37
4	39,26	59,90	50,42	48,89	6,94	13,76	0,07	-1,12	Sim	11
5	69,53	120,09	97,96	101,91	14,39	14,69	-0,43	-0,91	Sim	37
6	102,38	187,41	137,93	134,44	18,32	13,28	0,54	-0,11	Não	156

¹DP = desvio padrão; ²CV = coeficiente de variação; ³A = assimetria; ⁴C = curtose; ⁵Teste de Shapiro-Wilk a 5%.

As diferenças na consistência atribuída pelo avaliador e a observada na Tabela 2 são explicadas por: i) variabilidade espacial da consistência dentro do horizonte do solo (ARAÚJO *et al.*, 2018); ii) possíveis diferenças na umidade do agregado quando do descritivo da consistência – nesta pesquisa, como visto no material e métodos, os agregados foram secos em estufa a 60 °C, portanto em uma condição nem sempre encontrada em campo (FIGUEIREDO *et al.*, 2011); iii) subjetividade, uma vez que é sabido a dificuldade na percepção dos pedólogos na definição do limiar entre os graus de consistência do solo pela forte influência exercida por fatores como umidade do solo, tipo e teor de argila entre outros.

Tomando como base o critério de Warrick e Nielsen (1980) para classificar o coeficiente de variação dos dados de resistência tênsil (baixo < 12%, médio – 12 a < 60%, alto – ≥ 60%), verificou-se que para os scores 3, 4, 5 e 6 a dispersão dos dados em torno da média, medida pelo coeficiente de variação, variou de aproximadamente 13% a 24%, indicando média variabilidade ao atributo avaliado. No que se refere aos dados de resistência

tênsil observados na Nota 2, observou-se alta variabilidade, com coeficiente de variação de aproximadamente 76%.

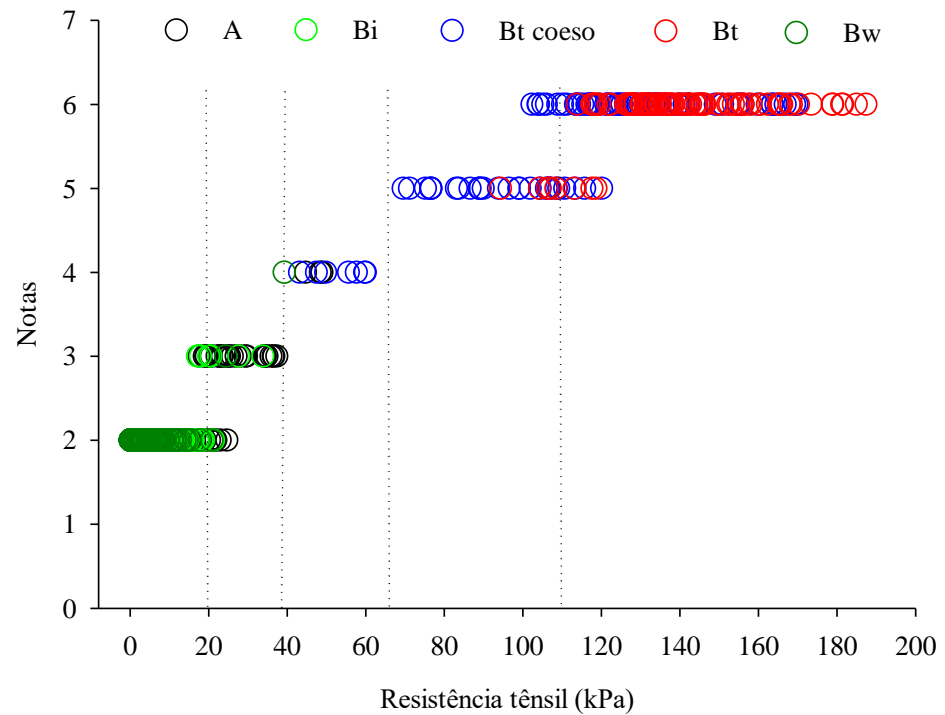
A alta variabilidade atribuída à Nota 2 (consistência *macia*, em que os agregados apresentam fraca coesão e se fragmentam sob leve pressão), é devida à presença de valores de resistência tênsil desde próximos a 0,11 kPa até 24,66 kPa. Certamente a variabilidade da Nota 2 seria diminuída caso fosse considerada a classe de consistência moderadamente dura – tal como ocorre em Soil Science Division Staff (2017) – para distribuir a resistência tênsil da classe *macia* com a *ligeiramente dura*.

A variabilidade em dados de resistência tênsil de agregados é reportada em outros estudos (IMHOFF *et al.*, 2002; SEBEN Jr *et al.*, 2013; MUNKHOLM *et al.*, 2016), uma vez que a ruptura dos mesmos é influenciada por fatores como umidade do solo no momento da aplicação do estresse, tipo e teor de argila, minerais do solo, exsudados orgânicos na região da rizosfera, substâncias provenientes da ação e decomposição de microrganismos e pela forma que os agregados assumem, conforme a condição do ambiente, e tipo de manejo do solo na organização dos agregados.

É importante deixar claro que percepções distintas decorrentes da subjetividade quanto a um determinado atributo dificultam – apesar de não invalidarem – a universalização de resultados, daí o porquê dos parâmetros quantitativos serem relevantes como ferramenta auxiliar no diagnóstico de determinados achados em solos.

No que tange às notas por classes de consistência em solo seco, os respectivos valores de resistência tênsil estão apresentados na Figura 10. Constatou-se que as notas atribuídas à consistência corresponderam a faixas de valores de resistência tênsil (kPa) que abrangem os extremos, desde a condição de solo *macio* até *extremamente duro*, ou seja, contemplando todas as possibilidades de graus de consistência em solo seco, exceto solto, quando a estrutura do solo se apresenta em grãos simples. Observou-se – dada a ocorrência de notas distintas para mesma faixa de resistência tênsil – que o avaliador teve dificuldade na percepção do limiar entre consistência *ligeiramente dura* e *dura* e entre *muito dura* e *extremamente dura*, fato decorrente da própria subjetividade na avaliação qualitativa, daí porque se considerou o centro das sobreposições, quando isso ocorreu, para estabelecer o limiar entre as classes de consistência.

Figura 10. Distribuição das faixas de resistência tênsil por notas atribuídas à consistência seca de agregados (notas: 1 - *solta*; 2 - *macia*; 3 - *ligeiramente dura*; 4 - *dura*; 5 - *muito dura*; 6 - *extremamente dura*).



As faixas de resistência tênsil para os graus de consistência de solo seco estão apresentadas na Tabela 9. Os valores obtidos se assemelham em parte aos de Queiroz *et al.* (2018), obtidos para um Argissolo Vermelho Amarelo Distrófico t pico e Argissolo Amarelo Eutrocoeso abr ptico. Naquela pesquisa, em que três avaliadores atribuíram notas   consistência em solo seco e cujas notas foram associadas à resistência tênsil de agregados por um dinamômetro de bancada, os autores obtiveram resistência tênsil > 0 a < 21 kPa para a consistência *macia*, ≥ 21 a < 37 kPa para *ligeiramente dura*, ≥ 37 a < 50 para *dura*, ≥ 50 a < 70 para *muito dura*, e ≥ 70 para *extremamente dura*. É importante registrar que os avaliadores atribuíram notas ao trabalharem os agregados, mas a força de ruptura era obtida em outros agregados dos mesmos solos que eram submetidos ao protocolo no dinamômetro – ou seja, o mesmo agregado não era avaliado concomitantemente pelo avaliador e máquina, como nesta pesquisa.

Tabela 9. Proposta de valores de resistência tênsil de agregados aos graus de consistência em solo seco.

Consistência em solo seco	Notas	Sugestão de faixas (kPa)
Solta	1	0
Macia	2	> 0 a < 20
Ligeiramente dura	3	≥ 20 a < 38
Dura	4	≥ 38 a < 65
Muito dura	5	≥ 65 a < 110
Extremamente dura	6	≥ 110

Outro aspecto importante a ser mencionado a respeito do experimento de Queiroz *et al.* (2018) diz respeito ao protocolo de ruptura do agregado no dinamômetro de bancada – em que o agregado era posto entre duas placas metálicas, sem a preocupação de se reproduzir o que acontece entre os dedos ou entre as mãos humanas ao pressioná-lo. Ora, ao se pressionar um agregado entre os dedos ou as mãos, a depender da resistência que ofereçam à ruptura, estes se deformam inicialmente de modo a se moldarem à superfície do agregado – fato que se buscou reproduzir nesta pesquisa quando se colocou uma esponja em cada placa metálica no TS-Soil.

Comparando os dados desta pesquisa com os de Queiroz *et al.* (2018), constata-se que os valores de resistência tênsil atribuídos às consistências macia e ligeiramente dura são semelhantes, porque ao se pressionar o agregado, seja entre as placas metálicas ou entre os dedos, este se rompe com facilidade tornando o amoldamento do agregado ao objeto que o pressiona menos importante no processo. Nas demais classes (*dura*, *muito dura* e *extremamente dura*), a força aplicada no dinamômetro e transmitida às placas metálicas atua em pontos da superfície do agregado (visto que este tem naturalmente formas irregulares), fazendo-o romper sob determinada pressão – da física, pressão é força por unidade de área. No caso dos dados obtidos nesta pesquisa para as classes de maior resistência tênsil, ao se trabalhar o agregado entre os dedos ou mãos, na medida em que a força é aplicada há o amoldamento do agregado ao tecido humano – isso aumenta a área de contato, levando à necessidade de mais força para fazê-lo romper, daí os maiores valores em relação aos obtidos por Queiroz *et al.* (2018) para as mesmas classes de consistência.

Feitas estas observações, é importante destacar que o que se sugere nesta pesquisa é um refinamento do que propuseram Queiroz *et al.* (2018), e uma primeira aproximação da combinação *Homem x Equipamento TS-Soil* – o que significa que outros refinamentos são

bem-vindos e podem ser incorporados para dar robustez ao protocolo que se propõe à avaliação da consistência em solo seco.

4.3 Validação do dinamômetro portátil para inferir sobre usos de solos em campo

Pela análise de variância dos dados (Tabela 10), considerando a aplicação do teste F a 0,05 de significância, observou-se diferença significativa na resistência tênsil de agregados para as áreas avaliadas (cultivadas com bananeira, com milho e sob mata secundária) e que ambos (dinamômetro de bancada e TS-Soil) aferem o referido atributo físico com a mesma precisão e exatidão. No tocante à interação áreas avaliadas x equipamentos não foi constatada significância estatística.

Tabela 10. Análise de variância de dados de resistência tênsil de agregados obtidos pelo equipamento de bancada e TS-Soil em solo cultivado e sob mata secundária.

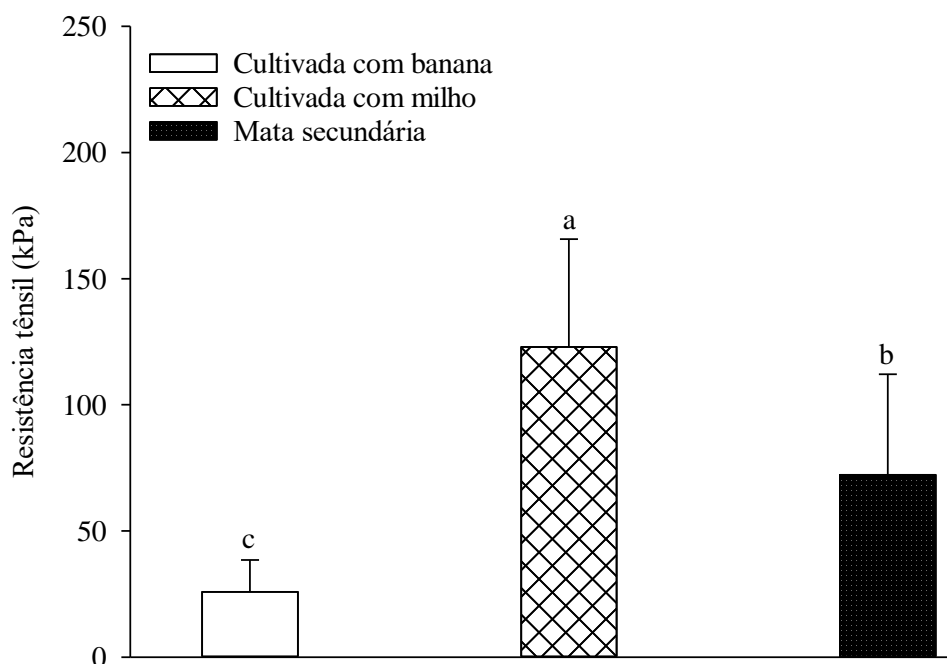
Fontes de variação	GL	SQ	QM	F
Usos do solo (F1)	2	472189,03	236094,52	195,57**
Equipamentos (F2)	1	66,11	66,11	0,055 ^{ns}
Interação F1 x F2	2	4,85	2,42	0,002 ^{ns}
Erro	294	354928,13	1207,24	
C.V. (%)		47,17		

GL- Graus de liberdade; SQ- Soma de Quadrados; QM- Quadrados médios; F- Teste F; ** Significativo a 0,05 de significância pelo teste Tukey.

Avaliando a Figura 11, pode-se observar o maior valor de RT na área cultivada com milho (122,97 kPa). A área de mata secundária observou-se valores considerados elevados (72,19 kPa) para resistência tênsil de agregados em solo seco. Já na área cultivada com banana foram observados os menores valores médios de resistência tênsil (25,83 kPa).

Em relação à RT encontrada na área de mata secundária, como já observado no estudo Faustino *et al.* (2021) avaliando a qualidade física do solo, valores de resistência tênsil acima de 50 kPa são considerados elevados neste tipo de uso, ressaltando que, para essas áreas são reportados na literatura valores médios entre 30 kPa a 55 kPa (IMHOFF *et al.*, 2002; BAVOSO *et al.*, 2010; LIMA *et al.*, 2018). Valores superiores aos mencionados pelos autores citados e característicos ao que foi encontrado neste estudo (72,19 kPa) podem ser impeditivos ao crescimento/desenvolvimento radicular de plantas (Figura 11).

Figura 11. Valores médios de resistência tênsil de agregados para usos dos solos. Médias seguidas pela mesma letra maiúscula para as áreas avaliadas não diferem pelo teste de Tukey a 0,05 de significância.



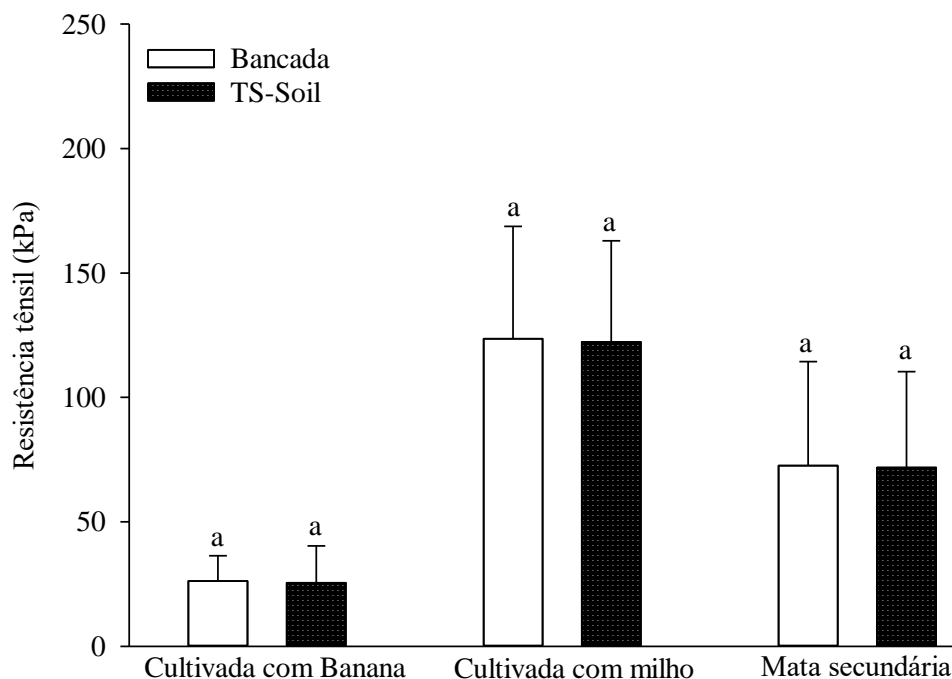
Em áreas de vegetação secundária ocorre a manutenção de resíduos culturais na superfície do solo, com a decomposição lenta e gradual desse material vegetal e menor perturbações no ambiente, há favorecimento ao aumento nos teores de carbono orgânico e maior associação desses compostos com a fração mineral, favorecendo a formação, maior estabilidade e valores elevados de resistência tênsil dos agregados (RAIESI, 2021; ZHANG *et al.*, 2021).

O cultivo convencional (revolvimento do solo com aração e/ou gradagem) praticado em regiões semiáridas, durante muitos anos consecutivos como os observados na área cultivada com milho, é a principal causa de degradação do solo e modificação de suas características físicas, químicas e biológicas (OLIVEIRA FILHO *et al.*, 2019; ESCRIBANO *et al.*, 2020; MUTUKU *et al.* 2020). Outro fato importante é que, segundo Oliveira Filho *et al.* (2019), o processo de recuperação dessas áreas, bem como a melhoria dos atributos do solo nesses ambientes é lento e requer uso de técnicas que viabilizem a recuperação.

De modo geral, aplicando-se o teste de Tukey a 0,05 de significância para comparação de médias, não foi observada diferença estatística significativa para a resistência tênsil de agregados por ambos os equipamentos (Figura 12). Para os dinamômetros de bancada e TS-Soil os maiores valores médios de RT foram observados na área cultivada com milho (123,62 e 122,33 kPa), respectivamente.

A resistência tênsil de agregados do solo é um atributo dinâmico e de alta variabilidade sendo afetado pelo uso do solo e o tipo de manejo empregado na área – cultivo com maior uso de máquinas/implementos agrícolas, como a cultivada com milho - evidenciando ser um potencial indicador físico na avalia o da qualidade física do solo, fato também verificado por Faustino *et al.* (2021).

Figura 12. Valores médios de resistência tênsil de agregados do solo obtidos pelos dinamômetros de bancada e TS-Soil. Médias seguidas pelas mesmas letras minúsculas não diferem pelo teste de Tukey a 0,05 de significância.



É importante ressaltar que áreas cultivadas com intensa moviment o do solo (ara o/gradagem) apresentam valores elevados de RT quando comparadas a áreas com menor intensidade de uso como as florestas, áreas de matas secundárias e áreas destinadas ao pousio por tempo determinado (LIMA *et al.*, 2018; (BARBOSA; FERRAZ, 2020).

Munkholm *et al.* (2016) em sua pesquisa destacaram que sistemas de manejo do solo influenciam diferentes fatores associados à resistência tênsil de agregados do solo, tais como forma o e estabiliza o de agregados, conteúdo de água, ciclos de umedecimento e secagem bem como teor de m teria orgânica. Logo, os resultados reforçam mais uma vez que o instrumento proposto apresenta sensibilidade na determina o da resistência tênsil de agregados em solo seco, podendo ser utilizado para avalia es precisas, rápidas e com confiabilidade em campo.

Em suma, considerando áreas experimentais com diferentes classes texturais,

tipos de uso/manejos do solo e históricos de uso distintos, os dados de resistência tênsil obtidos pelo instrumento portátil TS-Soil não diferem estatisticamente quando comparados aos obtidos pelo dinamômetro de bancada, considerado como padrão para a coleta de dados para o referido atributo. Ressalta-se que a sensibilidade do instrumento na valora o desse atributo dinâmico do solo lhe permite o uso em ampla faixa de textura e consistência do solo seco, sendo validado, portanto, para uso em avalia es qualitativas e quantitativas, seja em laboratório ou em campo.

Na Tabela 11 é apresentada a análise de variância para os dados de carbono orgânico total e densidade do solo, sendo constatada diferenças estatísticas significativas pelo teste F a 5% de probabilidade entre os usos dos solos.

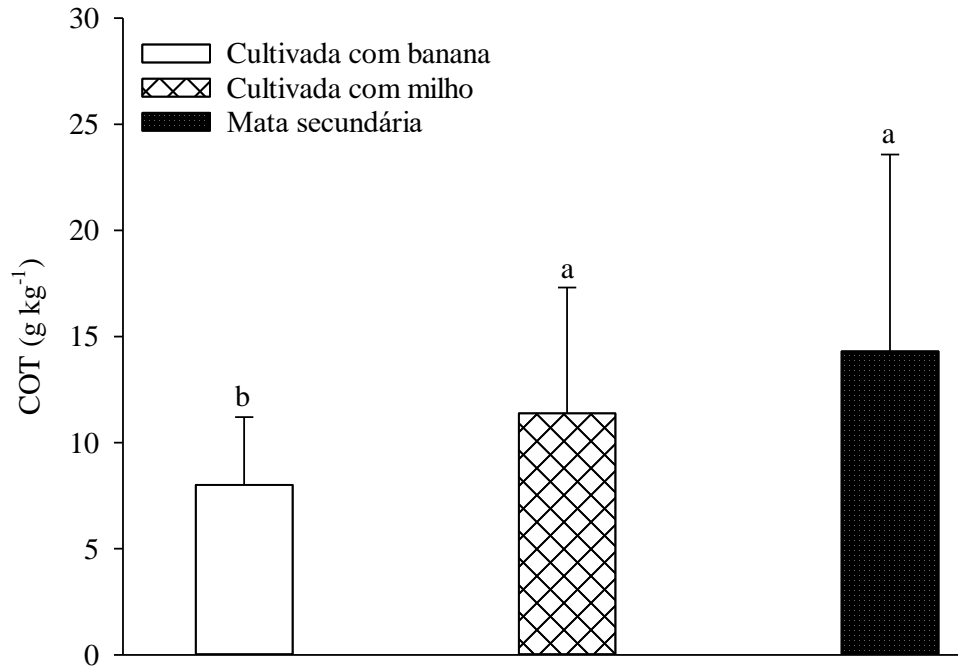
Tabela 11. Análise de variância do carbono orgânico total (COT) e densidade do solo (Ds) das áreas manejadas e mata secundária.

Fontes de varia�o	GL	SQ	QM	F
COT	2	991,49	495,75	11,31**
Erro	147	6441,44	43,82	
C.V. (%)	58,95			
Ds	2	0,58	0,29	17,09**
Erro	147	2,49	0,02	
C.V. (%)	8,69			

GL- Graus de Liberdade; SQ- Soma de Quadrados; QM- Quadrados Médios; F- Teste F; ** Significativo a 5% de probabilidade pelo teste Tukey.

Concernente ao carbono orgânico total constatou-se maiores teores na área de mata secundária e área cultivada com milho (14,30 e 11,38 g kg⁻¹, respectivamente), (Figura 13).

Figura 13. Valores médios de carbono orgânico total (COT) nas áreas avaliadas. Médias seguidas pela mesma letra minúscula não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 0,05 de significância.

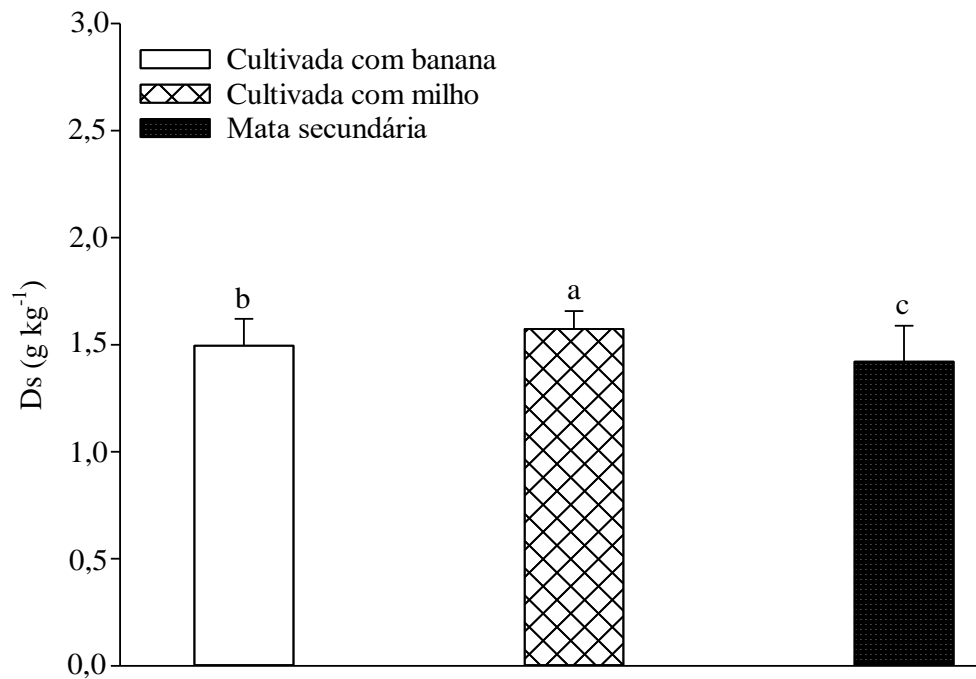


Lal (2007), avaliando a relação do potencial de estocagem de carbono com a textura do solo, afirma que solos mais arenosos tendem a apresentar maiores perdas de carbono orgânico, uma vez que nesses solos são verificadas maiores taxas de remoção de material fino e menor agregação das partículas do solo, corroborando os resultados observados na área cultivada com banana – em que o solo apresenta textura arenosa (Tabela 3).

No que tange as propriedades físicas do solo, o carbono orgânico é importante para formação e estabilização de agregados do solo, o que reflete diretamente nos valores de resistência tênsil (BAVOSO *et al.*, 2010). A agricultura convencional praticada na região do estudo (aração das áreas), favorece a exposição do carbono orgânico contido no interior dos agregados e, como consequência, sua oxidação e redução do conteúdo, influenciando diretamente a resistência tênsil de agregados (MUNKHOLM *et al.*, 2016).

Quanto à densidade do solo (Figura 14), após a comparação das médias constatou-se que na área cultivada com milho a densidade foi superior aos demais tratamentos (1,57 g kg⁻¹). Conforme observado por Topa *et al.* (2021), modificações na estrutura do solo pelas práticas de manejo em áreas cultivadas, influenciam a densidade do solo de forma que nestas áreas, frequentemente, são observados valores superiores de densidade do solo quando comparados com áreas de menor movimentação do solo, como áreas de pousio ou florestas/mata secundária.

Figura 14. Valores médios de densidade do solo (D_s) nas áreas estudadas. Médias seguidas pela mesma letra minúscula não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 0,05 de significância.



A densidade do solo é um atributo importante na qualidade estrutural do solo, sendo seus valores facilmente identificados com alterações ocorridas no sistema solo (MORA; LÁZARO, 2014); logo, áreas agrícolas podem apresentar valores críticos de densidade do solo, sendo estes restritivos ao crescimento/desenvolvimento radicular e, por conseguinte, à produtividade das culturas (MUTUKU *et al.*, 2020).

5 CONCLUSÕES

Há boa concordância entre os equipamentos avaliados na medição da resistência tênsil de agregados em solo seco.

A substituição do dinamômetro de bancada pelo instrumento TS-Soil não resulta em diferenças significativas nos valores de resistência tênsil de agregados em suas formas naturais, daí a validação do instrumento TS-Soil para uso no campo ou em laboratório.

O TS-Soil possibilita combinar a percepção do avaliador com a força aplicada para romper o agregado, tornando possível a definição de faixas de valores para os graus de consistência do solo seco.

A percepção qualitativa associada com valores de resistência tênsil confere melhor qualidade ao processo de avaliação da consistência em solo seco.

O dinamômetro TS-Soil é sensível o suficiente para monitorar alterações na qualidade estrutural do solo em sistemas de manejo no campo.

REFERÊNCIAS

- ABDOLLAHI, L.; MUNKHOLM, L.J. Tillage system and cover crop effects on soil quality: I. Chemical, mechanical, and biological properties. **Soil Science Society of America Journal**, v. 78, p. 262-270, 2014.
- ALMEIDA, B.G.; SILVA, A.P.; RAINE, S.R.; FIGUEIREDO, G.C. Evaluation of automotive varnish as a coating for density measurements of soil clods. **Soil Science Society of America Journal**, v. 73, p. 449-452, 2009.
- ANNABI, M.; RACLOT, D.; BHARI, H.; BAILLY, J.S.; GOMEZ, C.; BISSONNAIS, Y.L. Spatial variability of soil aggregates stability at the scale of an agricultural region in Tunisia. **Catena**, v. 153, p. 157-167, 2017.
- ARAÚJO, A.M.S.S.; MENEZES, A.S.; ALENCAR, T.L.; SILVA, C.P.; ASSIS JÚNIOR, R.N.; ROMERO, R.E.; COSTA, M.C.G.; ALMEIDA, B.G.; MOTA, J.C.A. Tensile strength in horizons with and without cohesive character: Variability and relation with granulometry. **Geoderma**, v. 166, p. 290-297, 2018.
- BARBOSA, L.A.P.; FERRAZ, A.C.O. Which evidence attests for soil aggregate rupture? A new criterion to determine aggregate tensile strength. **Soil and Tillage Research**, v. 197, n. 104530, 2020.
- BAVOSO, M.A.; GIAROLA, N.F.B.; TORMENA, C.A.; PAULETTI, V. Preparo do solo em áreas de produção de grãos, silagem e pastejo: efeitos na resistência tênsil e friabilidade de agregados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, p. 227-234, 2010.
- BLANCO-MOURE, N.; ANGUREL, L.A.; MORET-FERNÁNDEZ, D.; LÓPEZ, M.V. Tensile strength and organic carbon of soil aggregates under long-term no tillage in semiarid Aragon (NE Spain). **Geoderma**, v. 189-190, p. 423-430, 2012.
- BOGUNOVIC, I.; PEREIRA, P.; KISIC, I.; SAJKO, K.; SRAKA, M. Tillage management impacts on soil compaction, erosion, and crop yield in Stagnosols (Croatia). **Catena**, v. 160, p. 376-384, 2018.
- BRONICK, C.J.; LAL, R. Soil structure and management: a review. **Geoderma**, v. 124, p. 3-22, 2005.
- CHEN, Y.L.; PALTA, J.; CLEMENTS, J.; BUIRCHELL, B.; SIDDIQUE, K.H.M.; RENGEL, Z. Root architecture alteration of narrow-leafed lupin and wheat in response to soil compaction. **Fields Crops Research**, v. 165, p. 61-70, 2014.
- CHERUBIN, M.R.; FRANCO, A.L.C.; GUIMARÃES, R.M.L.; TORMENA, C.A.; CERRI, C.E.P.; KARLEN, D.L.; CERRI, C.C. Assessing soil structural quality under Brazilian sugarcane expansion areas using visual evaluation of soil structure (VESS). **Soil and Tillage Research**, v. 173, p. 64-74, 2017.
- DE MELO, L.B.B.; SILVA, B.M.; PEIXOTO, D.S.; CHIARINI, T.P.A.; OLIVEIRA, G.C.; CURI, N. Effects of compaction on the relationship between electrical resistivity and soil water content in Oxisol. **Soil and Tillage Research**, n. 104876, v. 208, p. 1-9, 2021.

DEXTER, A.R.; Shape of aggregates from some Dutch and Australian top soils. **Geoderma**, v. 35, p. 91-107, 1985.

DEXTER, A.R. Advances in characterization of soil structure. **Soil and Tillage Research**, v. 11, p. 199-238, 1988.

DEXTER, A.R.; KROESBERGEN, B. Methodology for determination of tensile strength of soil aggregates. **Journal Agriculture Engineering Research**, v. 31, p. 139-147, 1985.

DEXTER, A.R.; WATTS, C.W. Tensile strength and friability. *In: Soil Environment Analysis*. Structural Methods, 2nd Ed. K.A Smith and C.E. Mullins (eds.). Marcel Dekker, New York, NY, pp. 401-430, 2000.

EDEN, M.; BACHMANN, J.; CAVALARIS, C.; KOSTOPOULOU, S.; KOZAITI, M.; BÖTTCHER, J. Soil structure of a clay loam as affected by long-term tillage and residue management. **Soil and Tillage Research**, n. 104734, v. 204, p. 1-9, 2020.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 5. ed. Brasília – DF: Embrapa, 2018.

ESCRIBANO, M.; ELGHANNAM, A.; MESIAS, F.J. Dairy sheep in semi-arid rangelands: A carbon footprint dilemma between intensification and land-based grazing. **Land Use Policy**, v. 95, n. 104600, 2020.

FAUSTINO, L.L.; MARCIANO, C.R.; ANDRADE, G.R.P. Physical quality of soil under secondary forest, leguminous trees, and degraded pasture. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 56, e02023, 2021.

FERREIRA, A.O.; SÁ, J.C.M.; GIAROLA, N.F.B.; HARMS, M.G.; MIARA, S.; BAVOSO, M.A.; BRIEDIS, C.; NETTO, C.Q. Variação na resistência tênsil de agregados em função do conteúdo de carbono em dois solos na região dos campos gerais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, p. 437-445, 2011.

FERREIRA, D.F. Sisvar: A guide for its Bootstrap produces in multiple comparasons. **Ciência e Agrotecnologia**, 38, 109-112, 2014.

FERREIRA, D.F. SISVAR: A computer analysis system to fixed effects split plot type designs. **Revista Brasileira de Biometria**, v. 37, p. 529-535, 2019.

FIGUEREDO, G.C.; SILVA, A.P.; TORMENA, C.A.; GIAROLA, N.F.B; MORAES, S.O; ALMEIDA, B.G. Desenvolvimento de um consolidômetro pneumático; modelagem da compactação, penetrometria e resistência tênsil de agregados de solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, p. 389-409, 2011.

INAGAKI, T.M.; SÁ, J.C.M.; CAIRES, E.F.; GONÇALVES, D.R.P. Why does carbon increase in highly weathered soil under no-till upon lime and gypsum use? **Science of the Total Environment**, v. 599-600, p. 523-532, 2016.

IMHOFF, S.; SILVA, A.P.; DEXTER, A.R. Factors contributing to the tensile strength and friability of Oxisols. **Soil Science Society of America Journal**, v. 66, p. 1656-1661, 2002.

LAL, R. Carbon management in agricultural soils. **Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change**, v. 12, p. 303-322, 2007.

LI, Y.; LI, Z.; CUI, S.; ZHANG, Q. Trade-off between soil pH, bulk density and other soil physical properties under global no-tillage agriculture. **Geoderma**, v. 361, n. 114099, 2020.

LIMA, C.R.L.; PAIVA, R.B.; NUNES, M.C.M.; TUCHTENHAGEN, I.K.; PILLON, C.N. Critical values of physical attributes of an Ultisol under uses in South of Brazil. **Agronomy**, v. 13, e5529, p. 1-9, 2018.

LIMA, R.P.; SILVA, A.P.; GIAROLA, N.F.B.; SILVA, A.R.; ROLIM, M.M. Changes in soil compaction indicators in response to agricultural field traffic. **Biosystems Engineering**, v. 162, p. 1-10, 2017.

MEHRA, O.P.; JACKSON, M.L. Iron oxide removal from soils and clay by dithionite-citrate-bicarbonate system buffered with sodium bicarbonate. **Clay Mineralogy**, v. 7, p. 317-327, 1960.

MELO, V.F.; MOURA, R.; TOLEDO, F.H.; LIMA, V.C.; GHIDIN, A.A. Morfologia de agregados de Latossolos Bruno e Vermelho do Estado do Paraná, avaliada por imagens obtidas por scanner. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, p. 85-99, 2008.

MENEZES, A.S.; ALENCAR, T.L.; ASSIS JÚNIOR, R.N.; TOMA, R.S.; ROMERO, R.E.; COSTA, M.C.G.; COOPER, M.; MOTA, J.C.A. Functionality of the porus network of Bt horizons of soil with and without cohesive. **Geoderma**, v. 313, 290-297, 2018.

MILLER, W.P.; MILLER, D.M. A micro-pipett e method for soil mechanical analysis. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 18, p. 1-15, 1987.

MORA, J.L.; LÁZARO, R. Seasonal changes in bulk density under semiarid patchy vegetation: the soil beats. **Geoderma**, v. 235-236, p. 30-38, 2014.

MOTA, J.C.A.; SILVA, C.P. Descrição morfológica de um Argissolo Vermelho Amarelo. Fortaleza, 2017 (**Informação pessoal**).

MUNKHOLM, L.J. Soil friability: A review of the concept, assessment and effects of soil properties and management. **Geoderma**, v. 167-168, p. 236-246, 2015.

MUNKHOLM, L.J.; HECK, R.J.; DEEN, B.; ZIDAR, T. Relationship between soil aggregate strength, shape and porosity for soils under different long-term management. **Geoderma**, v. 268, p. 52-59, 2016.

MUTUKU, E.A.; ROOBROECK, D.; VANLAUWE, B.; BOECKX, P.; CORNELIS, W.M. Maize production under combined Conservation Agriculture and Integrated Soil Fertility Management in the sub-humid and semi-arid regions of Kenya. **Field Crops Research**, v. 254, n. 107833, 2020.

OLIVEIRA, L.S.; QUEIROZ, A.S.; LOPES, A.S.; SILVA, F.G.; MOTA, J.C.A. Forma e diâmetro de agregados como fontes de variação na resistência tênsil. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, v. 16, p. 117-121, 2021.

OLIVEIRA, L.S.; MAIA, R.N.; ASSIS JÚNIOR, R.N.; ROMERO, R.E.; COSTA, M.C.G.;

ALENCAR, T.L.; MOTA, J.C.A. Tensile strength values for the degrees of soil consistency using human perception and TS-Soil device. **Catena**, v. 190, p. 1-6, 2020.

OLIVEIRA, L.S.; MOTA, J.C.A. Descrição morfológica de um Cambissolo Háplico. Limoeiro do Norte, 2018 (**Informação pessoal**).

OLIVEIRA, L.S.; MOTA, J.C.A. Descrição morfológica de um Luvissole Crômico. Quixadá, 2018 (**Informação pessoal**).

OLIVEIRA, L.S.; MOTA, J.C.A. Descrição morfológica de um Latossolo Vermelho Amarelo. Crato, 2018 (**Informação pessoal**).

OLIVEIRA, P.R.; CENTURION, J.F.; CENTURION, M.A.P.C.; ROSSETTI, K.V.; FERRUADO, A.S.; FRANCO, H.B.J.; PEREIRA, F.S.; BÁRBARO JÚNIOR, L.S. Qualidade estrutural de um Latossolo Vermelho submetido à compactação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 37, p. 604-612, 2013.

OLIVEIRA FILHO, J.S.; VIEIRA, J.N.; SILVA, E.M.R.; OLIVEIRA, J.G.B.; PEREIRA, M.G.; BRASILEIRO, F.G. Assessing the effects of 17 years of grazing exclusion in degraded semi-arid soils: Evaluation of soil fertility, nutrients pools and stoichiometry. **Journal of Arid Environments**, v. 166, p. 1-10, 2019.

ÖZTAS, T.; SÖNMEZ, K.; CANBOLAT, M.Y. Strength of individual soil aggregates against crushing forces. I. Influence of aggregate characteristics. **Turkish Journal of Agriculture and Forestry Sciences**, v. 23, p. 567-572, 1999.

PORTUGAL, A.F.; COSTA, O.D.V.; COSTA, L.M.; SANTOS, B.C.M. Atributos químicos e físicos de um Cambissolo Háplico Tb distrófico sob diferentes usos na zona da mata mineira. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, p. 249-258, 2008.

QUEIROZ, A.S.; SILVA, C.P.; ALENCAR, T.L.; ROMERO, R.E.; MOTA, J.C.A. Resistência tênsil: variabilidade no horizonte e valor limiar para o caráter coeso em Argissolos do Ceará. XXXVII Encontro de Iniciação Científica. **Anais dos Encontros Universitários da UFC**, 2018.

RAESI, F. The quantity and quality of soil organic matter and humic substances following dry-farming and subsequent restoration in an upland pasture. **Catena**, v. 202, n. 105249, p. 1-11, 2021.

RABOT, E.; WIESMEIER, M.; SCHLÜTER.; VOGEL, H.J. Soil structure as an indicator of soil functions: A review. **Geoderma**, v. 314, p. 122-137, 2018.

ROSCOE, R.; MACHADO, P.L.O.A. **Fracionamento físico do solo em estudos da matéria orgânica**. Dourados. Embrapa Agropecuária Oeste, 2002. 86 p.

ROGOWSKI, A.S.; MOLDENHAUER, W.C.; KIRKHAM, D. Rupture parameters of soil aggregates. **Soil Science Society of America Proceedings**, v. 32, p. 720-724, 1968.

SANTOS, R.D.; LEMOS, R.C.; SANTOS, H.G.; KER, J.C. ANJOS, L.H.C.; SHIMIZU, S.H. Manual de descrição e coleta de solos no campo. Viçosa, MG, **Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**, 2013. 100 p.

- SCHMID, C.A.O.; REICHEL, R.; SCHRÖDER, P.; BRÜGGEMANN, N.; SCHLOTTER, M. 52 years of ecological restoration following a major disturbance by opencast lignite mining does not reassemble microbiome structures of the original arable soils. **Science of the Total Environment**, v. 745, n. 140955, 2020.
- SEBEN JR, G.F.; CORÁ, J.E.; FERNANDES, C.; LAL, R. Aggregate shape and tensile strength measurement. **Soil Science**, v. 178, p. 301-307, 2013.
- SENTELHAS, P.C.; MORAES, S.O.; PIEDADE, S.M.S.; PEREIRA, A.R.; ANGELOCCI, L.R.; MARIN, F.R. Análise comparativa de dados meteorológicos obtidos por estações convencional e automática. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 5, p. 215-221, 1997.
- SITHOLE, N.J.; MAGWAZA, L.S. Long-term changes of soil chemical characteristics and maize yield in no-till conservation agriculture in semi-arid environment of South Africa. **Soil and Tillage Research**, n. 104317, v. 194, p. 1-9, 2019.
- SILVA, R.G.P.O. **Espectroscopia de reflectância no mapeamento e modelagem de solos no semiárido**. 2018. 33p. Dissertação (Ciência do Solo) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza. 2018.
- SIVARAJAN, S.; MAHARLOOEI, M.; BAJWA, S.G.; NOWATZKI, J. Impact of soil compaction due to wheel traffic on corn and soybean growth, development and yield. **Soil and Tillage**, v. 175, p. 234-243, 2018.
- SOIL SCIENCE DIVISION STAFF. **Soil survey manual**. DITZLER, C., SCHEFFE, K., MONGER, H. C. (eds). USDA Handbook 18. Government Printing Office, Washington, D.C.
- STEFANOSKI, D.C.; SANTOS, G.G.; MARCHÃO, R.L.; PETTER, F.A.; PACHECO, L.P. Uso e manejo do solo e seus impactos sobre a qualidade física. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 17, p. 1301-1309, 2013.
- TISDALL, J.M.; OADES, J.M. Organic matter and water-stable aggregates in soils. **Journal of Soil Science**, v. 33, p. 141-163, 1982.
- TOPA, D.; CARA, I.G.; JITĂREANU, G. Long term impact of different tillage systems on carbon pools and stocks, soil bulk density, aggregation and nutrients: A field meta-analysis. **Catena**, v. 199, n. 105102, p. 1-8, 2021.
- TORMENA, C.A.; FIDALSKI, J.; ROSSI JUNIOR, W. Resistência tênsil e friabilidade de um Latossolo sob diferentes sistemas de uso. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, p. 33-42, 2008.
- VASCONCELOS, R.F.B.; CANTALICE, J.R.B.; SILVA, A.J.N.; OLIVEIRA, V.S.; SILVA, Y.J.A.B. Limites de consistência e propriedades químicas de um Latossolo Amarelo Distrocoeso sob aplicação de diferentes resíduos de cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, p. 639-648, 2010.
- WARRICK, A.W.; NIELSEN, D.R. Spatial variability of soil physical properties in the field. In: Hillel, D. (Ed.). **Applications of soil physics**. New York: Academic. cap. 2. p. 319-344.
- WATTS, C.W.; DEXTER, A.R. Soil Friability: theory, measurement and the effects of management and organic carbon content. **European Journal of Soil Science**, v. 49, p. 73-84,

1998.

WEI, Y.; ZHANG, Y.; WILSON, G.W.T.; GUO, Y.; BI, Y.; XIONG, X.; LIU, N. Transformation of litter carbon to stable soil organic matter is facilitated by ungulate trampling. **Geoderma**, n. 114828, v. 385, p. 1-9, 2021.

YANG, Z.; BAOYIN, T.; LI, F.J. Long-term effects of restoration measures on soil C and C: nutrient ratios a semiarid steppe. **Ecological Engineering**, n. 105913, v. 153, p. 1-8, 2020.

YEOMANS, J.C.; BREMNER, J.M. A rapid and precise method for routine determination of organic carbon in soil. **Communication in Soil Science and Plant Analyses**, v. 19, p. 1467-1476, 1988.

YOUNG, I.M.; MULLINS, C.E. Factors affecting the strength of undisturbed cores from soils with low structural stability. **Journal of Soil Science**, v. 42, p. 205-217, 1991.

YU, Z.; ZHANG, J.; ZHANG, C.; XIN, X.; LI, H. The coupling effects of soil organic matter and particle interaction forces on soil aggregate stability. **Soil and Tillage Research**, v. 174, p. 251-260, 2017.

WINSTONE, B.C.; HECK, R.J.; MUNKHOLM, L.J.; DEEN, B. Characterization of soil aggregate structure by virtual erosion of X-ray CT imagery. **Soil Tillage Research**, v. 185, p. 70-76, 2019.

ZACHARIAS, S.; HEATWOLE, C.D.; COAKLEY, C.W. Robust quantitative techniques for validating pesticide transport models. **Transactions of the ASAE**, v. 39, p. 47-53, 1996.

ZHANG, S.; CUI, J.; WU, H.; ZHENG, Q.; SONG, D.; WANG, X.; ZHANG, S. Organic carbon, total nitrogen, and microbial community distributions within aggregates of calcareous soil treated with biochar. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 314, n. 107408, p. 1-11, 2021.