

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA  
CENTRO DE CIÊNCIAS RURAIS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DO SOLO

Viviane Sobucki

**PROPRIEDADES REOLÓGICAS NA DETECÇÃO DO CARÁTER  
COESO EM SOLOS**

Santa Maria, RS  
2021

**Viviane Sobucki**

**PROPRIEDADES REOLÓGICAS NA DETECÇÃO DO CARÁTER COESO EM  
SOLOS**

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Ciência do Solo, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do título de **Mestre em Ciência do Solo**.

Orientador: Prof. Dr. José Miguel Reichert  
Coorientadora: Dra. Dörthe Holthusen

Santa Maria, RS  
2021

This study was financed in part by the Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Finance Code 001

Sobucki, Viviane  
Propriedades Reológicas na Detecção do Caráter Coeso em Solos / Viviane Sobucki.- 2021.  
69 p.; 30 cm

Orientador: José Miguel Reichert  
Coorientadora: Dörthe Holthusen  
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Ciências Rurais, Programa de Pós Graduação em Ciência do Solo, RS, 2021

1. Reometria 2. Solo Coeso 3. Cisalhamento Oscilatório  
4. Solos Intemperizados 5. Solos Hardsetting I.  
Reichert, José Miguel II. Holthusen, Dörthe III. Título.

Sistema de geração automática de ficha catalográfica da UFSM. Dados fornecidos pelo autor(a). Sob supervisão da Direção da Divisão de Processos Técnicos da Biblioteca Central. Bibliotecária responsável Paula Schoenfeldt Patta CRB 10/1728.

Declaro, VIVIANE SOBUCKI, para os devidos fins e sob as penas da lei, que a pesquisa constante neste trabalho de conclusão de curso (Dissertação) foi por mim elaborada e que as informações necessárias objeto de consulta em literatura e outras fontes estão devidamente referenciadas. Declaro, ainda, que este trabalho ou parte dele não foi apresentado anteriormente para obtenção de qualquer outro grau acadêmico, estando ciente de que a inveracidade da presente declaração poderá resultar na anulação da titulação pela Universidade, entre outras consequências legais.

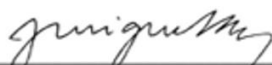


**Viviane Sobucki**

**PROPRIEDADES REOLÓGICAS NA DETECÇÃO DO CARÁTER COESO EM SOLOS**

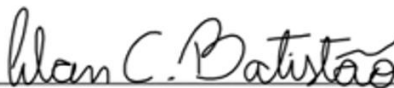
Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Ciência do Solo, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do título de **Mestre em Ciência do Solo**.

**Aprovado em 05 de março de 2021:**



---

**José Miguel Reichert, Dr. (UFSM)**  
(Presidente/Orientador)  
(videoconferência)



---

**Alan Carlos Batistão, Dr. (UFRGS)**  
(videoconferência)



---

**Jaedson Cláudio Anunciato Mota, Dr. (UFC)**  
(videoconferência)

Santa Maria, RS  
2021

## DEDICATÓRIA

*Aos meus pais, **Silvestre e Ivone**, e aos meus irmãos, **Lisiane e Vinicio**, que tanto me incentivam e me apoiaram para a realização deste trabalho.*

## AGRADECIMENTOS

A concretização deste trabalho não ocorreria sem o auxílio, compreensão e dedicação de várias pessoas, a elas deixo o meu sincero obrigada:

A Deus, ao qual faço meus pedidos e orações;

Aos meus pais, Silvestre e Ivone Sobucki, pelo amor incondicional, pela compreensão em momentos de ausência, pelo apoio infinito e por tudo que fizeram e fazem pelos seus filhos.

Vocês são a minha base!

Aos meus irmãos Lisiane e Vinicio, pelo carinho, amor, zelo, por todo apoio e ajuda nessa etapa tão importante para mim;

Ao Professor José Miguel Reichert, pela honrosa orientação e oportunidade de trabalhar com a física do solo;

À Dörthe Holthusen, por aceitar coorientar minha pesquisa de mestrado, pelo apoio, paciência, ajuda com os ensaios no reômetro. Obrigada por contribuir tanto para meu crescimento! És alguém que admiro muito!

Aos pesquisadores do Programa de Pós-graduação em Ciência do Solo (PPGCS) da Universidade Federal do Ceará (UFC), pela cessão das amostras de solos, de modo especial ao prof. Jaedson Cláudio Anunciato Mota;

Ao Douglas Scheid, pela ajuda no laboratório e leitura das amostras;

À Amanda Romeiro, pela amizade e ajuda com a reometria;

À Maria Inês Diel, pelo auxílio no software R;

Aos colegas e amigos do departamento de solos e laboratório de física, pelo convívio e aprendizado;

Ao técnico de Laboratório, Fonte, pela ajuda com materiais e equipamentos;

À Universidade Federal de Santa Maria e ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, pela oportunidade de realização do curso;

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, pelos ensinamentos e pela contribuição em minha formação;

À CAPES, pelo apoio financeiro.

*“Talvez não tenha conseguido fazer o melhor, mas lutei para que o melhor fosse feito. Não sou o que deveria ser, mas Graças a Deus, não sou o que era antes. ”*

(Martin Luther King)



## RESUMO

### PROPRIEDADES REOLÓGICAS NA DETECÇÃO DO CARÁTER COESO EM SOLOS

AUTORA: Viviane Sobucki  
ORIENTADOR: José Miguel Reichert  
COORIENTADORA: Dörthe Holthusen

O caráter coeso tem sido avaliado primeiramente à campo, onde o pedólogo faz o seu reconhecimento rápido, no entanto, há o problema da subjetividade e a falta de métricas para a caracterização. Por isso, pesquisas vêm sendo feitas no sentido de sanar essa dúvida com métodos quantitativos medidos até então na mesoescala. Conhecido é que os processos de adesão e coesão possuem origem na microescala, isto é, nas interações entre partículas, e um método útil para analisar a microescala e ainda não testado, é por meio reometria. O objetivo deste estudo foi então avaliar se as propriedades reológicas, obtidas em testes de varredura de amplitude sob condições de cisalhamento oscilatório, são capazes de detectar o caráter coeso e, assim, contribuir para melhorar o entendimento da coesividade nesses solos. Em um reômetro rotacional, foram avaliadas amostras de seis tipos de solos, em três posições diferentes no perfil (topo, meio e base), com e sem caráter coeso. Várias propriedades reológicas do solo foram determinadas: deformação no final do intervalo viscoelástico linear, faixa do LVR ( $\gamma_{LVR}$ ), tensão de cisalhamento no final da faixa do LVR ( $\tau_{LVR}$ ), deformação no ponto de escoamento (“yield point”, YP) ( $\gamma_{YP}$ ), módulos de armazenamento e perda em YP ( $G'G''_{YP}$ ), tensão máxima de cisalhamento ( $\tau_{max}$ ), deformação na tensão máxima de cisalhamento ( $\gamma_{\tau_{max}}$ ) e integral z (Iz). Neste estudo, apenas algumas propriedades reológicas apresentaram efeito significativo na detecção do caráter coeso do solo, em geral com valores maiores para solos coesos em comparação com os não coesos, indicando que os solos coesos são mais estáveis. Enquanto que a coesão afetou somente na posição base da  $\gamma$  das propriedades reológicas no fim da faixa LVR, ela teve um efeito significativo nas propriedades  $\tau_{max}$  e  $\gamma_{\tau_{max}}$ , nas posições topo e meio, respectivamente. Além disso, três materiais não atingiram o ponto de escoamento. Para a integral z, solos coesos apresentaram ambos menores e maiores valores que solos não coesos. Iz maior em solos não coesos parece estar ligado a uma pequena dilatação, consequência do atrito alto entre as partículas. Nesse sentido, a  $\tau_{max}$  e a Iz foram as propriedades que tiveram interação dupla significativa entre os fatores analisados. O tipo de solo teve maior efeito nas propriedades reológicas, sendo, em geral, o solo PVAd com maiores valores. Dentro das demais propriedades dos solos estudados, o teor de ferro, carbono orgânico e de argila, a densidade e a força normal no início do teste tiveram o maior impacto na reologia. A propriedade da mesoescala avaliada, a resistência tênsil, apresentou a relação mais estreita com a  $\gamma_{\tau_{max}}$  e a  $\tau_{max}$ . Conclui-se que a reometria pode ajudar a identificar o caráter coeso apoiando outras análises, mas para uma avaliação independente, mais testes, especialmente em diferentes teores de água, são necessários.

**Palavras chave:** Reometria. Solo coeso. Cisalhamento Oscilatório. Solos Intemperizados. Solos Hardsetting.

## ABSTRACT

### REOLOGICAL PROPERTIES IN DETECTION OF THE COHESIVENESS CHARACTER IN SOILS

AUTHOR: VIVIANE SOBUCKI  
ADVISOR: JOSÉ MIGUEL REICHERT  
CO-ADVISOR: DÓRTHE HOLTHUSEN

The cohesive character has been evaluated primarily in the field, where a pedologist is capable to recognize it rather easily. However, there is a problem of subjectivity and lack of metrics for characterization, so research has been done in order to address this doubt with quantitative methods measured so far in the meso-scale. It is known that adhesion and cohesion processes originate at the micro scale, that is, in the interactions between particles, and a useful method to analyze the micro scale but not yet tested, is through rheometry. The objective of this study was then to evaluate whether rheological properties, obtained in amplitude sweep tests under oscillatory shear conditions, are able to detect the cohesive character and thus contribute to improve the understanding of cohesiveness in these soils. In a rotational rheometer, samples of six soil types were evaluated at three different positions in the profile (top, middle, and bottom), with and without cohesive character. Several soil rheological properties were determined: strain at the end of the linear viscoelastic range, LVR range ( $\gamma_{LVR}$ ), shear stress at the end of the LVR range ( $\tau_{LVR}$ ), strain at the yield point (YP) ( $\gamma_{YP}$ ), storage and loss modulus at YP ( $G'G''_{YP}$ ), maximum shear stress ( $\tau_{max}$ ), strain at maximum shear stress ( $\gamma_{\tau_{max}}$ ), and z integral (Iz). In this study, only a few rheological properties had a significant effect on detecting the cohesive character of the soil, in general with higher values for cohesive soils compared to non-cohesive soils, indicating that cohesive soils are more stable. While cohesion affected only the  $\gamma$  base position of the rheological properties at the end of the LVR range, it had a significant effect on the  $\tau_{max}$  and  $\gamma_{\tau_{max}}$  properties, in the top and middle positions, respectively. In addition, three materials did not reach the pour point. For the integral z, cohesive soils showed both lower and higher values than non-cohesive soils. Greater Iz in non-cohesive soils seems to be linked to a small expansion, a consequence of the high friction between the particles. In this sense,  $\tau_{max}$  and Iz were the properties that had a significant double interaction between the factors analyzed. The type of soil had the greatest effect on the rheological properties, being, in general, the PVAd soil with the highest values. Within the other soil properties studied, iron, organic carbon and clay content, density, and normal force at test initiation had the greatest impact on rheology. The evaluated mesoscale property, tensile strength, showed the closest relationship with  $\gamma_{\tau_{max}}$  and  $\tau_{max}$ . It is concluded that rheometry can help identify the cohesive character supporting other analyses, but for an independent evaluation, more tests, especially at different water contents, are needed.

**Key words:** Rheometry. Cohesive Soil. Oscillatory Shear. Weathered Soils. Hardsetting soils.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Mapa representativo da área da Formação Barreiras e localização dos perfis analisados em pesquisas.....	17
Figura 2 - Testes oscilatórios realizados em um reômetro modular compacto, modelo de placas paralelas. ....	22
Figura 3 - Ângulo de deslocamento de fase ( $\delta$ ) entre as curvas de deformação (linha contínua) e tensão resultante (linha pontilhada) de materiais viscoelásticos em função do tempo.....	23
Figura 4 – A) Resultados do teste de varredura de amplitude (TVA) com deformação controlada e B) propriedades reológicas calculadas a partir dos dados da curva obtida no TVA. ....	24
Figura 5 - Localização dos pontos de coleta dos solos.....	27
Figura 6 - Preparação das amostras de solo: umedecimento (A); homogeneização e repouso (B); anel volumétrico (C); compactação da massa de solo no anel (D); amostra pronta (E) e saturação por capilaridade (F).....	31
Figura 7 - Preparação das amostras para condução do TVA: A) amostra sobre a placa inferior. B) e C) amostra retirada do anel com corte horizontal na altura de 4mm. D) amostra com 4mm de altura. E) amostra ajustada entre as placas paralelas. F) retirada do excesso de solo circundante – amostra pronta para o teste. ....	33
Figura 8 - Tensão máxima de cisalhamento ( $\tau_{max}$ ) em função do tipo de solo, da posição e a coesão. ....	37
Figura 9 - Módulos de armazenamento e perda no ponto de escoamento ( $G'G''_{YP}$ ) em função do tipo de solo, posição do horizonte e da coesão. ....	39
Figura 10 - Deformação no fim do intervalo viscoelástico linear ( $\gamma_{LVR}$ ) em função do tipo de solo, da posição do horizonte e o efeito simples da coesão. ....	41
Figura 11 - Deformação no ponto de escoamento ( $\gamma_{YP}$ ) em função do tipo de solo, da posição do horizonte e do efeito simples da coesão. ....	43
Figura 12 - Deformação na tensão máxima de cisalhamento ( $\gamma_{\tau_{max}}$ ) em função do tipo de solo, da posição do horizonte e da coesão. ....	44
Figura 13 - Integral z em função do tipo de solo, da posição do horizonte e da coesão. ....	47

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Distribuição das frações areia, silte, argila, valores da densidade dos solos e alguns atributos químicos, dos solos Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico típico (PVAd), Argissolo Amarelo Eutrocoeso abrupto (PAex abrupto), Argissolo Amarelo Eutrocoeso típico (PAex típico), Argissolo Amarelo Distrocoeso epirredóxico (PAdx), Latossolo Amarelo Alumínico argissólico (LAa) e Latossolo Amarelo Distrocoeso típico (LAdx). .....	28
Tabela 2 - Valores da resistência tênsil dos solos em estudo. ....	30
Tabela 3 - Configurações recomendadas para o teste de varredura de amplitude com deformação controlada. ....	32
Tabela 4 - Análise de variância (ANOVA) para as propriedades de resistência ao cisalhamento: Tensão no final do intervalo viscoelástico linear ( $\tau_{LVR}$ ), módulos de armazenamento e de perda no ponto de escoamento ( $G'$ e $G''_{YP}$ ) e tensão máxima de cisalhamento ( $\tau_{max}$ ). ....	34
Tabela 5 - Análise de variância (ANOVA) para as propriedades de viscoelasticidade: Deformação no final do intervalo viscoelástico linear ( $\gamma_{LVR}$ ), deformação no ponto de escoamento ( $\gamma_{YP}$ ), deformação na tensão máxima de cisalhamento ( $\gamma_{\tau_{max}}$ ) e integral z (Iz). ....	40
Tabela 6 - Coeficientes de correlação de Pearson e significância entre as propriedades químicas, resistência tênsil, propriedades reológicas e a força normal ( $F_n$ ) obtida no início do teste TVA. ....	49

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	<b>12</b>
<b>2. ESTADO DA ARTE</b> .....	<b>14</b>
2.1 SOLOS COESOS .....	14
<b>2.1.1 Propriedades de solos coesos</b> .....	<b>14</b>
<b>2.1.2 Distribuição espacial</b> .....	<b>16</b>
<b>2.1.3 Mecânica dos solos coesos e interação com a umidade</b> .....	<b>18</b>
2.2 REOLOGIA DO SOLO .....	20
<b>2.2.1 Teste de varredura de amplitude e propriedades reológicas</b> .....	<b>21</b>
<b>3. MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	<b>26</b>
3.1 CARACTERIZAÇÃO DO LOCAL DO ESTUDO E DOS SOLOS .....	26
3.2 TESTE DE VARREDURA DE AMPLITUDE .....	30
3.3 ANÁLISES ESTATÍSTICAS .....	33
<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	<b>34</b>
<b>5. CONCLUSÕES</b> .....	<b>51</b>
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>52</b>
<b>ANEXOS</b> .....	<b>59</b>

## 1. INTRODUÇÃO

O caráter coeso é um atributo diagnóstico utilizado para distinguir solos com horizontes pedogenéticos subsuperficiais adensados, conferindo consistência muito dura a extremamente dura quando secos e friável quando úmidos (EMBRAPA, 2018). Solos coesos estendem-se por quase toda a faixa costeira do Brasil, desde o estado do Amapá até o Rio de Janeiro (JACOMINE, 2001) e apresentam algumas limitações ao desenvolvimento das plantas.

As principais restrições dos solos coesos ocorrem no período seco, quando o efeito do horizonte coeso se destaca (RIBEIRO, 2001), resultando em aumento da densidade do solo, resistência à penetração, resistência tênsil e redução da porosidade total (LIMA NETO et al., 2010), os quais têm sido utilizados como formas de identificação do caráter coeso (GIAROLA et al., 2003). Ocorrem também restrições químicas como a alta saturação por alumínio e alta acidez ativa e trocável, dificultando o desenvolvimento do sistema radicular das raízes (REZENDE, 2000).

Esse comportamento peculiar do solo não está restrito somente ao Brasil, pois há registros em outras partes do mundo, como na Austrália, onde foi identificado, mapeado e denominado “hardsetting” (NORTHCOTE et al., 1975). Hardsetting é o termo utilizado para caracterizar solos que são afetados por salinidade, sendo muito frágeis ao umedecer devido ao efeito dispersante do sódio e muito duros ao secar, quando as partículas se aproximam e também formam ligações com o sal (MULLINS, 1999).

A gênese desses solos não está totalmente esclarecida e alguns estudos indicam processos físicos e químicos associados (JACOMINE, 2001). Assim, a mineralogia essencialmente caulínica e a sua forma placóide podem favorecer o ajuste compacto entre as partículas de argila, indicando que a coesão é física e se desfaz rapidamente com o aumento da umidade do solo (MOREAU et al., 2006). No entanto, Giarola et al. (2009) constataram que a caulinita que ocorre nos solos coesos dos Tabuleiros Costeiros não possui o grau de ordenamento (cristalinidade) necessário para que ocorra esse ajuste "face-a-face". Esse processo pode estar associado também à presença de compostos amorfs de baixa cristalinidade, à base de Si e Al, por exemplo (VIEIRA et al., 2012).

O caráter coeso tem sido avaliado primeiramente à campo, onde o pedólogo faz o seu reconhecimento rápido, no entanto, há o problema da subjetividade e a falta de métricas para a caracterização, por isso, pesquisas vêm sendo feitas no sentido de sanar essa dúvida com

métodos quantitativos medidos até então na mesoescala, ou seja, na unidade de volume de solo entre 100 a 300 cm<sup>3</sup> e assim, complementar e revelar mais aspectos sobre sua gênese com uma visão mais global do fenômeno. Existem diversos trabalhos na literatura com o intuito de identificá-lo com parâmetros quantitativos, porém ainda há dificuldade em distinguir solos com e sem caráter coeso, principalmente em condições de campo, onde é necessária a observação de uma trincheira com solo seco para examinar a consistência dura a extremamente dura (SANTOS et al., 2018).

Processos estruturais dos solos, como a expressão das forças de adesão e coesão, ou seja, interações entre partículas (REICHERT et al., 2010), possuem origem na microescala (7-10 cm<sup>3</sup>) (HOLTHUSEN et al., 2012; MARKGRAF; HORN, 2009). Um método útil para analisar a microescala é por meio reometria, porque com ela é possível avaliar o comportamento de um material sob tensões dinâmicas e diferenciar diferentes tipos de ligações entre partículas no solo. A reometria pode ser utilizada para estudo de coesão em solos, pois ela consegue avaliar diferentes formas de ligações (elásticas, plásticas ou reversíveis e irreversíveis), e tem sido usada para avaliar a reação do solo ao estresse externo, quantificando a resistência estrutural do solo à deformação (MARKGRAF; HORN; PETH, 2006).

Na microescala, a resistência estrutural está relacionada com às propriedades físico-químicas, incluindo arranjo e coesão de partículas (MARKGRAF; HORN, 2009), e essas dependem da mineralogia, textura, teor de matéria orgânica, conteúdo de água, concentração e tipo de cátions, atividade biológica e ciclos de umedecimento e secagem (MARKGRAF et al., 2012). Atualmente, o Teste de Varredura de Amplitude (TVA) é o mais comumente utilizado para análises em solos, o qual avalia a estabilidade da microestrutura (HOLTHUSEN; BATISTÃO; REICHERT, 2020; MARKGRAF; HORN, 2006).

A reometria então, permite, que a deformação seja relacionada com diferentes fatores e processos que ocorrem no solo, porém não há menções de trabalhos realizados que avaliam o comportamento microestrutural de solos que apresentam coesão. Desse modo, foram consideradas as seguintes hipóteses: 1) o caráter coeso pode ser detectado por meio das propriedades reológicas e, 2) propriedades de tensão possuem maior correlação do que propriedades de deformação. Assim, o objetivo desta pesquisa foi avaliar se as propriedades reológicas, obtidos em testes de varredura de amplitude sob condições de cisalhamento oscilatório, são capazes de detectar o caráter coeso e assim, contribuir para melhorar o entendimento da coesividade nesses solos.

## **2. ESTADO DA ARTE**

Solos com horizontes coesos apresentam algumas peculiaridades, estão presentes em ampla distribuição geográfica e possuem limitações para a produção agrícola. Nas próximas seções serão apresentados conceitos envolvendo a coesão desses solos, bem como o seu comportamento mecânico e a interação com a umidade. Também serão abordados fundamentos teóricos da reometria como ferramenta nos estudos de avaliação microestrutural do solo sob tensões de cisalhamento transientes em microescala.

### **2.1 SOLOS COESOS**

#### **2.1.1 Propriedades de solos coesos**

O caráter coeso é um atributo diagnóstico utilizado para distinguir solos com horizontes pedogenéticos subsuperficiais adensados, que conferem consistência muito dura a extremamente dura quando secos e friável quando úmidos (EMBRAPA, 2018). Essa contrastante condição entre os graus de consistência do solo seco e úmido pode ser encontrada em quase toda a faixa costeira do Brasil (GIAROLA et al., 2001). Esse tipo de comportamento foi incorporado ao Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SiBCS) para classificar solos até o terceiro nível categórico (EMBRAPA, 2018).

O caráter coeso é genético e comum em solos de textura média, argilosa ou muito argilosa, sendo encontrado principalmente em Latossolos e Argissolos Amarelos, em horizontes transicionais AB e/ou BA, e/ou parte do Bw ou Bt, entre 30 cm e 70 cm da superfície do solo, podendo atingir até profundidades maiores (JACOMINE, 2001), diferentemente de camadas compactadas, que ocorrem devido a ações antrópicas, causadas pelo uso e manejo do solo (MANTOVANI, 1987). Os horizontes com caráter coeso apresentam restrições nas propriedades físicas e químicas do solo, na disponibilidade de água para as plantas e na distribuição do sistema radicular (CINTRA, 2001). Segundo Giarola et al. (2003), os solos com comportamento coeso apresentam elevada resistência à penetração, e essa resistência dificulta o preparo e desenvolvimento de culturas. Suas principais limitações ocorrem no período seco, onde o efeito do horizonte coeso se destaca (RIBEIRO, 2001), resultando em aumento da densidade do solo, resistência à penetração, resistência tênsil (DA SILVA ARAÚJO et al.,



2018) e redução da porosidade total (LIMA NETO et al., 2010; MOTA et al., 2018), os quais têm sido utilizados como formas de identificação do caráter coeso (GIAROLA et al., 2003). Ocorrem também restrições químicas como a alta saturação por alumínio, alta acidez ativa e trocável, baixa capacidade de troca de cátions (CTC), dificultando o desenvolvimento radicular e a produtividade das culturas agrícolas (REZENDE, 2000).

A densidade do solo de horizontes coesos apresenta maiores valores em relação aos demais horizontes do perfil, variando na faixa de 1,5 a 1,8 g cm<sup>-3</sup> (ARAÚJO FILHO; CARVALHO; SILVA, 2001). A resistência do solo à penetração em horizontes com caráter coeso também é bastante significativa em relação à horizontes não coesos, podendo chegar a mais de 25 MPa, considerando a faixa de umidade avaliada (0,1 a 0,15 cm<sup>3</sup> cm<sup>-3</sup>), o que compromete o desenvolvimento pleno do sistema radicular das plantas (LIMA, 2004). Essa elevada resistência à penetração está associada com uma estrutura desorganizada que assume aspecto maciço com diferentes graus de coesão (JACOMINE, 2001). Para Mullins (1999), valores de resistência à penetração maiores que 3 MPa, já são considerados suficientes para dificultar ou impedir o crescimento das raízes em maiores profundidades, resultando assim em raízes mais superficiais e mais expostas às intempéries do clima. Os valores de resistência tênsil podem chegar a cerca de 50 kPa para os horizontes coesos (DA SILVA, 2019). Quanto à porosidade total desses horizontes, autores relatam a importância dos poros no adensamento, que são comprimidos, causando redução total dos poros, afetando predominantemente a disponibilidade hídrica nesses solos (MUNKHOLM; SCHJONNING; KAY, 2002). Menezes et al. (2018) ao avaliar a funcionalidade dos poros em horizontes Bt coesos e não coesos, incluindo a avaliação funcional de poros dispostos vertical e horizontalmente em solos dos Tabuleiros Costeiros do estado do Ceará, Brasil, também concluíram que poros em horizontes Bt com caráter coesivo são menos funcionais do que em horizontes Bt sem caráter coeso, com menor permeabilidade ao ar, comprimento e conexão entre eles.

A gênese desses solos ainda não está totalmente esclarecida, apesar das pesquisas de longa data, e alguns estudos indicam processos físicos e químicos associados (JACOMINE, 2001). A mineralogia essencialmente caulínica e a sua forma placóide podem favorecer o ajuste compacto entre as partículas de argila, indicando que a coesão é física e se desfaz com o aumento da umidade do solo (MOREAU et al., 2006). Corrêa et al. (2008) e Bezerra et al. (2015) também propuseram que a gênese dos horizontes coesos está ligada a perda do plasma argiloso na camada superficial para as subjacentes, processo conhecido como argiluviação.

Entretanto, outros autores dão ênfase à presença de silício e alumínio associados a compostos amorfos de baixa cristalinidade, para a manifestação de coesão como atributo diagnóstico (VIEIRA et al., 2012; MOTA et al., 2021). No período seco, a sílica solúvel (ácido silícico –  $H_4SiO_4$ ) é precipitada e os compostos amorfos de baixa cristalinidade (óxidos de Fe e Al), por hidrólise, são solubilizados no período úmido e a fase solúvel precipita no período seco, entupindo poros e revestindo as partículas sólidas do solo com cutâns de sílica (CORNELIS et al., 2011). No entanto, Moreau et al. (2006) avaliaram, no estado da Bahia, solos com horizontes coesos não constataram a influência desses compostos mal cristalizados. Por outro lado, estudos feitos por Vieira et al. (2012), no Ceará, constataram que a elevada resistência à penetração de horizontes coesos pode sim estar ligada à presença dos compostos mal cristalizados que agem no processo de cimentação.

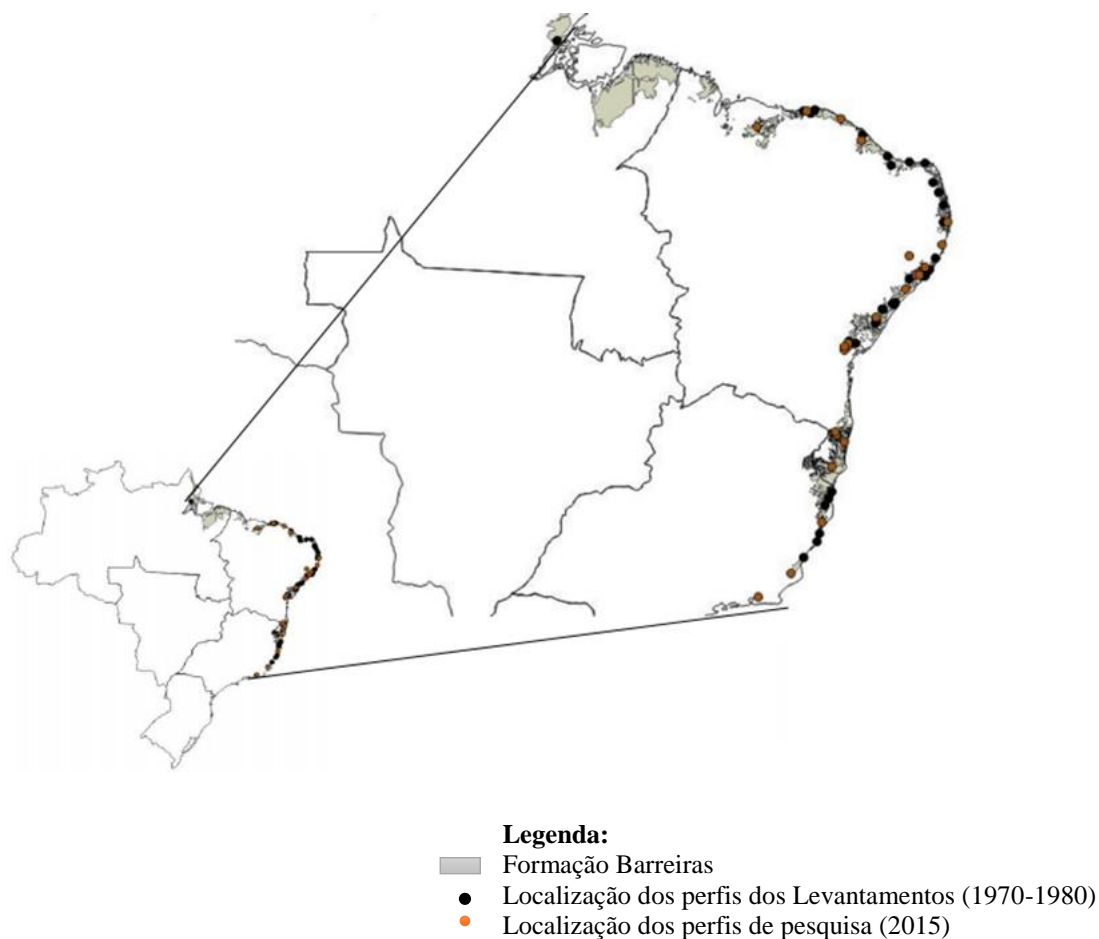
Apesar de existir diversos trabalhos com o intuito de identificá-lo, ainda há dificuldade em distinguir solos com e sem caráter coeso, principalmente em condições de campo, onde é necessária a observação de uma trincheira com solo seco para examinar a consistência dura a extremamente dura (SANTOS et al., 2018).

Podemos perceber que existem vários processos e fatores associados na formação de solos com horizontes coesos, porém ainda são pouco conclusivos. Influências do relevo e da granulometria dos solos derivados de geologias distintas podem também dificultar o esclarecimento de sua origem. Assim, há necessidade de mais informações sobre solos com caráter coeso para a plena compreensão de sua gênese, bem como um melhor entendimento dos processos entre partículas que os envolvem.

### **2.1.2 Distribuição espacial**

No Brasil, a ocorrência de solos coesos ou solos com horizontes coesos está basicamente associada com os depósitos sedimentares da Formação Barreiras, os quais originaram-se do período Terciário, e compõem a atual unidade geomorfológica Tabuleiros Costeiros (CINTRA et al., 2009) (Figura 1). Os solos dos Tabuleiros Costeiros estão situados na zona úmida costeira do litoral, indo do Estado do Amapá até o Rio de Janeiro, compreendendo, assim, as regiões Norte, Nordeste e Sudeste e ocupam cerca de 20 milhões de hectares (SILVA et al., 2012; VIEIRA et al., 2012). É importante ressaltar que o clima sob essa formação possui estações secas e úmidas bem definidas (GIAROLA; SILVA, 2002).

Figura 1 - Mapa representativo da área da Formação Barreiras e localização dos perfis analisados em pesquisas.



Fonte: Araújo (2015).

Diversos processos estão associados na evolução dos solos dos Tabuleiros Costeiros, principalmente no que se refere aos Latossolos, pois são considerados os primeiros solos dessa cobertura pedológica que apresentam o caráter coeso (RIBEIRO, 2001). Em se tratando da mineralogia desses solos, apresentam a caulinita como principal mineral da fração argila e quartzo na fração areia (REZENDE, 2000).

Esse comportamento peculiar do solo não está restrito somente ao Brasil, pois em outras partes do mundo também há registros. Na Austrália foi identificado, mapeado e denominado “hardsetting” (NORTHCOTE et al., 1975). Hardsetting é o termo utilizado para caracterizar

solos que são afetados por salinidade, sendo muito frágeis ao umedecer (efeito dispersante do sódio) e muito duros ao secar (quando as partículas se aproximam e também formam ligações com o sal) (MULLINS, 1999). Solos com comportamento *hardsetting* são também comuns em climas que apresentam alternância entre períodos secos e úmidos sendo observados em horizontes superficiais e subsuperficiais (GIAROLA et al., 2001). A textura desses solos varia de areia a argilo-arenosa; quanto à mineralogia, é composta por caulinitas ou micas hidratadas (ílitas) na fração argila (NORWISH; PICKERING, 1983). Por fim, são solos que apresentam baixos teores de matéria orgânica (< 2%) (MULLINS et al., 1990).

Dentre as várias classes de solo que ocorrem nos Tabuleiros Costeiros as que mais se destacam são principalmente Latossolos e Argissolos Amarelos (JACOMINE, 1996). No entanto, também podem ser encontradas outras classes de solos com menor representatividade, a exemplo de Argissolos Vermelho-Amarelos e Acinzentados; Latossolos Vermelho-Amarelos; Neossolos Quartzarênicos; Plintossolos e Espodossolos (JACOMINE, 1996; VIEIRA et al., 2012).

Nesse sentido, vale ressaltar também que a ocorrência de horizontes coesos em outra formação geológica do que a Formação Barreiras não é descartada e ainda está em processo de estudo. De acordo com Corrêa et al. (2008), solos com esse comportamento podem ser encontrados no sul da Bahia, norte do Espírito Santo e nordeste de Minas Gerais, não possuindo relação com a Formação Barreiras.

Atualmente, pesquisas sobre solos com horizontes coesos vêm ganhando força, principalmente no que se refere à diversificação de análises, o que evidencia a busca por informações que possam complementar e revelar mais aspectos sobre sua gênese, com uma visão mais global do fenômeno (ARAÚJO, 2015).

### **2.1.3 Mecânica dos solos coesos e interação com a umidade**

A coesão do ponto de vista físico, ocorre devido à atração eletrostática entre as superfícies de partículas que estão muito próximas, ou são decorrentes do efeito de agentes cimentantes (óxidos e argila) (MITCHELL, 1976; KIMPE; LAVERDIERE; DEJOU, 1983). Já a coesão aparente, tratada nessa sessão como sendo aquela obtida por meio dos testes de cisalhamento, ocorre pelo resultado da tensão superficial da água nos capilares do solo, que

tende a aproximar as partículas entre si, ou seja, está relacionada ao potencial matricial e à pressão de água dos poros (FREDLUND; RAHARDJO, 1993).

As propriedades mecânicas do solo ajudam compreender o seu comportamento devido à aplicação de forças externas, que são geradas no solo através do tráfego de máquinas e implementos, pisoteio animal, crescimento de raízes e ciclos de umedecimento e secagem (PÉRTILE, 2015). A suscetibilidade à alteração de volume define o comportamento mecânico do solo, influenciado por seu estado de tensão de água, sendo que este depende da distribuição e dos tipos de ligações entre as partículas, da distribuição de poros e de propriedades hidráulicas (REICHERT et al., 2010). Essa aplicação de forças externas, resulta em uma resistência do solo que pode ser definida quantitativamente como a máxima tensão que um solo pode suportar sem apresentar falha (ruptura, fragmentação ou fluxo) (HILLEL, 1998). A redução no espaço poroso, redução dos fluxos de gases e água no solo são algumas consequências da deformação do solo sobre variações de volume total (HORN, 2003). Esses conceitos são utilizados no comportamento mecânico do solo submetidos a testes de compressibilidade e esses projetam parâmetros de resistência e estimam a possível ocorrência da degradação estrutural (DIAS JUNIOR; PIERCE, 1996) em mesoescala (PÉRTILE, 2015).

A resistência do solo ao cisalhamento é determinada pelas características coesivas e friccionais entre as partículas do solo (PINTO, 2000) e, conforme McCormack e Wilding (1979), ela também é influenciada pela forma e distribuição de partículas do solo, estrutura, densidade, teor de água, tipo de argilomineral, tipo e quantidade de cátions presentes e forças de repulsão e atração entre partículas. Nos solos de textura arenosa, a resistência ao cisalhamento depende na maior parte do atrito entre as partículas, enquanto para solos argilosos a coesão do solo e a intensidade da agregação estrutural também são determinantes (LEBERT; HORN, 1991).

Alguns trabalhos vêm sendo estudados com o intuito de estudar a resistência ao cisalhamento e a coesão do solo em solos agrícolas. Silva e Carvalho (2007) avaliaram três horizontes A (não coeso), BA (coeso) e Bw2 (não coeso) de um Latossolo Amarelo coeso típico, localizado no município de São Miguel dos Campos (AL) e determinaram as características de cisalhamento do solo (coesão, ângulo de atrito interno) e o teor de água do solo (0,07, 0,12, 0,19 e 0,24 kg kg<sup>-1</sup>). Esses autores verificaram que nos horizontes coesos, o aumento da coesão (ou resistência ao cisalhamento) com a redução do teor de água foi 552% maior do que nos demais horizontes. Conforme Fredlund e Rahardjo (1993), isso acontece

devido à redução da distância entre as partículas, fazendo com que ocorra aumento da atração entre elas. À medida que a umidade vai diminuindo, aumenta a resistência ao cisalhamento, tornando o solo mais resistente; conseqüentemente, quando o teor de água aumenta, a sucção do solo diminui e a resistência também (HILLEL, 1980, 1998).

## 2.2 REOLOGIA DO SOLO

Reologia é a ciência que estuda o comportamento de fluxo e deformação dos materiais que são submetidos a tensões externas, sendo diretamente relacionada com sua estrutura interna (por exemplo, organização e orientação de partículas), que não pode ser descrita pela mecânica clássica dos fluidos ou elasticidade (MEZGER, 2014). A reometria é a técnica experimental utilizada para medir as propriedades reológicas e desenvolvimento dos equipamentos (reômetros) que determinam as relações tensão-deformação de diversos materiais (MEZGER, 2014).

O estudo desse comportamento de fluxo e deformação dos materiais sob tensões pode ser representado por duas situações distintas e extremas: fluxo de fluidos viscosos ideais, que obedecem a lei de Newton, e a deformação de sólidos elásticos ideais, descrita pela lei de Hook (MEZGER, 2014). Entretanto, o comportamento de materiais reais, como o solo, não se caracteriza como um sistema ideal e sim como um material viscoelástico, pois exhibe comportamento tanto elástico como viscoso, e a proporção destes depende do grau, tipo e duração da tensão aplicada, como também das propriedades físico-químicas específicas do material (MARKGRAF, 2006; BAUMGARTEM, 2013; MEZGER, 2014).

A reometria, nos últimos anos, tem avançado consideravelmente na área físico-química e mecânica dos solos, investigando os efeitos do conteúdo de água, da textura e mineralogia, da concentração de sais, da solução do solo e do conteúdo de matéria orgânica (HOLTHUSEN et al., 2020; HOLTHUSEN; BATISTÃO; REICHERT, 2020; HOLTHUSEN et al., 2019), possuindo a capacidade de determinar claramente o comportamento do solo causado por mecanismos que atuam em escala de partículas (MARKGRAF et al., 2006).

O comportamento mecânico do solo em microescala está relacionado às propriedades físico-químicas, arranjo das partículas, fenômenos de contato e forças de partículas (MARKGRAF; HORN, 2009), contribuindo para um maior entendimento dos processos de interação nas escalas partícula-partícula e partícula-líquido, mecanismos e força de agregação

e estabilidade microestrutural de diferentes solos (MARKGRAF; HORN; PETH, 2006). A seguir, são descritos os princípios fundamentais da reometria do solo e como os testes reológicos são feitos e interpretados.

### 2.2.1 Teste de varredura de amplitude e propriedades reológicas

Reômetros são equipamentos direcionados à avaliação das propriedades reológicas, sendo possível realizar diferentes tipos de testes, sendo esses rotacionais ou oscilatórios e, para materiais viscoelásticos, como o solo, testes oscilatórios têm sido utilizados (MEZGER, 2014).

Dentre os testes oscilatórios, o teste de varredura de amplitude (TVA) com deformação controlada é o mais indicado e utilizado para investigações de solos (PÉRTILE, 2015). O princípio desse teste consiste na aplicação de tensão (ou deformação), por meio da aplicação de uma velocidade de oscilação e da medida de resistência do material solicitado. A amostra de solo é alocada entre duas placas paralelas, onde a placa inferior é fixa enquanto a placa superior é movimentada alternadamente para a direita e para a esquerda em um curso senoidal, aplicando uma deformação na amostra (solo) e resultando em uma tensão de cisalhamento (Figura 2) (MEZGER, 2014). O espaço entre a placa superior e a inferior do equipamento é denominado *gap* ( $h$ ). A tensão de cisalhamento  $\tau$  (Pa) é uma propriedade do solo e é igual a tensão que a placa superior usa para causar a deformação definida (HOLTHUSEN et al., 2010; MEZGER, 2014).

A tensão é calculada pelo quociente entre o torque requerido para gerar a deformação na superfície de cisalhamento, como explicado pela equação 1 (HOLTHUSEN; PETH; HORN, 2010; MEZGER, 2014; PÉRTILE et al., 2018).

$$T = 2 M / \pi r^3 \quad (1)$$

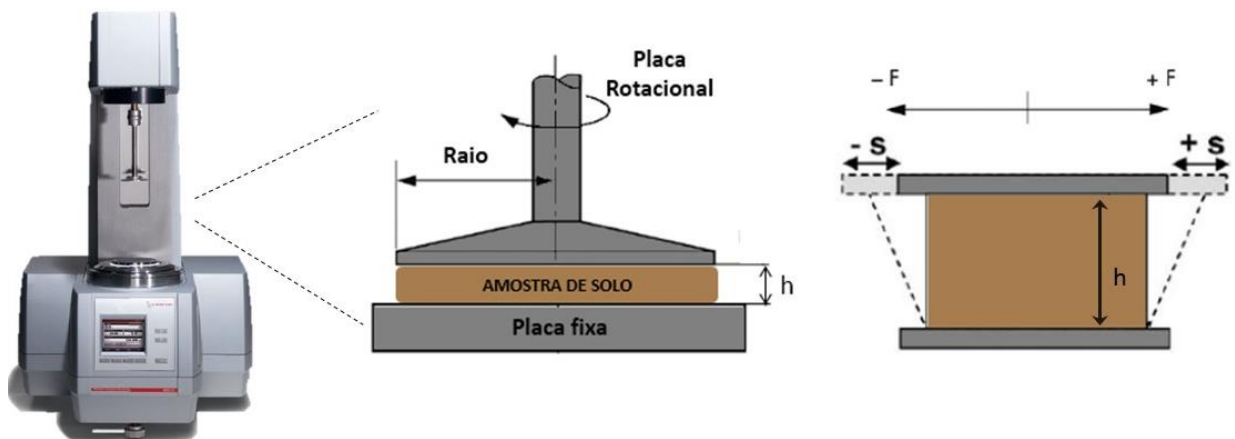
Em que  $\tau$  é a tensão de cisalhamento (%),  $M$  é o torque (Pa), e  $r$  é o raio da placa superior (m). E a deformação de cisalhamento ( $\gamma$ ) (% ou 1), pode ser definida pela equação 2.

$$\Gamma = s / h * 100 \quad (2)$$

Em que  $s$  é a deflexão (mm),  $h$  é a distância entre as placas (mm) (MARKGRAF; HORN; PETH, 2006).

Esse teste estuda os efeitos estruturais sob tensões cisalhantes oscilatórias em microescala, simulando fenômenos naturais ou condições de tráfego de máquinas e animais no solo (MARKGRAF, 2006; MARKGRAF; HORN; PETH, 2012; HOLTHUSEN et al., 2010; PÉRTILE et al., 2018). O teste é caracterizado por uma frequência constante e uma amplitude de deformação variável (MARKGRAF; HORN; PETH, 2006).

Figura 2 – Testes oscilatórios realizados em um reômetro modular compacto, modelo de placas paralelas.

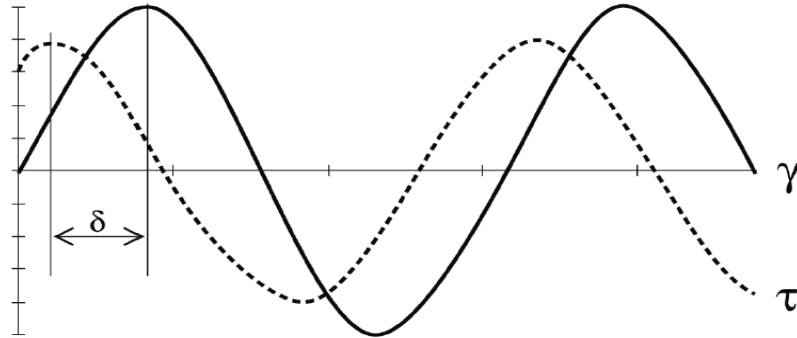


Fonte: Adaptado de Mezger (2014) e Holthusen et al. (2010).

A relação entre a deformação controlada e a tensão resultante é característica de cada material (HOLTHUSEN; PETH; HORN, 2010; PÉRTILE et al., 2018). Para materiais viscoelásticos, como o solo, ocorre um atraso temporal da curva de tensão em relação a curva de deformação, caracterizado pelo ângulo de deslocamento de fase  $\delta$ , ficando em um intervalo de  $0^\circ < \delta < 90^\circ$  (Figura 3) (MEZGER, 2014; PÉRTILE et al., 2018).



Figura 3 – Ângulo de deslocamento de fase ( $\delta$ ) entre as curvas de deformação (linha contínua) e tensão resultante (linha pontilhada) de materiais viscoelásticos em função do tempo.



Fonte: Mezger (2014) e Pértile (2015).

Para a determinação das propriedades reológicas de materiais viscoelásticos em testes oscilatórios é necessário fazer algumas adaptações. O módulo de cisalhamento  $G$  (Pa) constante, obtido em condições de tensões estáticas para corpos elásticos (lei de Hook), é transformado em um módulo de cisalhamento complexo ( $G^*$ ) quando aplicado em tensões oscilatórias, representando os componentes elástico e viscoso, dado pelos módulos de armazenamento ( $G'$ ) e perda ( $G''$ ), respectivamente (equação 3) (HOLTHUSEN; PETH; HORN, 2010; ALVES, 2019). Os módulos  $G'$  e  $G''$  dependem diretamente da deformação, tensão de cisalhamento e do ângulo de deslocamento de fase, equações 4 e 5.

$$G^* = [(G')^2 + (G'')^2]^{1/2} \quad (3)$$

$$G' = G^* \cos \delta \quad (4)$$

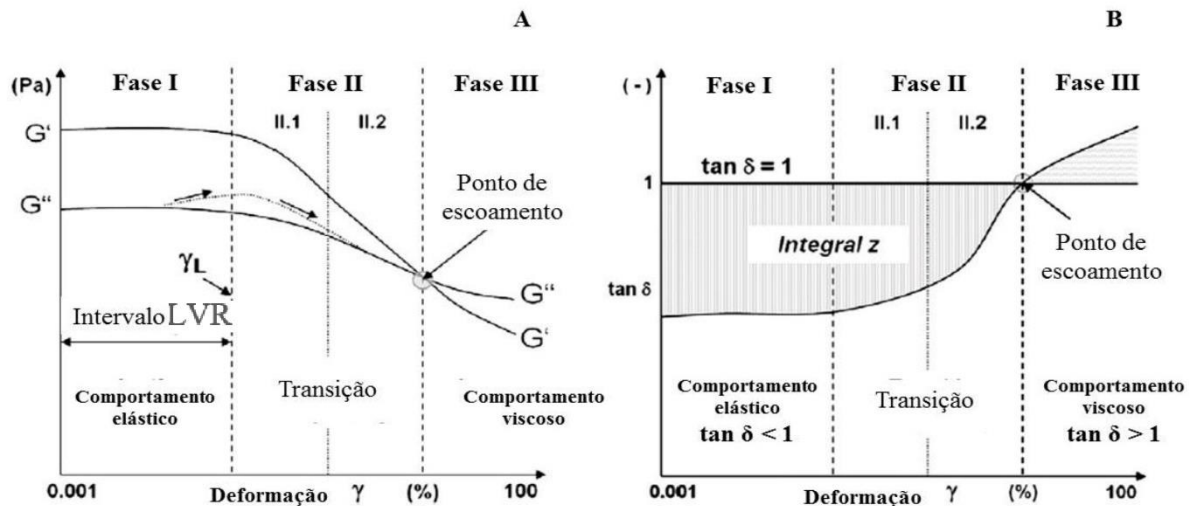
$$G'' = G^* \sin \delta \quad (5)$$

A razão entre  $G''$  e  $G'$  resulta na tangente do ângulo de deslocamento de fase (equação 6) ( $\tan \delta$ ) e indica a proporção entre comportamento elástico e viscoso, ou seja, quando  $\tan \delta < 1$  ( $G' > G''$ ) predomina o componente elástico e quando  $\tan \delta > 1$  ( $G' < G''$ ) o componente viscoso é predominante (MARKGRAF, 2006; KELLER et al., 2013).

$$\tan \delta = G''/G' \quad (6)$$

Nos testes de varredura de amplitude são identificadas três fases (Figura 4<sup>a</sup>) e o progresso de cada fase vai depender das propriedades físico-químicas do material (MARKGRAF, 2006). Na fase I, o solo apresenta comportamento elástico, determinado pelo intervalo viscoelástico linear (LVR) no qual  $G'$  se mantém constante e a deformação no final do LVR é calculada, porém enquanto esse intervalo não for ultrapassado a deformação é totalmente reversível (HOLTHUSEN; PETH; HORN, 2010). A fase II, ocorre a transição entre deformações elásticas e plásticas, onde há um decréscimo de  $G'$ , as partículas são reorientadas e a estabilidade microestrutural decresce (ALVES, 2019). No final dessa fase, ocorre o ponto de escoamento, que indica colapso estrutural e os valores de  $G'$  e  $G''$  se igualam (PÉRTILE et al., 2018). E a fase III caracteriza o estado final de escoamento, as deformações são irreversíveis e o caráter viscoso predomina sobre o elástico ( $G' < G''$ ) (MARKGRAF et al., 2011).

Figura 4 – A) Resultados do teste de varredura de amplitude (TVA) com deformação controlada e B) propriedades reológicas calculadas a partir dos dados da curva obtida no TVA.



Fonte: Adaptado de Markgraf et al. (2011).

O fator de perda ( $\tan \delta$ ) não possui dimensão e indica a fração de energia que é perdida na deformação (PÉRTILE et al., 2018; ALVES, 2019) (Figura 4B). Na sequência, outra

propriedade reológica pode ser calculada para comparar diferentes curvas, a integral  $z$ , que é obtida pela área delimitada por  $\tan \delta$ , que se estende do ponto intersecção com o eixo  $y$  ao ponto onde  $\tan \delta = 1$ , de forma que quanto maior é o seu valor, maior é a rigidez do material (BAUMGARTEN, 2013; MARKGRAF et al., 2011; PÉRTILE et al., 2018).

Os parâmetros no LVR e no YP indicam características adequadas do comportamento reológico em um TVA, já a  $I_z$ , medida geral de viscoelasticidade, pode apresentar resultados incoerentes, com valores maiores, especialmente em solos que apresentam dilatância/dilatação (HOLTHUSEN et al., 2019). Esses solos apresentam na transição da deformação totalmente recuperável (LVR) para a quebra estrutural e início do escoamento viscoso (YP) um ligeiro aumento na relação  $G''/G'$  (fator de perda,  $\tan \delta$ ), ou seja, um aumento em elasticidade ( $G'$ ) relativamente à plasticidade ( $G''$ ) (MARKGRAF; HORN, 2007; MARKGRAF et al., 2006).

A dilatação ocorre devido à reorientação ou alinhamento de partículas de solo em substratos arenosos e siltosos, solos argilosos caulíníficos e solos com presença de pseudoareias (homogeneizados) devido ao maior ângulo de atrito interno e rotação restrita da areia e agregados semelhantes a areia (MARKGRAF; HORN, 2006, 2007; MARKGRAF et al., 2006; PÉRTILE et al., 2018).

Outra propriedade reológica calculada é a tensão máxima de cisalhamento ( $\tau_{\max}$ ), que caracteriza a máxima resistência de uma amostra ao movimento oscilatório (HOLTHUSEN et al., 2010; ALVES, 2019). A  $\tau_{\max}$  é muito impactada pela força normal (força vertical) durante a realização do teste de varredura da amplitude, e aumenta com o incremento da força normal (HOLTHUSEN et al., 2017; ALVES, 2019).

Resumidamente ao exposto acima, a faixa viscoelástica linear (LVR) é o intervalo de deformação totalmente reversível, começando com a deformação mais baixa e sendo limitado pelo desvio de  $G'$  em mais de 5% de uma curva linear (HOLTHUSEN et al., 2012). O final do LVR é demarcado pelo limite de tensão ( $\gamma_{LVR}$ ). Deformações maiores que  $\gamma_{LVR}$  promovem modificações irreversíveis e cumulativas na microestrutura do solo, embora inicialmente com predominância do comportamento elástico, resultando em uma fase de transição de  $G'$  e  $G''$  decrescentes. Esta fase termina com o crossover (ou ponto de escoamento, YP), onde  $G' = G''$ , denotado pela deformação ( $\gamma_{YP}$ ). Além dos valores de deformação, também se determina a tensão de cisalhamento no final a faixa LVR e no YP. A integral  $z$  é calculada pela área chanfrada entre  $\delta$  durante o teste de varredura de amplitude até o YP (onde  $\tan \delta = 1$ ) e uma linha horizontal de  $\tan \delta = 1$  (Figura 4B). Quanto maior for o seu valor, maior será o

comportamento elástico do solo e maior é a sua rigidez microestrutural (BAUMGARTEN et al., 2013). A  $\tau_{\max}$  caracteriza a máxima resistência interna que a amostra de solo oferece para resistir à ruptura de sua microestrutura (HOLTHUSEN et al., 2012).

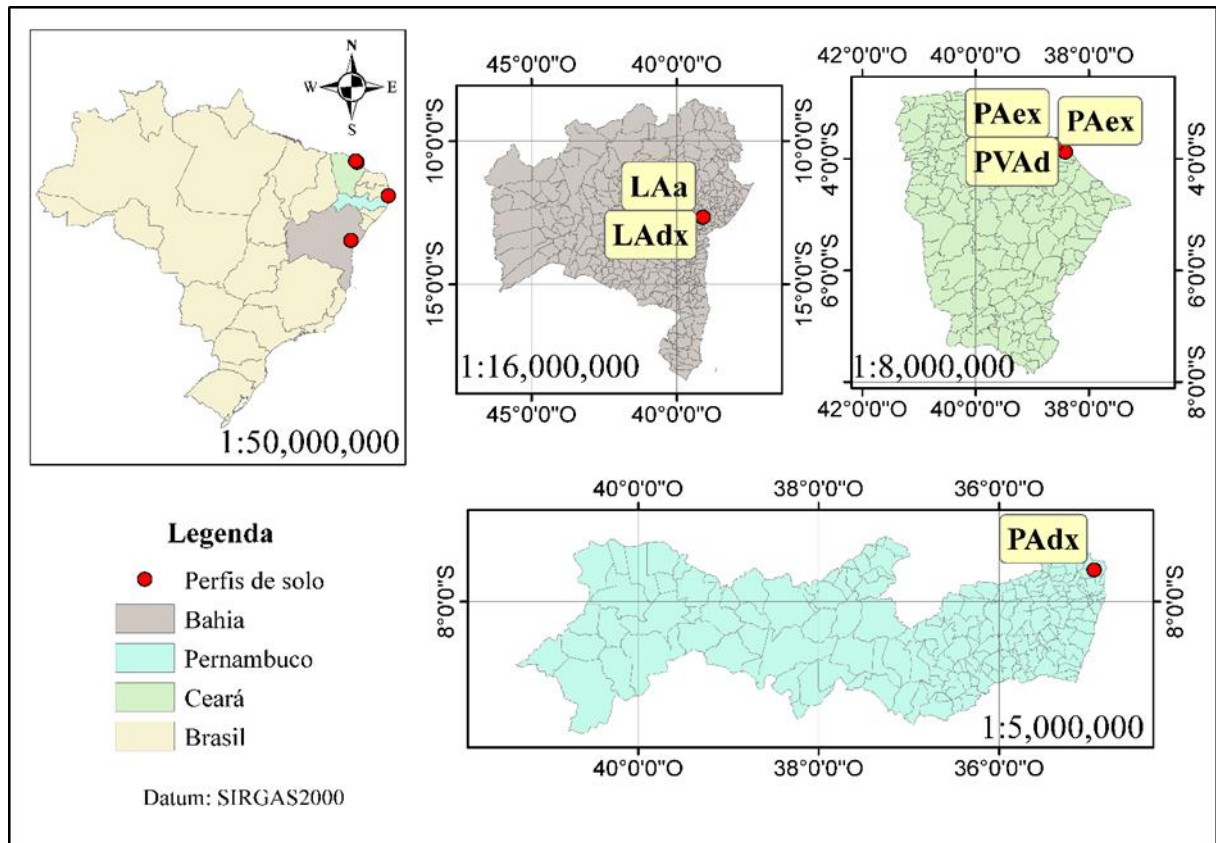
Esse conjunto de propriedades reológicas fornece informações muito relevantes sobre a resistência dos materiais em microescala (MARKGRAF et al., 2011). Sendo assim, possibilita gerar informações no comportamento mecânico dos solos, incluindo efeitos de textura, concentração de sais (cátions), mineralogia, conteúdos de água e forças entre partículas (MARKGRAF, 2006; BAUMGARTEN, 2013; PÉRTILE et al., 2016).

### **3. MATERIAL E MÉTODOS**

#### **3.1 CARACTERIZAÇÃO DO LOCAL DO ESTUDO E DOS SOLOS**

Os solos avaliados neste trabalho pertencem às classes Latossolos e Argissolos, amostrados nos estados do Ceará, Pernambuco e Bahia (Figura 5), cujo clima, segundo a classificação de Köppen, tem padrão Aw, tropical com inverno seco (FRANCISCO et al., 2015). As áreas foram escolhidas para abranger classes distintas de solos, desde que o caráter coeso já houvesse sido diagnosticado em algum de seus horizontes. Foram selecionados os horizontes Bt, Bw, AB e BA com e sem caráter coeso, sendo coletados em três posições destes horizontes (topo, meio e base), devido a diferenças significativas (entre as posições) encontradas em estudos anteriores, em geral diminuindo do topo para a base (ARAÚJO et al., 2018).

Figura 5 – Localização dos pontos de coleta dos solos.



Fonte: Da Silva, 2019.

As amostras avaliadas foram coletadas nos municípios de Aquiraz – Ceará, sendo um Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico típico – PVAd (UTM 24 S 565155.1 9570780.0) e um Argissolo Amarelo Eutrocoeso abrupto – Paex abrupto (UTM 24 S 564998.0 9570840.0); em Fortaleza-Ceará, um Argissolo Amarelo Eutrocoeso típico – Paex típico (UTM 24 S 547034.0 9586291.0); em Goiana – Pernambuco, sendo um Argissolo Amarelo Distrocoeso epirredóxico – PAdx (UTM 25 S 285384 9154451); e em Cruz das Almas – Bahia, sendo um Latossolo Amarelo Alumínico argissólico – Laa (UTM 24 S 488544 8599669) e um Latossolo Amarelo Distrocoeso típico – LAdx (UTM 24 S 490401 8600977). As áreas escolhidas estão localizadas em vários ambientes e possuem usos distintos. Em Aquiraz (CE) – são solos em área privada, em que são cultivados mangueira e coqueiro (agricultura de subsistência, sem emprego de tecnologias); em Fortaleza (CE) – o solo está localizado no

Campus do Pici, da Universidade Federal do Ceará (área de pousio); em Goiana (PE) – está a área da estação experimental de instituição de pesquisa do Governo do Estado de Pernambuco e em Cruz das Almas (BA) – o solo está em ambiente sob mata nativa.

Nesse sentido, para aprofundamento do estudo, também foram cedidas por Da Silva (2019), a distribuição das frações areia, silte e argila, bem como valores de densidade do solo (Ds), silício (Si), alumínio (Al), ferro (Fe), carbono orgânico (C.O.) e argila natural (Arg. nat.), cujos valores estão na tabela 1. Na tabela 2 estão apresentados os valores da resistência tênsil (RT) das amostras de solo do estudo realizado. O preparo detalhado das amostras, bem como a condução das análises, está descrito em Da Silva (2019).

Tabela 1 – Distribuição das frações areia, silte, argila, valores da densidade dos solos e alguns atributos químicos, dos solos Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico típico (PVAd), Argissolo Amarelo Eutrocoeso abruptico (PAex abruptico), Argissolo Amarelo Eutrocoeso típico (PAex típico), Argissolo Amarelo Distrocoeso epirodóxico (PAdx), Latossolo Amarelo Alumínico argissólico (LAa) e Latossolo Amarelo Distrocoeso típico (LAdx).

Solo			Si	Al	Fe	C.O.	Ds	Arg.nat.	Areia	Argila	Silte
			(dag kg <sup>-1</sup> )			(g kg <sup>-1</sup> )	(g cm <sup>-3</sup> )	(g kg <sup>-1</sup> )			
PVAd	Coeso	Topo	1,1	6,8	0,6	1,3	1,8	279,6	646,4	294,8	58,8
		Meio	1,1	4,1	0,4	0,9	1,7	69,4	633,6	304,8	61,6
		Base	1,1	2,3	0,4	0,9	1,7	69,6	618,0	320,6	61,4
	Não coeso	Topo	1,0	1,3	0,4	1,6	1,6	78,2	635,2	315,8	49,0
		Meio	0,9	0,7	0,6	1,2	1,6	71,2	575,4	365,4	59,2
		Base	0,6	0,5	0,4	0,9	1,6	80,0	666,4	257,8	75,8
PAex abruptico	Coeso	Topo	0,7	3,4	0,7	2,6	1,7	95,2	708,8	262,6	28,6
		Meio	0,7	1,7	0,8	2,3	1,7	84,2	728,4	230,0	41,6
		Base	0,6	0,7	0,6	2,1	1,5	143,4	743,4	219,2	37,4
	Não coeso	Topo	0,3	0,3	0,6	2,5	1,7	91,8	766,2	180,4	53,4
		Meio	0,2	0,2	0,6	2,2	1,7	83,6	749,6	172,0	78,4
		Base	0,2	0,2	0,5	1,9	1,6	82,4	732,0	208,4	59,6
PAex típico	Coeso	Topo	1,0	3,9	0,2	3,1	1,6	138,0	570,6	345,4	84,0
		Meio	0,8	2,0	0,2	2,8	1,7	101,0	588,6	318,8	92,6
		Base	0,6	0,8	0,2	2,7	1,6	107,8	586,6	316,2	97,2
	Não coeso	Topo	0,5	0,3	0,3	2,5	1,7	128,4	582,6	345,8	71,6

		Meio	0,3	0,1	0,2	2,4	1,7	100,2	579,4	315,4	105,2
		Base	0,2	0,3	0,2	2,7	1,6	95,4	599,0	299,0	102,0
PAdx	Coeso	Topo	0,8	7,8	1,7	3,4	1,7	200,6	662,0	286,8	51,2
		Meio	0,8	7,0	2,2	3,5	1,6	187,8	648,0	287,0	65,0
		Base	0,8	5,5	2,2	3,3	1,6	184,8	653,8	262,4	83,8
	Não coeso	Topo	0,7	4,0	4,0	2,3	1,5	94,2	645,4	277,4	77,2
		Meio	0,6	3,0	4,0	2,2	1,5	130,4	622,2	293,0	84,8
		Base	0,5	1,8	6,1	1,6	1,4	90,0	622,0	290,4	87,6
LAa	Coeso	Topo	1,1	8,9	0,8	4,3	1,7	158,4	525,2	444,8	30,0
		Meio	1,1	7,4	0,5	3,9	1,6	148,2	479,4	489,2	31,4
		Base	0,9	5,2	0,4	4,1	1,6	150,4	472,6	479,6	47,8
	Não coeso	Topo	0,8	3,5	1,7	4,5	1,6	127,8	629,2	341,6	29,2
		Meio	0,8	2,9	1,8	4,0	1,7	121,2	624,2	340,6	35,2
		Base	0,7	1,7	1,6	4,1	1,7	124,8	590,8	361,0	48,2
LAdx	Coeso	Topo	1,0	4,3	1,3	3,8	1,6	158,4	701,0	254,0	45,0
		Meio	0,7	2,3	1,7	3,1	1,6	157,4	714,4	256,2	29,4
		Base	0,6	1,3	1,6	3,2	1,6	157,2	678,4	269,6	52,0
	Não coeso	Topo	0,5	0,9	2,0	3,5	1,6	164,4	614,4	315,2	70,4
		Meio	0,4	1,0	1,9	4,0	1,6	149,0	603,4	323,6	73,0
		Base	0,5	1,0	1,9	3,7	1,5	144,2	583,6	341,0	75,4

Fonte: Dados cedidos por pesquisadores do Programa de Pós-graduação em Ciência do Solo (PPGCS) da Universidade Federal do Ceará (UFC). Legenda: Si – Silício; Al – Alumínio; Fe – Ferro; C.O – Carbono orgânico; Ds – Densidade do solo; Arg. nat. – Argila natural; PVAd - Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico típico; Paex abruptico - Argissolo Amarelo Eutrocoeso abruptico; PAex típico - Argissolo Amarelo Eutrocoeso típico; PAdx - Argissolo Amarelo Distrocoeso epirodóxico; LAa - Latossolo Amarelo Alumínico argissólico e LAdx - Latossolo Amarelo Distrocoeso típico.

Tabela 2 - Valores da resistência tênsil dos solos em estudo.

Solo	Com caráter coeso			Sem caráter coeso		
	Topo	Meio	Base	Topo	Meio	Base
	<b>RT (kPa)</b>					
PVAd	70,7	55,6	50,9	46,1	46,0	23,3
PAex abruptico	40,1	32,1	25,5	18,0	12,3	26,5
PAex típico	104,7	106,0	65,9	61,8	76,9	68,4
PAdx	74,9	60,9	46,8	16,0	21,2	18,4
LAa	33,3	30,2	36,7	41,4	42,9	27,0
LAdx	24,1	23,5	15,6	21,2	24,0	22,5

Fonte: Dados cedidos por pesquisadores do Programa de Pós-gradua o em Ciência do Solo (PPGCS) da Universidade Federal do Ceará (UFC).

A resistência tênsil de agregados do solo tecnicamente   possível de se realizar no reômetro, porém o reômetro utilizado neste estudo (MCR102) não possui essa capacidade e os reômetros superiores (MCR 3XX ou 5XX) precisa de um módulo adicional (Tack tests) para ser feito o teste.

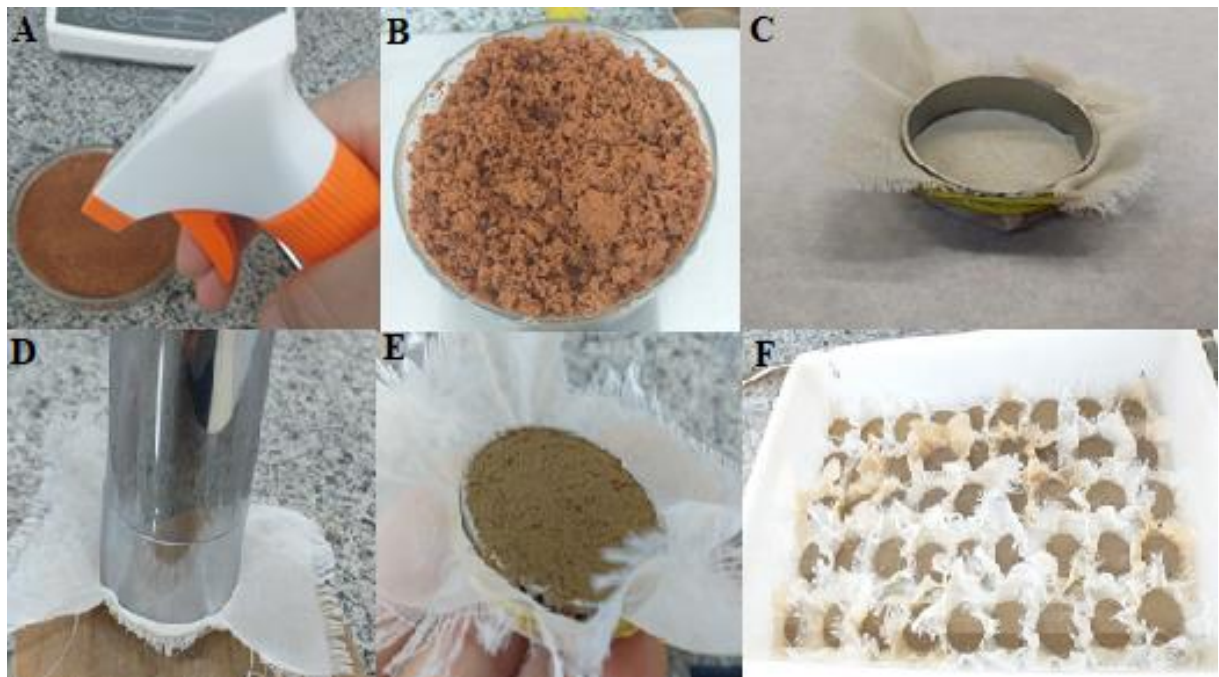
### 3.2 TESTE DE VARREDURA DE AMPLITUDE

Os testes de varredura de amplitude (TVA) foram realizados em um reômetro rotacional modular compacto (Anton Paar MCR 102), com sistema de medi o de duas placas rugosas paralelas, a placa inferior fixa de 50 mm de diâmetro e a placa superior medindo 25 mm de diâmetro (MEZGER, 2014). As amostras em terra fina seca ao ar (TFSA) foram umedecidas entre 10 a 20% (Figura 6A) e logo após permaneceram em repouso hermético por durante 16 h (Figura 6B). Em seguida, a TFSA umedecida de cada amostra foi transferida, em triplicata, para anéis volumétricos de aproximadamente 3,58 cm de diâmetro e 0,96 cm de altura sendo compactada (Figura 6C, D e E) de modo que a densidade nessas amostras preparadas fosse igual ao valor médio de densidade das amostras coletadas em cada horizonte no campo (Tabela 1). Então, essas amostras foram saturadas por capilaridade com água destilada (Figura 6F) durante aproximadamente 24h e, posteriormente, essas amostras foram drenadas na tensão de



água ( $\psi$ ) de 10 kPa na coluna de areia, (REINERT; REICHERT, 2006), até atingirem equilíbrio hidráulico. Utilizou-se o potencial matricial de -10 kPa devido a estudos anteriores (GIAROLA et al., 2001) demonstrarem que em conteúdo de umidade próximo à capacidade de campo já é possível distinguir diferenças na resistência estrutural entre solos coesos e não coesos e que essas diferenças são maiores à medida que o potencial matricial decresce. No entanto, em virtude das diferenças na distribuição do tamanho de partículas dos solos deste estudo, a drenagem à potenciais menores inviabilizaria o TVA, uma vez que poderia ocorrer perda de contato entre a amostra e as placas paralelas em solos de textura arenosa (PÉRTILE et al., 2018).

Figura 6 - Preparação das amostras de solo: umedecimento (A); homogeneização e repouso (B); anel volumétrico (C); compactação da massa de solo no anel (D); amostra pronta (E) e saturação por capilaridade (F).



Fonte: Própria autora.

As configurações do teste seguiram as recomendações de Markgraf (2006) (Tabela 3), a deformação é controlada e a tensão de cisalhamento resultante foi mensurada. Foi, também, registrada manualmente a força normal (FN) 30 segundos após o início do TVA (Anexo). A

partir da relação tensão – deformação, obtida no TVA sob tensões de cisalhamento oscilatório, foram calculadas as propriedades de cisalhamento ( $\tau_{LVR}$ ,  $G'$ ,  $G''$ ,  $\gamma_{YP}$  e  $\tau_{max}$ ) que caracterizam a resistência do solo sob as tensões aplicadas, e as propriedades de viscoelasticidade ( $\gamma_{LVR}$ ,  $\gamma_{YP}$ ,  $\gamma_{\tau_{max}}$  e  $Iz$ ), que estão relacionadas às porções elásticas e viscosas do comportamento do solo (BATISTÃO, 2018; HOLTHUSEN et al., 2019). A força normal não foi controlada durante o teste pois não dispomos de material suficiente, visto que com força controlada o número de amostras passa de três até seis vezes mais (devido aos três a seis níveis de força).

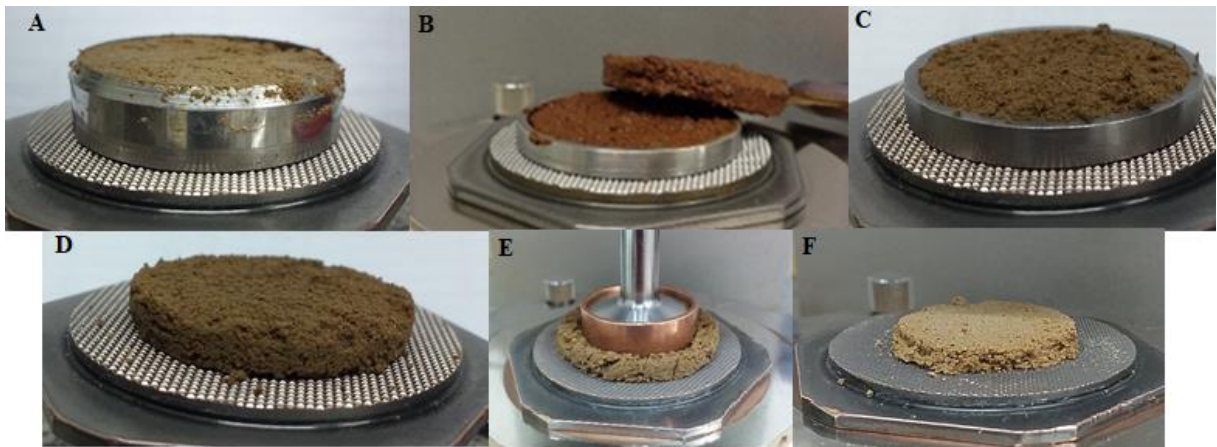
Tabela 3 - Configurações recomendadas para o teste de varredura de amplitude com deformação controlada.

<b>Parâmetros</b>	<b>Configuração</b>
Distância entre as placas ( <i>gap</i> ) fixo	4 mm
Deformação	$\gamma = 0,0001 - 100\%$
Frequência angular	$f = 0,5 \text{ Hz}$
Pontos medidos	30 pontos
Temperatura	20 °C
Duração do teste	13 - 14 minutos

Fonte: Adaptado de Markgraf (2006).

O preparo detalhado das amostras para a realização do TVA seguiu o método descrito por Pértile et al. (2018). Após o equilíbrio hidráulico, as amostras foram retiradas da coluna de areia e transferidas para placa inferior fixa do reômetro e, em seguida, retiradas do anel, sendo posteriormente cortadas com auxílio de um fio de nylon para que a amostra seja reduzida a uma altura de 4 mm. Para ajustar o diâmetro da amostra de solo com o diâmetro da placa superior, utilizou-se um anel de cobre para se fazer a medição e, posteriormente, retirada o solo circundante (Figura 7). Foi realizada a medição da umidade do solo antes e depois do teste (Anexo).

Figura 7 - Preparação das amostras para condução do TVA: A) amostra sobre a placa inferior. B) e C) amostra retirada do anel com corte horizontal na altura de 4mm. D) amostra com 4mm de altura. E) amostra ajustada entre as placas paralelas. F) retirada do excesso de solo circundante – amostra pronta para o teste.



Fonte: Própria autora.

As propriedades reológicas foram obtidas usando o software Reoplus/32 v 3.62, sendo os três primeiros pontos de medição descartados devido à baixa sensibilidade do reômetro (PÉRTILE et al., 2018). Também foram excluídas das análises as amostras que perderam mais de 10% do conteúdo de água durante o teste. Segundo Pértile et al. (2018) e Alves (2019), a umidade tem grande impacto sobre as propriedades reológicas do solo, assim a perda significativa de água durante os testes pode comprometer a interpretação dos resultados.

### 3.3 ANÁLISES ESTATÍSTICAS

Para o conjunto de dados reológicos de cada posição de coleta nos horizontes, foi utilizado o delineamento inteiramente casualizado (fatorial duplo) para melhor percepção dos resultados. As variáveis reológicas obtidas nos testes TVA, foram submetidas à análise gráfica de normalidade, por meio da função `lm` no software R (R CORE TEAM, 2015) e análise de variância (ANOVA) no pacote `Expdes.pt` (FERREIRA et al., 2014). Quando significativa, realizou-se teste de comparação de médias (Teste de Tukey, pacote `Expdes.pt`) e quando não houve interação entre os fatores de variação, foi construído outro gráfico ao lado. Posteriormente, as relações entre os dados médios das variáveis reológicas e propriedades

químicas e resistência tênsil foram testadas através dos coeficientes de correlação de Pearson no software R (R CORE TEAM, 2015).

#### 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados da análise de variância para as propriedades reológicas de resistência microestrutural são apresentados na tabela 4. Ocorreu efeito simples do fator solo para a tensão no final do intervalo viscoelástico linear ( $\tau_{LVR}$ ) e valor dos módulos de armazenamento e perda no ponto de escoamento ( $G'G''_{YP}$ ) nas amostras coletadas tanto no topo quanto no meio do horizonte, bem como para a tensão máxima de cisalhamento ( $\tau_{max}$ ) nas amostras coletadas nas posições do meio e da base. Além disso, verificou interação significativa entre os fatores para  $G'G''_{YP}$  na base e para  $\tau_{max}$  no topo dos horizontes. A resistência ao cisalhamento depende do arranjo das partículas e do tipo de ligação interpartículas que predomina (MARKGRAF et al., 2011; BATISTA, 2020).

Tabela 4 - Análise de variância (ANOVA) para as propriedades de resistência ao cisalhamento: Tensão no final do intervalo viscoelástico linear ( $\tau_{LVR}$ ), módulos de armazenamento e de perda no ponto de escoamento ( $G'G''_{YP}$ ) e tensão máxima de cisalhamento ( $\tau_{max}$ ).

Fatores de variação	Topo		Meio		Base		
	F value	P value	F value	P value	F value	P value	
$\tau_{LVR}$	Solo	5,9842	<b>0,0010</b>	3,3160	<b>0,0204</b>	2,2316	0,0841
	Coesão	2,3530	0,1381	1,4900	0,2341	4,0562	0,0554
	Solo*Coesão	1,8287	0,1452	0,6811	0,6421	1,0689	0,4020
	CV (%)	46,94		55,51		39,93	
$G'G''_{YP}$	Solo	4,9278	<b>0,03586</b>	6,7477	<b>0,01621</b>	12,7141	<b>0,0018</b>
	Coesão	1,4791	0,25486	1,3806	0,27015	0,0017	0,9684
	Solo*Coesão	2,7721	0,11534	2,5456	0,133	4,4449	<b>0,0416</b>
	CV (%)	47,00		60,73		47,95	
$\tau_{max}$	Solo	5,6016	<b>0,00147</b>	7,4510	<b>0,0002</b>	4,2463	<b>0,0066</b>
	Coesão	5,1683	<b>0,03224</b>	1,7827	0,1943	3,0788	0,0921
	Solo*Coesão	2,6345	<b>0,0491</b>	1,9392	0,1249	1,7951	0,1520
	CV (%)	26,76		23,59		26,38	

Obs: Os valores em negrito destacam os P significativos.

Os resultados da análise gráfica de normalidade se encontram no anexo, onde, no geral, observa-se resíduos normais em todos os dados. O PVAd foi o solo com maior resistência ao cisalhamento no final da faixa viscoelástica linear nas amostras coletadas no topo e no meio dos horizontes. Na posição topo, a  $\tau_{LVR}$  dos solos PAex abrupto, PAex típico, PAdx e LAa foram semelhantes entre si, porém muito menor quando comparada à do PVAd. Na posição meio, o PAex apresentou menor valor de  $\tau_{LVR}$ , sendo aproximadamente 6 vezes menor quando comparado ao PVAd. Não ocorreu diferenças estatisticamente significativas na  $\tau_{LVR}$  entre as classes de solo na posição base (Figura 8). Mesmo o caráter coeso apresentando a maior média de  $\tau_{LVR}$ , não houve efeito significativo da coesão nos solos em todas as posições.

Mesmo não apresentando diferenças entre solos com e sem caráter coeso, os resultados de  $\tau_{LVR}$  dos horizontes com e sem caráter coeso foram muito superiores quando comparados com estudos que avaliaram a resistência microestrutural de solo por meio da reometria em outros locais do Brasil. Em Terras Arquelógicas na Amazônia, Batistão et al. (2020a) encontraram valores de 3,3 até 268 Pa em estado quase saturado, valores bem menores do que neste estudo. Essa variação se deve provavelmente à combinação de solos com alto teor de matéria orgânica e alta umidade durante a condução do teste. Também os valores de  $\tau_{LVR}$  foram aproximadamente 10 vezes superiores aos encontrados por Alves et al. (2021), ao avaliar o efeito de biochar na microestrutura de um Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico no Rio Grande do Sul. Ainda, Batistão et al. (2020b), ao avaliarem o efeito da composição da solução do solo na resistência microestrutural de solos aluviais salinos no Rio Grande do Norte em solo saturado encontraram  $\tau_{LVR}$  de no máximo 125 kPa, muito abaixo dos valores encontrados nos solos do tabuleiro costeiro brasileiro.

Em outros estudos feitos por Pértile (2015) foi encontrado para um Latossolo Vermelho Distrófico típico valores em torno de 550 Pa e para Argissolos chegando até 700 Pa, porém, novamente, são valores bem abaixo em comparação aos solos avaliados. Mesmo não apresentando diferenças entre solos com e sem caráter coeso, a maior  $\tau_{LVR}$  poderia ser um indicativo de maior estabilidade microestrutural destes solos quando comparados às classes de solo de outras regiões.

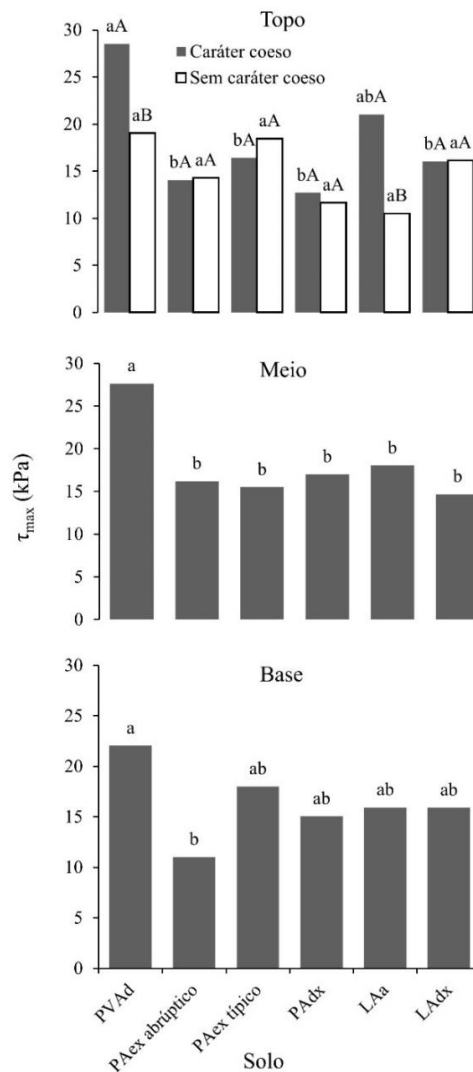
Com exceção do LAa, o PVAd com caráter coeso coletado no topo do horizonte apresentou tensão máxima de cisalhamento ( $\tau_{max}$ ) quase duas vezes maior quando comparado aos demais solos. Contudo, não houve diferença na  $\tau_{max}$  para os solos sem caráter coeso nesta posição do horizonte. Além disso, o caráter coeso proporcionou maior  $\tau_{max}$  para os solos PVAd

e LAa. Na posição meio, a  $\tau_{\max}$  foi muito superior no PVAd, não ocorrendo diferenças entre os demais solos. Na posição base, O PVAd também apresentou a maior  $\tau_{\max}$ , sendo diferente estatisticamente do PAex abruptico (Figura 8).

As variáveis  $\tau_{LVR}$  e  $\tau_{\max}$  indicam respectivamente, a resistência da microestrutura ao cisalhamento no final da faixa viscoelástica linear e a máxima resistência ao cisalhamento, sendo influenciado por vários fatores como; potencial matricial, conteúdo de água (GHEZZEHEI; OR, 2001; PÉRTILE et al., 2016) teor de matéria orgânica (AJAYI et al., 2016; HOLTHUSEN et al., 2020; MARKGRAF et al., 2012), teor de cátions (MARKGRAF et al., 2006; MARKGRAF; HORN, 2006), composição da solução do solo (BATISTÃO et al., 2020a), distribuição do tamanho de partículas (PÉRTILE et al., 2018; WANG et al., 2008), densidade do solo e grau de organização dos agregados, força normal incidente sobre a superfície da amostra (HOLTHUSEN et al., 2019, 2017). Estes fatores podem atuar em tipo e intensidade diferentes (BATISTÃO et al., 2020b). A maior  $\tau_{LVR}$  e  $\tau_{\max}$  no PVAd pode estar relacionada a atuação conjunta do alto teor de alumínio, elevada densidade grande força normal incidente sobre amostra, uma vez que tiveram correção positiva com essas variáveis reológicas (Tabela 6).

O Al pode influenciar a resistência à desagregação e conseqüentemente, nas propriedades relacionadas com a estabilidade desses agregados (PEDROTTI et al., 2003; VITORINO et al., 2003) em meso e microescala, por proporcionar a formação de pontes catiônicas com alta energia de ligação entre as partículas (FONTES et al., 2001; SPOSITO, 2008; TISDALL; OADES, 1982). Tanto a densidade, como a força normal atuam no aumento da resistência do solo ao cisalhamento pela aproximação entre as partículas, favorecendo as ligações eletrostáticas e aumentando o número de pontos de contato entre as partículas (BRAIDA et al., 2007; EDWARDS; BREMNER, 1967; HOLTHUSEN et al., 2019, 2017; TISDALL; OADES, 1982).

Figura 8 - Tensão máxima de cisalhamento ( $\tau_{\max}$ ) em função do tipo de solo, da posição e a coesão.



Letras minúsculas distintas indicam diferença significativa, pelo teste de Tukey ( $p < 0,05$ ), entre os solos e a coesão em cada posição do horizonte. Letras maiúsculas distintas indicam diferença significativa, pelo teste de Tukey ( $p < 0,05$ ), entre a coesão dentro de cada tipo de solo.

Somente para PVAd, PAex abruptico e PAex tipico foi observado escoamento da microestrutura do solo. Dessa forma a comparação da tensão no ponto de escoamento ( $G'G''_{YP}$ ) foi realizada somente para estes solos. Dentre estes, o PVAd apresentou maior e o PAex abruptico a menor  $G'G''_{YP}$ , com PAex tipico demonstrando resistência intermediária, sendo semelhante a ambos, tanto na posição topo quando no meio do horizonte. Na posição base, não

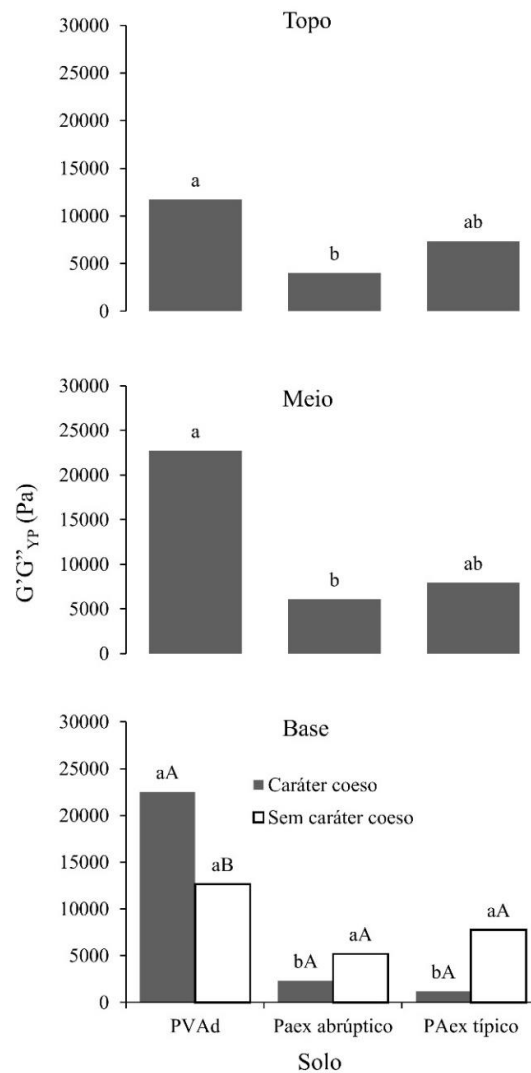
ocorreu diferenças na  $G'G''_{YP}$  entre as classes comparando os solos sem caráter coeso, enquanto que nos solos com caráter coeso, o PVAd foi o mais resistente ao escoamento. Além disso, O PVAd com caráter coeso apresentou  $G'G''_{YP}$  muito superior ao não coeso.

Comparado ao PVAd, PAex abruptico e PAex típico, o PAdx, LAa e LAdx apresentaram maior estabilidade microestrutural, uma vez que não foi verificado escoamento. Segundo Markgraf et al. (2011) e Baumgarten et al. (2013), a não ocorrência do ponto de escoamento indica um elevado grau de estabilidade estrutural, pois a fase viscosa não é atingida, sendo esse efeito mais pronunciado com menores conteúdos de água no solo

Esse resultado corrobora os estudos feitos por Pértile (2015) e Pértile et al. (2018), ao observaram ausência de ponto de escoamento em diferentes solos mais intemperizados. Markgraf e Horn (2007) também não observaram um ponto de escoamento em Latossolos ricos em argila, sendo um indicativo do caráter muito rígido desses solos. No caso dos solos coesos desse estudo, a estrutura geralmente maciça resulta em incrementos de coesão e rigidez estrutural. No caso dos Latossolos estudados por Markgraf e Horn (2007), essa rigidez advém da elevada estabilidade que a estrutura muito pequena granular (comumente chamada de pó-de-café), comum nesses solos. Segundo Markgraf et al. (2011) e Baumgarten et al. (2013), a não ocorrência do ponto de escoamento indica um elevado grau de estabilidade estrutural, pois a fase viscosa não é atingida, sendo esse efeito mais pronunciado com menores conteúdos de água no solo.



Figura 9 - Módulos de armazenamento e perda no ponto de escoamento ( $G'G''_{YP}$ ) em função do tipo de solo, posição do horizonte e da coesão.



Letras minúsculas distintas indicam diferença significativa, pelo teste de Tukey ( $p < 0,05$ ), entre os solos e a coesão em cada posição do horizonte. Letras maiúsculas distintas indicam diferença significativa, pelo teste de Tukey ( $p < 0,05$ ), entre a coesão dentro de cada tipo de solo.

Na Tabela 5 estão os resultados da análise de variância para as propriedades de viscoelasticidade. Para as propriedades de viscoelasticidade, o efeito do tipo de solo foi altamente significativo para todas as variáveis, bem como o efeito da coesão. Para a deformação no final da faixa viscoelástica linear ( $\gamma_{LVR}$ ), ocorreu efeito significativo do tipo de solo em todas as posições e também o efeito da coesão na posição base. Para a deformação no

ponto de escoamento ( $\gamma_{YP}$ ), foi verificada significância para coesão em todas as posições e para os tipos de solo nas posições topo e base. Para a deformação na tensão máxima de cisalhamento ( $\gamma_{\tau \max}$ ) ocorreu efeito do solo nas posições topo e base e da coesão na posição meio. Para a integral Z (Iz) destacar-se o efeito significativo da interação para as posições topo e base, enquanto na posição meio ocorreu significância somente para o fator solo.

Tabela 5 - Análise de variância (ANOVA) para as propriedades de viscoelasticidade: Deformação no final do intervalo viscoelástico linear ( $\gamma_{LVR}$ ), deformação no ponto de escoamento ( $\gamma_{YP}$ ), deformação na tensão máxima de cisalhamento ( $\gamma_{\tau \max}$ ) e integral z (Iz).

Fatores de variação	Topo		Meio		Base		
	F value	P value	F value	P value	F value	P value	
$\gamma_{LVR}$	Solo	4,4208	<b>0,0054</b>	2,6595	<b>0,0475</b>	3,1876	<b>0,0240</b>
	Coesão	1,2594	0,2729	1,6251	0,2146	7,3774	<b>0,0121</b>
	Solo*Coesão	1,7991	0,1512	0,6317	0,6774	1,5862	0,2020
	CV (%)	36,54		55,33		20,40	
$\gamma_{YP}$	Solo	6,3587	<b>0,01899</b>	0,7270	0,50972	15,2850	<b>0,0009</b>
	Coesão	16,095	<b>0,00306</b>	6,6809	<b>0,02947</b>	9,5156	<b>0,0115</b>
	Solo*Coesão	2,1407	0,17357	3,5970	0,07112	3,5438	0,0686
	CV (%)	8,50		13,12		8,05	
$\gamma_{\tau \max}$	Solo	8,3441	<b>0,00011</b>	2,4456	0,0631	4,1299	<b>0,0076</b>
	Coesão	0,1171	0,73521	4,8021	<b>0,0384</b>	1,5035	0,2320
	Solo*Coesão	1,1096	0,38149	1,1733	0,3511	0,8949	0,5002
	CV (%)	34,76		32,89		24,35	
Iz	Solo	3,8344	<b>0,01076</b>	7,5801	<b>0,0002</b>	27,5271	<b>0,0000</b>
	Coesão	0,1784	0,67655	0,1076	0,7458	0,2010	0,6579
	Solo*Coesão	5,4167	<b>0,00179</b>	1,0496	0,4121	6,0629	<b>0,0009</b>
	CV (%)	16,66		16,65		10,89	

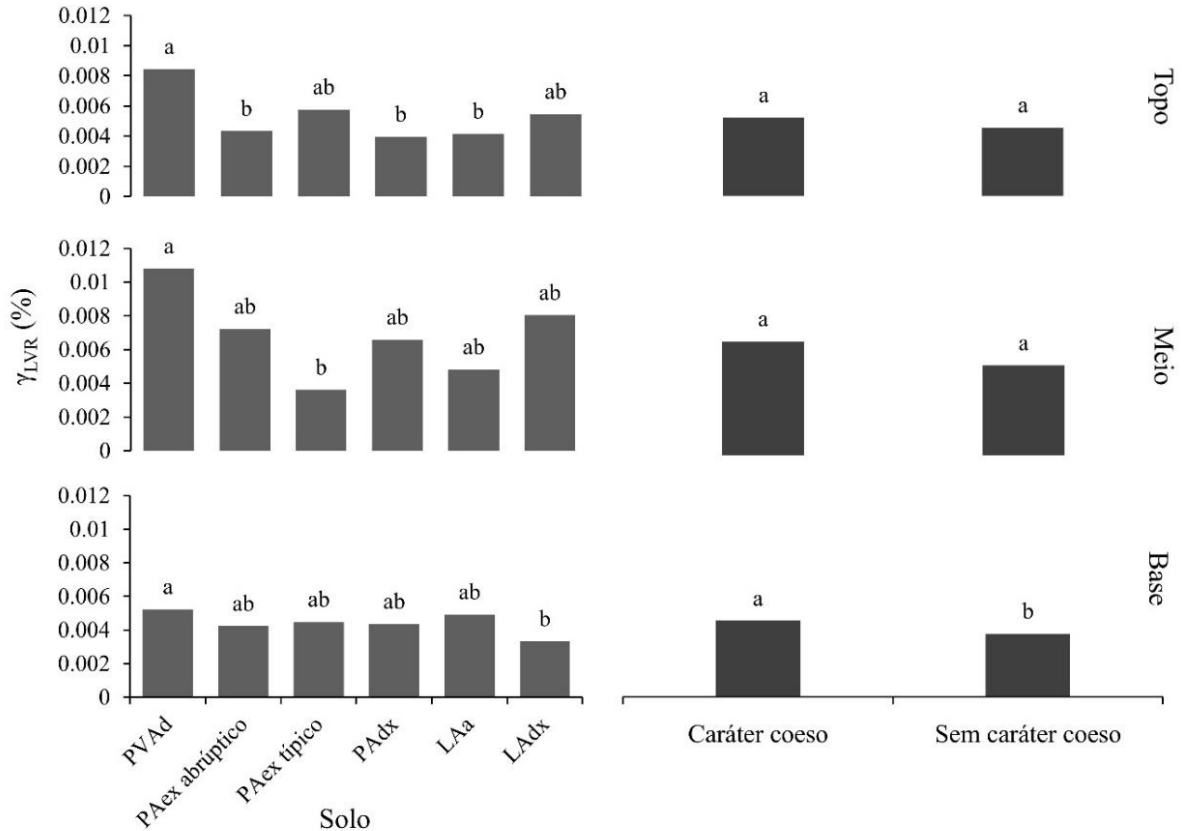
Obs: Os valores em negrito destacam os P significativos.

A deformação no final do intervalo viscoelástico linear, variou entre as classes de solo. O solo PVAd apresentou o maior  $\gamma_{LVR}$  em relação ao PAex abrupto, PADx e LAa na posição topo, em relação ao PAex típico nas posições meio e base para todas as posições dos horizontes (Figura 10). Na posição base, solos com caráter coeso apresentaram maior valor de  $\gamma_{LVR}$ , o que poderia ser atribuído à mineralogia essencialmente caulínica de forma placóide em empacotamento intergranular compacto em solos coesos (MOREAU et al., 2006), favorecendo

o deslizamento as partículas de uma em relação às outras durante o cisalhamento, sem perder o contato entre elas.

Alguns autores encontraram valores um pouco menores de  $\gamma_{LVR}$  em Latossolos e Argissolos do Rio Grande do Sul, na faixa de 0,006% (PÉRTILE et al., 2018). Estudos feitos por Pértile (2015) também encontraram algo semelhante, em que Latossolos, solos mais argilosos, apresentaram maior estabilidade microestrutural, com  $\gamma_{YP}$  variando de 70 a 78%. Esses resultados corroboram também com Markgraf et al. (2006), que constataram maior  $\gamma_{YP}$  em Latossolos. A deformação no final do intervalo viscoelástico linear ( $\gamma_{LVR}$ ) indica a amplitude do comportamento puramente elástico do solo (ou deformação totalmente recuperável) (MARKGRAF et al., 2006; PÉRTILE et al., 2018), e foi influenciada pelo tipo de solo e pelo efeito simples da coesão ( $p < 0,05$ ) (Tabela 5).

Figura 10 - Deformação no fim do intervalo viscoelástico linear ( $\gamma_{LVR}$ ) em função do tipo de solo, da posição do horizonte e o efeito simples da coesão.



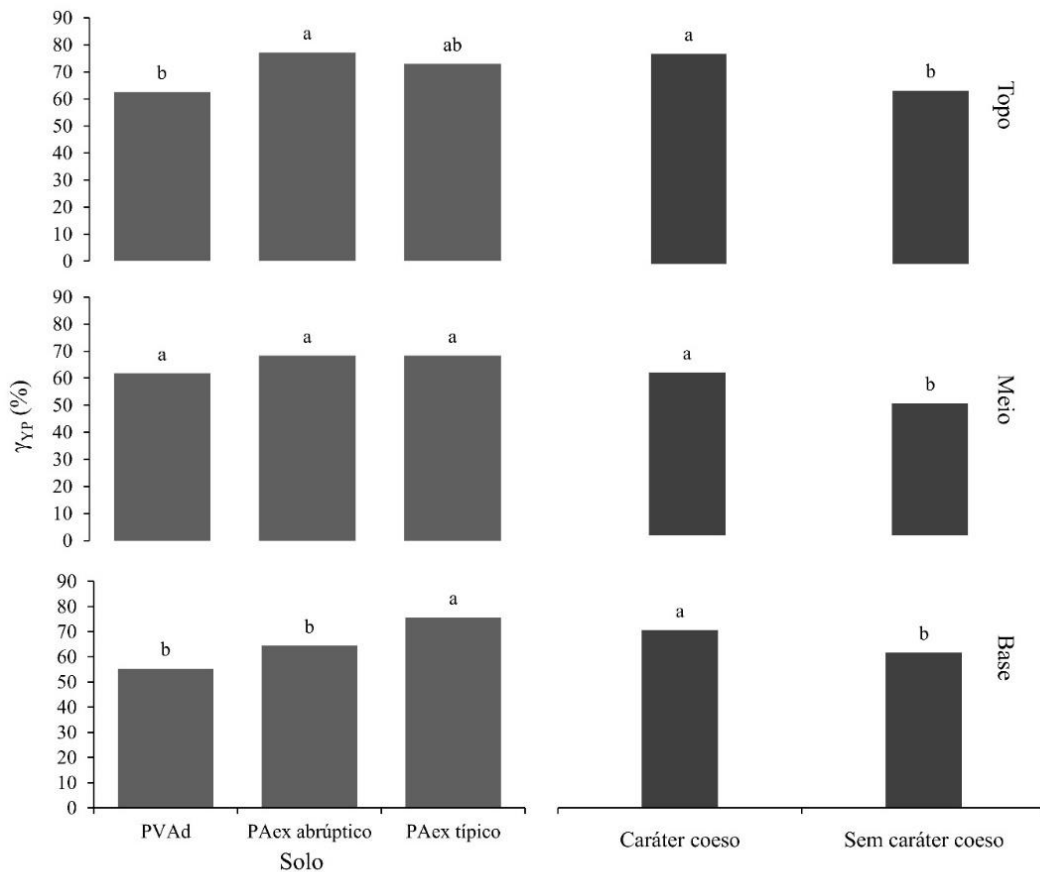
Letras minúsculas distintas indicam diferença significativa, pelo teste de Tukey ( $p < 0,05$ ), entre os solos e a coesão em cada posição do horizonte.

Dentre as classes de solo que apresentaram escoamento, o PAex abrupto e o típico apresentaram maior  $\gamma_{YP}$  quando comparado ao PVAd na posição topo. Na posição meio do horizonte, não houve diferença significativa para os tipos de solo e na posição base a  $\gamma_{YP}$  foi maior no PAex típico. Esses resultados podem estar relacionados ao teor de carbono orgânico do solo (COS), no qual as classes com mais COS suportaram maiores deformações antes do ponto de escoamento, principalmente nos horizontes coesos. A relação entre teor de COS e aumento retardamento do ponto de escoamento também foi observada por Ajayi et al., (2016), Ajayi e Horn (2017), Batistão et al. (2020b), Markgraf et al. (2012) e Stoppe e Horn (2018). O COS aumenta a área superficial específica e favorece a formação de complexos com cátions (TISDALL; OADES, 1982), o que diminui o atrito entre as partículas, ao mesmo tempo que melhora a ligação entre elas, e por ser mais elástica que as partículas minerais (SOANE, 1990), aumenta a elasticidade da microestrutura.

Além disso, solos com caráter coeso tiveram maior  $\gamma_{YP}$  em todas as posições do horizonte, que possivelmente está relacionado ao maior teor de Al quando comparado aos solos sem caráter coeso. Cátions polivalentes como o Al favorecem a atração e agregação entre partículas pela diminuição da dupla camada difusa (FONTES et al., 2001; SPOSITO, 2008), bem como por meio de pontes catiônicas e por proporcionar formação de complexos organominerais (BRONICK; LAL, 2005). A maior proximidade entre as partículas fortalece a microestrutura, e conseqüentemente retardando o escoamento do solo.

Ainda, as classes PAdx, LAa e LAdx não atingiram ponto de escoamento, indicando maior elasticidade microestrutural, resultados semelhantes aos de Pértile (2015), trabalhando com Latossolos, que verificaram que solos mais argilosos, apresentaram microestrutura mais estável e mais elástica, com  $\gamma_{YP}$  variando de 70 a 78% ou pela não observação do ponto de escoamento em alguns solos. Markgraf et al. (2006) também constataram maior  $\gamma_{YP}$  em Latossolos.

Figura 11 - Deformação no ponto de escoamento ( $\gamma_{YP}$ ) em função do tipo de solo, da posição do horizonte e do efeito simples da coesão.



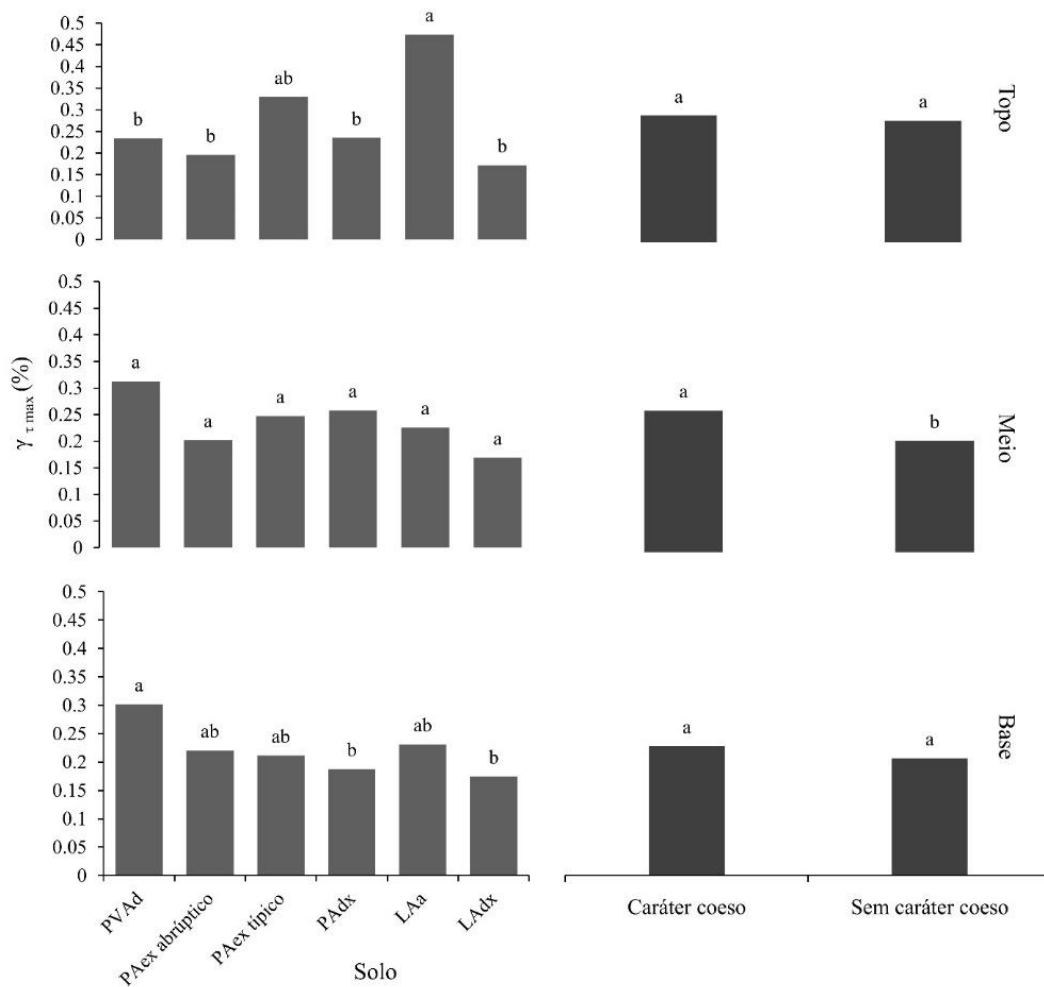
Letras minúsculas distintas indicam diferença significativa, pelo teste de Tukey ( $p < 0,05$ ), entre os solos e a coesão em cada posição do horizonte.

A deformação no ponto de máxima tensão de cisalhamento ( $\gamma_{\tau \max}$ ) variaram entre as classes de solo nas posições topo e base. Na posição topo, solo LAa teve o maior valor (0,5%) seguido do solo PAex típico (0,3%), sendo o solo LAdx com o menor valor (0,17%). Já na posição base do horizonte, o solo PVAd teve maior valor (0,3%) e o solo LAdx, o menor (0,17%). Observamos que somente a posição meio do horizonte houve efeito significativo da coesão, em que o caráter coeso apresentou maior  $\gamma_{\tau \max}$  (Figura 12).

A  $\gamma_{\tau \max}$  é uma propriedade reológica pouco avaliada. Em um Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico arênico, em diferentes classes de agregados, com alto ou baixo teor de

matéria orgânica do solo (MOS) e submetido a distintos potenciais matriciais (0, - 6 e - 10 kPa), as diferenças na  $\gamma_{\tau \max}$  entre os níveis de MOS diminuíram fortemente e apenas permaneceu notavelmente para níveis de força normal além de 10 kPa, exceto para o solo saturado, em que os agregados <1 mm ainda exibiam um efeito da MOS, que foi mais pronunciada na classe dos menores agregados (HOLTHUSEN et al., 2020). Nesse único estudo relatado, a propriedade  $\gamma_{\tau \max}$  foi afetada pela força normal e interagiu com o teor de matéria orgânica. Solos coesos possuem um pouco mais de carbono orgânico também, porém o efeito da densidade não é muito clara em solos coesos e não coesos.

Figura 12 - Deformação na tensão máxima de cisalhamento ( $\gamma_{\tau \max}$ ) em função do tipo de solo, da posição do horizonte e da coesão.



Letras minúsculas distintas indicam diferença significativa, pelo teste de Tukey ( $p < 0,05$ ), entre os solos e a coesão em cada posição do horizonte.

A propriedade reológica integral  $z$  ( $I_z$ ) caracteriza a rigidez da microestrutura do solo. Quanto maior o valor da  $I_z$ , maior é o comportamento elástico e a rigidez microestrutural (MARKGRAF et al., 2012). Dentre as classes de solo com caráter coeso na posição topo, o PAdx apresentou maior rigidez microestrutural avaliada pela integral  $z$  ( $I_z$ ) comparado as classes PVAd, LAa e LAdx (Figura 13). Para solos sem caráter coeso nesta posição de coleta, a classe LAdx apresentou maior  $I_z$  em relação as classes PVAd e PAex abruptico, com as demais classes apresentando rigidez microestrutural intermediárias. Também ocorreu diferenças na rigidez microestrutural para as classes PAex abruptico, LAa e LAdx entre os solos com e sem caráter coeso. No PAex abruptico os solos com caráter coeso apresentaram maior  $I_z$ , enquanto o caráter coeso proporcionou redução da rigidez da microestrutura nas classes LAa e LAdx.

Na posição topo, a classe de solo LAdx e PAdx abruptico com e sem caráter coeso respectivamente apresentaram os maiores valores de  $I_z$ . Também ocorreu diferenças na rigidez microestrutural para as classes PAex abruptico, LAa e LAdx entre os solos com e sem caráter coeso. No PAex abruptico os solos com caráter coeso apresentaram maior  $I_z$ , enquanto o caráter coeso proporcionou redução da rigidez da microestrutura nas classes LAa e LAdx. Resultados semelhantes também ocorreram para os solos na posição base. Já na posição meio do horizonte a classe PAdx e PVAd apresentaram respectivamente os maiores e menores valores de rigidez microestrutural avaliada pela  $I_z$  (Figura 13).

Outro resultado interessante é que, tanto na posição topo do horizonte, como na base, alguns solos sem caráter coeso tiveram valores maiores de  $I_z$  que solos com caráter coeso, sendo contrários as outras variáveis reológicas analisadas, onde solos com caráter coeso sempre tiveram valores maiores. A  $I_z$  oferece uma rápida visão geral por meio de uma propriedade única para comparação. No entanto, em vários casos, os resultados não podem ser interpretados de maneira satisfatória utilizando essa variável devido ao contraste com os resultados obtidos por outras variáveis reológicas (HOLTHUSEN et al., 2020). Outros estudos também já relatam que os resultados de  $I_z$  são contrastantes com os das as outras propriedades reológicas (BAUMGARTEN et al., 2013).

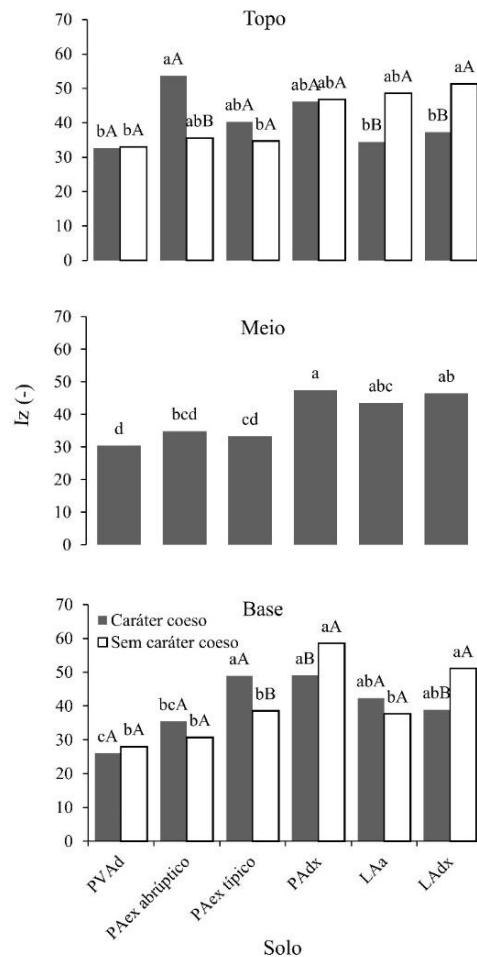
A  $I_z$  é calculada pela soma da área delimitada pela curva  $\tan \delta$  da menor deformação aplicada até o ponto de escoamento (HOLTHUSEN et al., 2010; MARKGRAF et al., 2006;

PÉRTILE et al., 2018; STOPPE; HORN, 2018), sendo altamente correlacionada com o  $\gamma_{YP}$  (BATISTÃO et al., 2020b). Dessa forma, a maior  $I_z$  pode ser devido ao retardamento do ponto de escoamento, ou seja, maior  $\gamma_{YP}$ . Isso explicaria a maior  $I_z$  no PAex abrupto com caráter coeso, pois os solos com caráter coeso tiveram maior  $\gamma_{YP}$ . Entretanto, nos solos em que não ocorre ponto de escoamento como o LAa e LAdx, a  $I_z$  é calculada pela projeção da curva  $\tan \delta$  e pequenas alterações na inclinação dessa curva pode causar grande variação na  $I_z$  (MEZGER, 2014; SCHMIDT, 2013). Justamente nas classes que não tiveram ponto de escoamento, a  $I_z$  foi maior para os solos sem caráter coeso, o que poderia ser uma característica mais relacionada ao método de estimativa da  $I_z$  do que uma característica intrínseca da microestrutura do solo.

Analisando a curva  $\tan \delta$  (dados não mostrados), pode-se perceber uma pequena dilatação em praticamente todas as classes de solos avaliadas, variando apenas a posição do horizonte e/ou o caráter coeso. Em solos com mais areia, partículas arredondadas (não arredondadas), ou muito densas e com diferentes dimensões em forma/tipo placoides pode acontecer essa dilatação. Contudo, não é uma característica específica de solos coesos, mas dependente teor de areia, maior estado compactação, e rugosidade das partículas.



Figura 13 - Integral z em função do tipo de solo, da posição do horizonte e da coesão.



Letras minúsculas distintas indicam diferença significativa, pelo teste de Tukey ( $p < 0,05$ ), entre os solos e a coesão em cada posição do horizonte. Letras maiúsculas distintas indicam diferença significativa, pelo teste de Tukey ( $p < 0,05$ ), entre a coesão dentro de cada tipo de solo.

As propriedades reológicas são inerentes ao tipo e quantidade de ligação entre partículas. As ligações eletrostáticas são um tipo de ligação, que pode conferir uma resistência e uma elasticidade e, portanto, são sensíveis a mudanças no teor de argila e mineralogia, teor de água, força iônica da solução do solo, tipo e quantidade de cátions trocáveis e pH (HOLTHUSEN et al., 2019; PÉRTILE et al., 2018). A resistência ao cisalhamento e a viscoelasticidade da amostra são determinadas pelo tipo e quantidade de ligações, que podem apresentar caráter quebradiço, em geral com base no contato direto entre as partículas e os

agregados (HOLTHUSEN et al., 2020). A maior  $I_z$  provavelmente foi devido ao atrito causado pela mudança do empacotamento das partículas, que pode ser verificada pela dilatação em alguns solos.

Baumgarten et al. (2013) encontraram valores diferentes para solos arenosos a argilosos desenvolvidos a partir de cinzas vulcânicas, enquanto os solos siltosos a argilosos tinham valores de integrais  $z$  de 30 a 50.

O caráter coeso de um solo não foi explicado totalmente ainda (JACOMINE, 2001), mas com ajuda de correlações entre diferentes propriedades é possível compreender os processos e condições sob quais a coesão se forma. Enquanto os parâmetros químicos ajudam entender as origens do caráter coeso, propriedades mecânicas em diferentes escalas contribuem para o entendimento dos efeitos da coesão sob o comportamento sob tensões e oferecem a possibilidade de avaliar o caráter coeso numa forma heurística. Para esse fim, foi conduzida uma análise de correlação entre as propriedades reológicas com as propriedades químicas e a resistência tênsil (Tabela 6).

Integrar duas escalas, ou seja, micro e mesoescala ainda é uma abordagem recente. Nos estudos que fizeram tal abordagem essa integração foi realizada por meio de testes de correlação (Pearson e Spearman) e por análise de componentes principais (PCA) (HOLTHUSEN et al., 2012; PÉRTILE, 2015). Dentre as propriedades estudadas, compressibilidade cíclica, porosidade total do solo, densidade do solo, condutividade hidráulica saturada ( $K_{sat}$ ), porosidade total, densidade e compressibilidade cíclica tiveram forte correlação com as propriedades reológicas, como tensão máxima de cisalhamento e tensão de cisalhamento no final do intervalo viscoelástico linear (PÉRTILE, 2015).

De maneira geral, as propriedades do solo influenciaram as variáveis reológicas de resistência e de viscoelasticidade de forma oposta, ou sejam, tiveram correlação positiva significativa com um grupo de variável e negativa com o outro. A resistência tênsil (RT) correlacionou negativamente com a  $\gamma_{\tau_{max}}$  e positivamente com a  $\tau_{max}$  (Tabela 6). A relação entre RT e  $\tau_{max}$  já era esperada, pois os mecanismos que atuam na resistência da estrutura na microescala podem influenciar a estabilidade de agregados na mesoescala. A relação inversa com a  $\gamma_{\tau_{max}}$  denota o caráter quebradiço das ligações entre agregados, o que também poderia ser esperado. Dependendo dos processos atuantes na agregação, como cimentação entre partículas, óxidos precipitados, pontes policatiônicas, etc. A amostra pode apresentar uma

ruptura, ou seja, quando o estresse externo é maior que a resistência interna, as ligações são quebradas e as partículas perdem o contato, diminuindo a elasticidade da microestrutura.

Também há uma correlação significativa entre Fe e as propriedades reológicas, ou seja, quanto maiores teores de óxidos de Fe e matéria orgânica, mais eles promovem mecanismos favoráveis à agregação do solo (BAUMGARTEN; HORN, 2013). No caso dos solos coesos, é relatado que ácidos orgânicos (especialmente os fúlvicos) podem atuar solubilizando minerais silicatados, uma vez em solução, a sílica pode precipitar e contribuir com o aumento da coesão (CORNELIS et al., 2011). Ocorreu correlação negativa entre densidade com as propriedades de viscoelasticidade  $\gamma_{\tau_{\max}}$  e Iz e positiva com as propriedades de resistência  $G'G''_{YP}$  e  $\tau_{\max}$ , corroborando os estudos de Pértile (2015), onde a densidade teve correlação negativa com a integral z em 0 kPa; e positiva com os módulos G' e G'' no ponto de escoamento ( $G'G''_{YP}$ ) em 1 kPa. A densidade aumenta a rigidez pelo aumento do número de pontos de contato entre as partículas (atrato), mas diminui a elasticidade do solo (PÉRTILE, 2015; PÉRTILE et al., 2016; PÉRTILE et al., 2018).

Tabela 6 - Coeficientes de correlação de Pearson e significância entre as propriedades químicas, resistência tênsil, propriedades reológicas e a força normal ( $F_n$ ) obtida no início do teste TVA.

Propriedade do solo	Variáveis reológicas						
	-----Resistência-----			-----Viscoelasticidade-----			
	$\tau_{LVR}$	$\tau_{\max}$	$G'G''_{YP}$	$\gamma_{LVR}$	$\gamma_{\tau_{\max}}$	$\gamma_{YP}$	Iz
Si	<b>0,49 **</b>	<b>0,57***</b>	0,29	<b>-0,37 *</b>	<b>-0,38*</b>	-0,04	-0,13
Al	<b>0,33 *</b>	0,28	-0,08	-0,22	-0,14	<b>0,39*</b>	<b>0,35*</b>
Fe	-0,09	<b>-0,34*</b>	<b>-0,42*</b>	0,08	<b>0,42**</b>	<b>0,56**</b>	<b>0,62***</b>
C.O.	-0,26	<b>-0,31*</b>	-0,24	<b>0,33 *</b>	0,06	<b>0,41*</b>	<b>0,48**</b>
Ds	0,23	<b>0,36*</b>	<b>0,45*</b>	-0,27	<b>-0,56***</b>	-0,23	<b>-0,50**</b>
Arg. nat.	0,06	-0,05	-0,23	0,00	0,04	<b>0,34*</b>	<b>0,37*</b>
Areia	-0,2	-0,41	<b>-0,37*</b>	-0,03	<b>0,29*</b>	0,11	-0,10
Argila	-0,24	<b>0,41*</b>	<b>0,35*</b>	-0,05	<b>-0,34*</b>	-0,07	0,11
Silte	-0,10	0,06	-0,02	0,18	0,12	0,04	0,05
RT	0,15	<b>0,36*</b>	0,24	-0,18	<b>-0,60***</b>	-0,06	-0,21
$F_n$	<b>0,62 ***</b>	<b>0,87 ***</b>	<b>0,49 **</b>	<b>-0,39 *</b>	-0,20	-0,26	-0,27

Correlações significativas estão destacadas em negrito. \*, \*\* e \*\*\*: significância a 10, 1 e 0,1%, respectivamente.

A força normal ( $F_n$ ) possui correlação positiva com as propriedades reológicas (Tabela 6), a qual, apresentou valores muito elevados no início do TVA (Anexo). Com o aumento da

força normal, os valores das propriedades reológicas de cisalhamento também aumentam. Esse comportamento também foi relatado por Holthusen et al. (2017), Alves (2019) e Holthusen et al. (2019), o ângulo de atrito interno é uma medida para o impacto da  $F_n$ : quanto maior a inclinação (ou seja, o ângulo), mais resistência ao cisalhamento adicional é criada com o aumento das tensões normais de entrada. Holthusen et al. (2019) encontraram que quanto maior  $F_n$ , maior a elasticidade (LVR) por meio da distância ( $\gamma_{LVR}$ ) e resistência ao cisalhamento ( $\tau_{LVR}$  e  $G'_{LVR}$ ) causa maior resistência ao fluxo viscoso (maior  $\gamma_{YP}$  e maior  $G'G''_{YP}$ ) e resistência ao cisalhamento geral ( $\tau_{max}$  mais alto), bem como viscoelasticidade (integral z).

Outra questão importante a se ressaltar nesse estudo é sobre a quebra dos agregados e o peneiramento do solo devido ao uso de amostras sem estrutura preservada não remove o caráter coeso. Contudo seria interessante, em trabalhos futuros comparar os efeitos da preservação da estrutura na determinação do caráter coeso. Outro ponto é o conteúdo de argila natural, sempre maior em solos coesos, peneirar normalmente não afeta essa fração, ou seja, não foi eliminado por peneirar.

Nesse sentido, o objetivo inicial era verificar se há uma correlação entre as propriedades químicas e a resistência tênsil de solos coesos e não coesos com as propriedades reológicas a fim de reconhecer o TVA como um método a ser utilizado para detectar o caráter coeso em solos. Contudo, não foi possível estabelecer essa correlação de forma uniforme, necessitando assim, de mais estudos a serem investigados. Em anexo também se encontram os gráficos entre a resistência tênsil e as propriedades reológicas, demonstrado que é pouco visível esse efeito. Uma observação a ser feita, é que nesse estudo, ao utilizar o potencial matricial na capacidade de campo (CC) (-10kPa), pode ser que não tenha expressado melhor seu efeito, já que a coesão a campo se manifesta em um conteúdo de água abaixo da CC.

Portanto, há necessidade de mais estudos que investiguem mais detalhadamente essa relação, sendo preciso avaliar com mais repetições e em mais níveis de umidade para verificar a existência de um “tipping point” a partir de qual solo coeso e não coeso começam a ser diferentes reologicamente. Isso é particularmente importante dado que o caráter coeso normalmente manifesta-se diferentemente de acordo com os teores de umidades. Também outra possibilidade de pesquisa seria utilizar amostras com estrutura preservada, e analisar seus efeitos e diferenças com amostras sem estrutura preservada, para ver se processos da agregação afetam ou até disponibilizam a coesão ou se for uma propriedade intrínseca do solo que não está sendo afetado pelo arranjo das partículas. Outra perspectiva é de testar solos apenas

“sedimentados”, isto é, sem compactação e, assim, o efeito da densidade deve diminuir e talvez não esconder mais o efeito puro da coesão. Amostras com estrutura preservada também poderiam refletir melhor o status estrutural desses solos quando da realização de ensaios reométricos. Outra possibilidade seria realizar os ensaios utilizando amostras com estrutura deformada e que passaram por algum tipo de encubação ou ciclos de umedecimento e secagem para que tornassem a manifestar a coesão de campo.

Essas pesquisas sobre solos com caráter coeso devem buscar um melhor entendimento da gênese e caracterização da coesividade, contribuindo para o estabelecimento de parâmetros mais quantitativos para a definição do caráter coeso, melhorando, assim, a estrutura do atual SiBCS, sendo importantes também para tomada de decisões no manejo desses solos.

Como não foram feitos esses testes com outros solos com fenômenos semelhantes, por exemplo, solos tipo “hard-setting”, este estudo oferece muito potencial para melhorar o entendimento também desses solos.

## 5. CONCLUSÕES

A fim de detectar o caráter coeso por meio de propriedades reológicas e contribuir para melhorar o entendimento dos solos coesos, poucas tendências foram encontradas entre o comportamento micromecânico desses solos, não sendo possível, assim, detectar o caráter coeso com segurança e propriedade. Os resultados preliminares mostram forte correlação negativa entre a resistência tênsil e a propriedade reológica  $\gamma_{\tau \max}$  e também com o teor de silício, devido aos compostos mal cristalizados contribuírem para a gênese da coesão como atributo diagnóstico. Houve também correlação com óxidos de ferro, os quais promovem mecanismos favoráveis à agregação do solo. Mesmo não apresentando diferenças, valores muito superiores ao encontrados em solos brasileiros e a não ocorrência de escoamento em algumas classes poderiam indicar elevada estabilidade da microestrutura para os solos do tabuleiro costeiro brasileiro.

## REFERÊNCIAS

AJAYI, A. E.; HOLTHUSEN, D.; HORN, R. Changes in microstructural behaviour and hydraulic functions of biochar amended soils. **Soil and Tillage Research** 155, 166–175, 2016.

AJAYI, A.E., HORN, R. Biochar-induced changes in soil resilience: effects of soil texture and biochar dosage. **Pedosphere** 27, 236–247, 2017.

AL-SHAYEA, N.A. The combined effect of clay and moisture content on the behavior of remolded unsaturated soils. **Engineering Geology**, Amsterdam v. 62, p. 319-342, 2001.

ALVES, A. R. Microestrutura de um argissolo com aplicações de biochar de arroz e soja. 2019. 101p. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) - **Centro de Ciências Rurais, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS**, 2019.

ALVES, A. R. et al. Biochar Amendment Effects on Microstructure Resistance of a Sandy Loam Soil Under Oscillatory Stress. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, p1-11, 2021.

ARAÚJO FILHO, J.C.; CARVALHO, A.; SILVA, F.B.R. Investigações preliminares sobre a pedogênese de horizontes coesos em solos dos tabuleiros costeiros do Nordeste do Brasil. In: **WORKSHOP COESÃO EM SOLOS DOS TABULEIROS COSTEIROS**. Anais. Aracaju: Embrapa Tabuleiros Costeiros, p. 123-142, 2001.

ARAÚJO, A. L. de. Horizontes com caráter coeso e sua distribuição espacial em solos na Formação Barreiras. 2015. Tese de Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas - **Departamento de Solos, Universidade Federal do Ceará, Ceará**, 2015.

ARAÚJO, A. M. S. S. et al. Tensile strength in horizons with and without cohesive character: variability and relation with granulometry. **Catena**, v. 166, p. 290-297, 2018.

BATISTA, R. F. Propriedades reológicas de solos Antárticos afetados por ciclos de congelamento e descongelamento. 2020. 42p. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) - **Centro de Ciências Rurais, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS**, 2020.

BATISTÃO, A. C. Propriedades reológicas de solos afetadas pela matéria orgânica, área superficial específica e salinidade. 2018. 194f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) - **Centro de Ciências Rurais, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS**, 2018.

BATISTÃO, A. C. et al. Soil solution composition affects microstructure of tropical saline alluvial soils in semi-arid environment. **Soil and Tillage Research** 203, 104662, 2020a.

BATISTÃO, A. C. et al. Resilience and microstructural resistance of Archaeological Dark Earths with different soil organic carbon contents in Western Amazonia, Brazil. **Geoderma** 363, 114130, 2020b.

BRAIDA, J. A. et al. Cohesion and angle of internal friction associated with soil organic carbon and water content in Hapludult. **Ciência Rural** 37, 1646–1653, 2007.

BRONICK, C. J.; LAL, R., 2005. Soil structure and management: a review. **Geoderma** 124, 3–22, 2005.

BAUMGARTEN, W. Soil microstructural stability as influenced by physicochemical parameters and its environmental relevance on multiple scales. 2013. Tese de Doutorado. **Inst. für Pflanzenernährung und Bodenkunde**, 2013.

BAUMGARTEN, W.; HORN, R. Assessing soil degradation by using a scale-spanning soil mechanical approach: a review. p. 1-61. In: Krümmelbein, J.; Horn, R.; Pagliai, M., eds. *Advances in geoEcology* 42. **Catena, Cremlingen, Germany**, 2013.

BEZERRA, C. E. E. et al. Genesis of cohesive soil horizons from north-east Brazil: role of argilluviation and sorting of sand. **Soil Research**, v. 53, n. 1, p. 43-55, 2015.

CINTRA, F. L. D. Distribuição do sistema radicular de planta na presença de horizontes coesos. In: **WORKSHOP COESÃO EM SOLOS DOS TABULEIROS COSTEIROS**. Anais. Aracaju, EMBRAPA Tabuleiros Costeiros, p.229-239, 2001.

CINTRA, F. L. D. et al. Efeito de volumes de água de irrigação no regime hídrico de solo coeso dos tabuleiros e na produção de coqueiro. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, n. 4, p. 1041-1051, 2009.

CORNELIS, J. T. et al. Tracing the origin of dissolved silicon transferred from various soil-plant systems towards rivers: a review. **Biogeosciences**, v. 8, p. 89-112, 2011.

CORRÊA, M. M. et al. Caracterização física, química, mineralógica e micromorfológica de horizontes coesos e fragipãs de solos vermelhos e amarelos do ambiente Tabuleiros Costeiros. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, p. 297-313, 2008.

DA SILVA ARAÚJO, A. M. S. et al. Tensile strength in horizons with and without cohesive character: Variability and relation with granulometry. **Catena**, v. 166, p. 290-297, 2018.

DA SILVA, C. P. Gênese do caráter coeso: relação da resistência tênsil com atributos físicos e químicos do solo. 2019. 67 p. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) - **Universidade Federal do Ceará, Fortaleza**, 2019.

DA SILVA, C. P. et al. Cohesive character in Alfisols, Ultisol and Oxisols in northeast of Brazil: Relationship with tensile strength and particle size. **Geoderma Regional**, v. 23, p. e00341, 2020.

DIAS JUNIOR, M. S.; PIERCE, F. J. O processo de compactação do solo e sua modelagem. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 20, n. 2, p. 175-182, 1996.

EDWARDS, A. P.; BREMNER, J. M. MICROAGGREGATES IN SOILS<sup>1</sup>. *edwa* 18, 64–73, 1967.

EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 3 ed. rev. ampl. Brasília: EMBRAPA, 2013. 353 p.

EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. Brasília, DF: Embrapa Solos. E-book. 5.ed, 2018.

FERREIRA, E. B.; CAVALCANTI, P. P.; NOGUEIRA, D. A. ExpDes: An R Package for ANOVA and Experimental Designs. **Applied Mathematics**, v.5, p.2952-2958, 2014.

FONTES, M. P. F.; CAMARGO, O. A. DE; SPOSITO, G. Eletroquímica das partículas coloidais e sua relação com a mineralogia de solos altamente intemperizados. **Scientia Agricola** 58, 627–646, 2001.

FRANCISCO, P. R. M. et al. Classificação climática de Köppen e Thornthwaite para o Estado da Paraíba. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 8, n. 04, p. 1006-1016, 2015.

FREDLUND, D. G.; RAHARDJO, H. **Soil mechanics for unsaturated soils**. New York: John Wiley & Sons, 1993.

GHEZZEHEI, T. A.; OR, D. Rheological properties of wet soils and clays under steady and oscillatory stresses. **Soil Science Society of America Journal** 65, 624–624, 2001.

GIAROLA, N. F. B.; SILVA, A. P. Conceitos sobre solos coesos e *hardsetting*. **Scientia Agricola**, v. 59, p. 613-620, 2002.

GIAROLA, N. F. B. et al. Contribution of natural soil compaction on hardsetting behavior. **Geoderma**, v.113, p.95-108, 2003.

GIAROLA, N. F. B. et al. Similaridade entre o caráter coeso dos solos e o comportamento *hardsetting*: Estudo de caso. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 25, p. 239-247, 2001.

GIAROLA, N. F. B. et al. Mineralogia e cristalografia da fração argila de horizontes coesos de solos nos tabuleiros costeiros. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, n. 1, p. 33-40, 2009.

HILLEL, D. **Environmental soil physics: Fundamentals, applications, and environmental considerations**. San Diego: Academic Press, 1998. 771 p.

HILLEL, D. **Fundamentals of soil physics**. San Diego: Academic Press, 1980. 413 p.

HOLTHUSEN, D.; BATISTÃO, A. C.; REICHERT, J. M. Amplitude sweep tests to comprehensively characterize soil micromechanics: brittle and elastic interparticle bonds and their interference with major soil aggregation factors organic matter and water content. **Rheologica Acta**, 2020.



- HOLTHUSEN, D. et al. Viscoelasticity and shear resistance at the microscale of naturally structured and homogenized subtropical soils under undefined and defined normal stress conditions. **Soil and Tillage Research** 191, 282–293, 2019.
- HOLTHUSEN, D. et al. Controlled vertical stress in a modified amplitude sweep test (rheometry) for the determination of soil microstructure stability under transient stresses. **Geoderma** 295, 129–141, 2017.
- HOLTHUSEN, D. et al. Physical properties of a Luvisol for different long-term fertilization treatments: I. Mesoscale capacity and intensity parameters. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, v. 175, n. 1, p. 4-13, 2012.
- HOLTHUSEN, D.; PETH, S.; HORN, R. Impact of potassium concentration and matric potential on soil stability derived from rheological parameters. **Soil and Tillage Research** 111, 75–85, 2010.
- HORN, R. Stress–strain effects in structured unsaturated soils on coupled mechanical and hydraulic processes. **Geoderma**, v. 116, n. 1, p. 77-88, 2003.
- JACOMINE, P. K. T. Distribuição geográfica, características e classificação dos solos coesos dos Tabuleiros Costeiros. In: **Reunião técnica sobre solos coesos dos Tabuleiros Costeiros**, Cruz das Almas, 1996. Anais. Aracaju, Embrapa, CPATC; CNPMF; IGUFBA, 1996. p. 13-26.
- JACOMINE, P. K. T. Evolução do conhecimento sobre solos coesos no Brasil. In: **WORKSHOP COESÃO EM SOLOS DOS TABULEIROS COSTEIROS**, Aracaju, 2001. Anais. Aracaju, EMBRAPA Tabuleiros Costeiros, p. 19-46. 2001.
- KELLER, T. et al. An interdisciplinary approach towards improved understanding of soil deformation during compaction. **Soil and Tillage Research**, v. 128, p. 61-80, 2013.
- KIMPE, C. R.; LAVERDIERE, M. R.; DEJOU, J. Distribution of silica, sesquioxides, and clay in Quebec podzolic soils and their effects on subsoil cementation. **Soil Science Society America Journal**, Madison, v.47, p.838-840, 1983.
- LAMBE, T. W.; WHITMAN, R.V. **Soil mechanics, SI version**. New York: John Wiley, 1979. 553p.
- LEBERT, M.; HORN, R. A method to predict the mechanical strength of agricultural soils. **Soil and Tillage Research**, v. 19, n. 2, p. 275-286, 1991.
- LIMA NETO, J. A. et al. Atributos químicos, mineralógicos e micromorfológicos de horizontes coesos de Latossolos e Argissolos dos Tabuleiros Costeiros do estado de Alagoas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, p. 473-486, 2010.

- LIMA, H. V. Identificação e caracterização do comportamento físico de solos coesos no estado do Cear. 2004. 85 f. Tese (Doutorado em Agronomia) **Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiróz”, Universidade de São Paulo**, Piracicaba, 2004.
- MANTOVANI, E. C. Compactação do solo. **Embrapa Milho e Sorgo-Artigo em periódico indexado (ALICE)**, 1987.
- MARKGRAF, W.; HORN, R. Rheological-stiffness analysis of K<sup>+</sup>-treated and CaCO<sub>3</sub>-rich soils. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science** 169, 411–419, 2006.
- MARKGRAF, W.; HORN, R.; PETH, S. An approach to rheometry in soil mechanics Structural changes in bentonite, clayey and silty soils. **Soil and Tillage Research** 91, 1–14, 2006.
- MARKGRAF, W. Microstructural changes in soils rheological investigations in soil mechanics. Tese de Doutorado. **Inst. für Pflanzenernährung und Bodenkunde**, 2006.
- MARKGRAF, W.; HORN, R. Scanning electron microscopy– energy dispersive scan analyses and rheological investigations of South-Brazilian soils. **Soil Science Society of America Journal** 71: 851-859, 2007.
- MARKGRAF, W.; HORN, R. Rheological investigations in soil micro mechanics: Measuring stiffness degradation and structural stability on a particle scale. In: GRAGG, L. P.; CASSELL, J. M. **Progress in management engineering**. New York: Nova Science Publishers, 2009. p. 237-279.
- MARKGRAF, W. et al. Influence of organic matter on rheological properties of soil. **Applied Clay Science** 64, 25–33, 2012.
- MENEZES, A. S. et al. Functionality of the porous network of Bt horizons of soils with and without cohesive character. **Geoderma**, v. 313, p. 290-297, 2018.
- McCORMACK, D. E.; WILDING, L. P. Soil properties influencing strength of Cranfield and Geeburg soils. **Soil Science Society American Journal**, Madison, v.43, p. 167-173, 1979.
- MEZGER, T. G. **The Rheology Handbook**. 4ed. Vincentz Network, Hannover, Germany, 2014.
- MITCHELL, J. K. **Fundamentals of soil behavior**. New York: John Wiley, 1976. 422 p.
- MOREAU, A. M. S. S. et al. Caracterização de solos de duas toposequências em Tabuleiros Costeiros do sul da Bahia. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 30, p. 1007-1019, 2006.
- MOTA, J. C. A. et al. Pore shape, size distribution and orientation in Bt horizons of two Alfisols with and without cohesive character from Brazil. **Geoderma Regional**, v. 15, p. e00197, 2018.

MOTA, J. C. A. et al. Cohesive character in Alfisols, Ultisol and Oxisols in Northeast of Brazil: Relationship of tensile strength with silicon, aluminum and iron from poorly crystalline compounds. **Geoderma Regional**, p. e00361, 2021.

MULLINS, C. E. Hardsetting soils. In: SUMNER, M.E., ed. **Handbook of soil science**. New York, CRC Press, p. G65-G87, 1999.

MULLINS, C. E. et al. Hardsetting soils: Behaviour, occurrence and management. **Advances in Soil Science**, v. 11, p. 37-108, 1990.

MUNKHOLM, L. J.; SCHJØNNING, P.; KAY, B. D. Tensile strength of soil cores in relation to aggregate strength, soil fragmentation and pore characteristics. **Soil and tillage research**, v. 64, n. 1-2, p. 125-135, 2002.

NORTHCOTE, K. H. et al. **A description of Australian soils**. Melbourne: CSIRO, 1975.

NORWISH, K.; PICKERING, J. G. **Clay minerals. Soils: An Australian Viewpoint**. CSIRO, Melbourne, pp. 281 – 308, 1983.

PEDROTTI, A. et al. Relação entre atributos físicos, mineralogia da fração argila e formas de alumínio no solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 27, 01–09, 2003.

PÉRTILE, P. et al. Microstructural strength of four subtropical soils evaluated by rheometry: properties, difficulties and opportunities. **Scientia Agricola** 75, 154–162, 2018.

PÉRTILE, P. et al. Rheological parameters as affected by water tension in subtropical soils. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 40, 1–14, 2016.

PÉRTILE, P. Propriedades mecânicas em micro e mesoescala de solos do Rio Grande do Sul. 2015. 164 f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo). **Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS**, 2015.

PINTO, C. D. S. **Curso básico de mecânica dos solos**. São Paulo: Oficina de Textos, 2000.

R CORE TEAM. R: A language and environment for statistical computing. **R Foundation for Statistical Computing**, Vienna, Austria, 2015. Disponível em: <https://www.R-project.org/>. Acesso em: 25/10/20.

REICHERT, J. M. et al. Mecânica do solo. In: VAN LIER, Q. J. (Ed). **Física do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2010. p. 30-102.

REINERT, D. J.; REICHERT, J. M. Coluna de areia para medir a retenção de água no solo – protótipos e teste. **Ciência Rural**, v. 36, n. 6, p. 1931-1935, 2006.

REZENDE, J. O. **Solos coesos dos Tabuleiros Costeiros: Limitações agrícolas e manejo**. Salvador, SEAGRI, 2000. 117 p. (Série Estudos Agrícolas, 1), 2000.

RIBEIRO, M. R. Características morfológicas dos horizontes coesos dos solos dos Tabuleiros Costeiros. In: **WORKSHOP COESÃO EM SOLOS DOS TABULEIROS COSTEIROS**. Anais. Aracaju, Embrapa Tabuleiros Costeiros, 2001. p. 161-168, 2001.

SANTOS, H. G. et al. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 5. ed. rev. e ampl. Brasília, DF: Embrapa, p. 590, 2018.

SCHMIDT, M. Amazonian Dark Earths: pathways to sustainable development in tropical rainforests? Terra Preta Arqueológica: caminhos para o desenvolvimento sustentável nas florestas tropicais? **Amazonian Dark Earths** 8, 28, 2013.

SILVA, A. J. N.; CARVALHO, F. G. Coesão e resistência ao cisalhamento relacionadas a atributos físicos e químicos de um Latossolo Amarelo de tabuleiro costeiro. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, n. 5, p. 853-862, 2007.

SOANE, B. D. The role of organic matter in soil compactibility: A review of some practical aspects. **Soil and Tillage Research** 16, 179–201, 1990.

SPOSITO, G. **The chemistry of soils**, 2nd ed. Oxford University Press, New York, 2008.

STOPPE, N.; HORN, R. Microstructural strength of tidal soils – a rheometric approach to develop pedotransfer functions. **Journal of Hydrology and Hydromechanics** 66, 87–96, 2018.

TISDALL, J. M.; OADES, J. M. Organic matter and water-stable aggregates in soils. **Journal of Soil Science** 33, 141–163, 1982.

VIEIRA, J. M. et al. Contribuição de material amorfo na gênese de horizontes coesos em Argissolos dos Tabuleiros Costeiros do Ceará. **Revista Ciência Agronômica**, v. 43, p. 623-632, 2012.

VITORINO, A. C. T. et al. Mineralogia, química e estabilidade de agregados do tamanho de silte de solos da Região Sudeste do Brasil. **Pesquisa agropecuária brasileira** 38, 133–141, 2003.

WANG, X. et al. Particle characteristics and rheological constitutive relations of high concentration red mud. **Journal of China University of Mining and Technology** 18, 266–270, 2008.

## ANEXOS

## 1. Valores da força normal (N) no início do TVA.

Solo			$F_n$ (N)	
PVAd	Coeso	Topo	48,66	
		Meio	47,11	
		Base	46,16	
	Não coeso	Topo	40,82	
		Meio	48,41	
		Base	43,83	
	PAex abruptico	Coeso	Topo	39,29
			Meio	44,55
			Base	33,30
Não coeso		Topo	42,06	
		Meio	43,71	
		Base	22,79	
PAex típico		Coeso	Topo	43,89
			Meio	45,34
			Base	37,37
	Não coeso	Topo	43,70	
		Meio	32,91	
		Base	40,20	
	PAdx	Coeso	Topo	39,08
			Meio	40,16
			Base	41,05
Não coeso		Topo	33,67	
		Meio	41,27	
		Base	36,20	
LAa		Coeso	Topo	43,85
			Meio	40,92
			Base	42,90
	Não coeso	Topo	29,55	
		Meio	35,75	
		Base	34,58	
	LAdx	Coeso	Topo	39,60
			Meio	31,54
			Base	31,74
Não coeso		Topo	38,57	
		Meio	41,58	
		Base	39,57	

## 2. Valores da umidade antes e depois do TVA.

Solo			Umidade(%)		
			Antes	Depois	Perda
PVAd	Coeso	Topo	13,37	12,00	10,26
		Topo	12,94	11,93	7,83
		Topo	12,26	10,97	10,49
		Meio	12,41	11,74	5,41
		Meio	12,43	11,58	8,45
		Meio	12,15	11,13	8,40
		Base	13,18	13,02	1,18
		Base	12,36	11,24	10,14
		Base	12,92	11,58	10,38
	Não coeso	Topo	14,70	13,12	10,74
		Topo	14,40	14,21	1,31
		Topo	14,16	13,68	3,39
		Meio	15,82	14,27	9,81
		Meio	15,74	15,55	3,28
		Meio	15,57	14,60	9,64
		Base	15,59	14,91	4,38
		Base	15,50	14,99	3,29
		Base	17,11	16,97	0,81
PAex abruptico	Coeso	Topo	11,71	11,19	4,44
		Topo	11,57	11,22	5,20
		Topo	11,65	10,53	8,62
		Meio	10,03	9,11	9,18
		Meio	9,94	8,94	7,08
		Meio	10,77	9,96	7,51
		Base	7,90	7,76	0,70
		Base	8,53	7,70	9,82
		Base	7,82	6,97	10,91
	Não coeso	Topo	10,07	9,22	8,49
		Topo	10,08	9,28	7,95
		Topo	10,24	9,57	6,31
		Meio	8,36	8,14	0,55
		Meio	9,08	8,37	7,80
		Meio	8,84	8,53	3,52
		Base	8,86	8,63	2,53
		Base	8,76	7,97	6,52

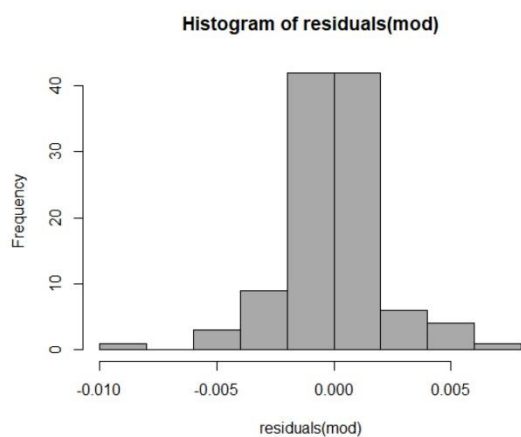
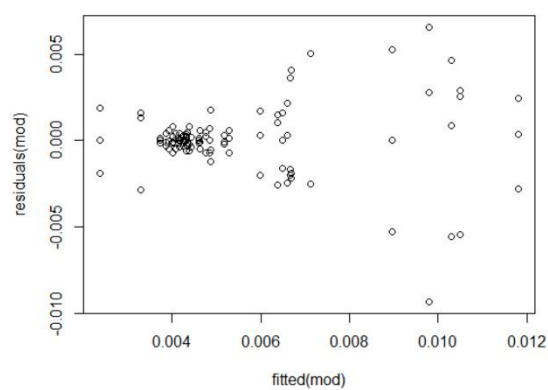
PAex típico	Coeso	Base	8,55	8,12	3,11
		Topo	15,11	13,91	4,52
		Topo	14,06	13,41	4,65
		Topo	14,30	13,33	6,84
		Meio	14,17	13,88	7,42
		Meio	14,43	13,33	7,86
		Meio	13,59	12,75	6,24
		Base	15,15	14,75	2,85
		Base	14,99	13,99	5,07
	Não coeso	Base	14,89	14,18	4,74
		Topo	13,69	12,14	11,32
		Topo	12,97	12,18	6,04
		Topo	12,85	11,58	9,91
		Meio	15,05	14,46	3,89
		Meio	14,23	13,83	2,82
		Meio	13,71	12,86	6,18
		Base	13,82	13,11	5,18
		Base	13,86	12,55	9,43
PAdx	Coeso	Base	14,08	13,06	8,34
		Topo	12,62	10,81	9,28
		Topo	12,69	11,71	7,74
		Topo	12,65	11,52	8,51
		Meio	13,24	12,17	8,06
		Meio	13,06	12,16	4,54
		Meio	13,08	11,51	12,01
		Base	13,92	12,73	8,53
		Base	14,33	13,10	8,58
	Não coeso	Base	14,42	13,30	7,80
		Topo	12,91	12,32	4,53
		Topo	12,52	11,66	6,94
		Topo	15,01	14,73	1,90
		Meio	14,44	13,71	5,06
		Meio	13,83	13,60	1,68
		Meio	14,13	13,65	3,37
		Base	14,81	14,41	2,68
		Base	15,25	14,82	3,74
LAa	Coeso	Base	15,76	14,85	5,72
		Topo	13,10	11,78	7,69
		Topo	13,46	12,18	9,50
		Topo	13,64	12,79	5,55
		Meio	15,75	14,78	3,50
		Meio	15,45	13,92	9,86

		Meio	15,17	13,52	10,88
		Base	15,43	15,10	2,13
		Base	15,67	14,80	5,50
		Base	15,81	14,29	9,64
	Não coeso	Topo	11,49	10,22	11,08
		Topo	11,04	10,41	4,77
		Topo	11,27	10,32	7,93
		Meio	12,19	11,17	8,43
		Meio	12,30	10,97	10,77
		Meio	12,23	10,86	11,25
		Base	12,08	11,23	7,00
		Base	12,25	11,73	2,44
		Base	12,32	11,09	10,01
LAdx	Coeso	Topo	9,93	8,85	13,89
		Topo	10,36	9,59	5,21
		Topo	10,15	9,22	8,10
		Meio	10,42	9,51	8,73
		Meio	11,65	10,85	8,83
		Meio	11,03	10,18	8,75
		Base	10,68	9,61	7,75
		Base	10,52	9,32	11,37
		Base	10,03	9,04	6,21
	Não coeso	Topo	12,82	11,55	9,87
		Topo	13,43	11,99	10,69
		Topo	13,43	12,86	4,27
		Meio	13,06	12,20	6,59
		Meio	13,25	11,91	10,07
		Meio	13,74	12,55	8,68
		Base	13,58	12,34	6,48
		Base	13,48	12,98	3,72
		Base	13,53	12,66	5,10

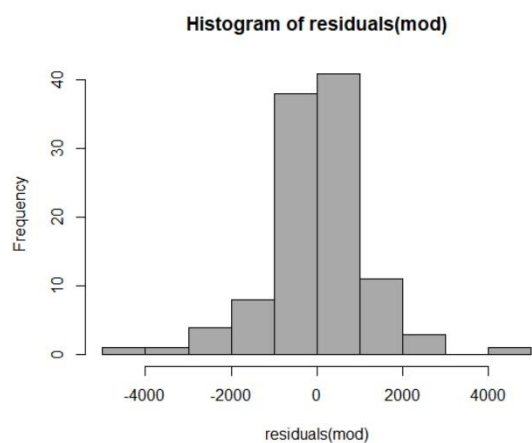
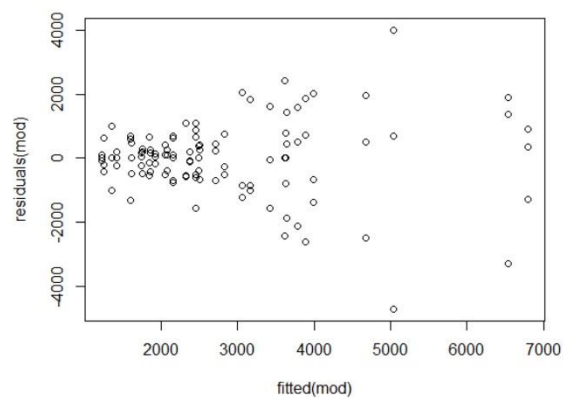
---



3. Histograma da normalidade dos resíduos (A) e homocedasticidade dos resíduos (B) da  $\gamma_{LVR}$ .

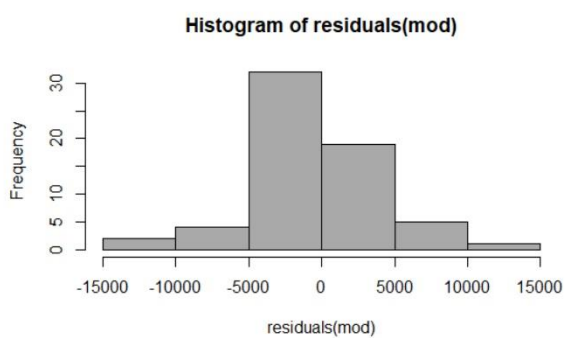
**A****B**

4. Histograma da normalidade dos resíduos (A) e homocedasticidade dos resíduos (B) da  $\tau_{LVR}$ .

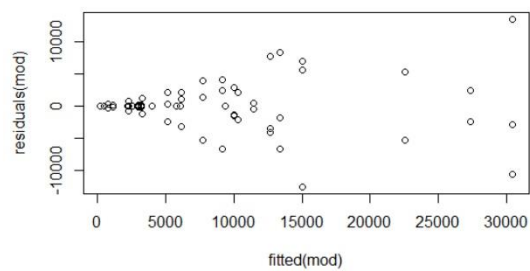
**A****B**

5. Histograma da normalidade dos resíduos (A) e homocedasticidade dos resíduos (B) da  $G'G''\gamma_P$ .

**A**

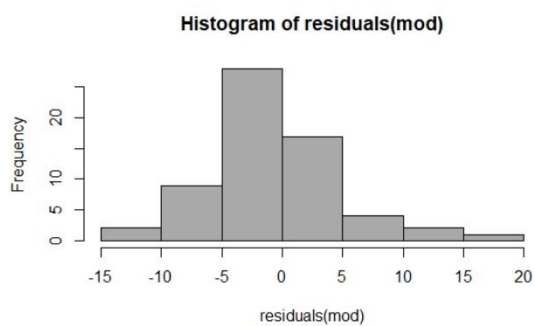


**B**

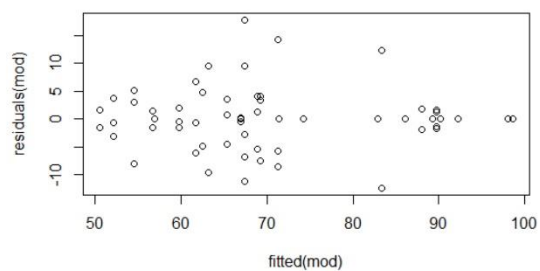


6. Histograma da normalidade dos resíduos (A) e homocedasticidade dos resíduos (B) da  $\gamma_{YP}$ .

**A**

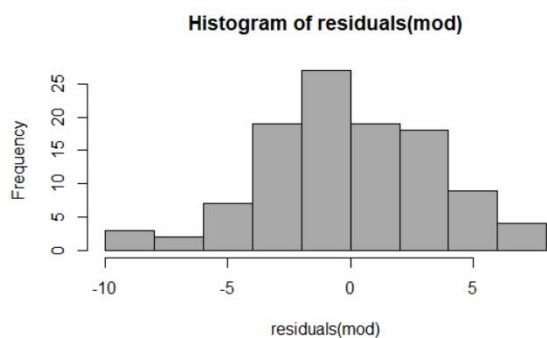


**B**

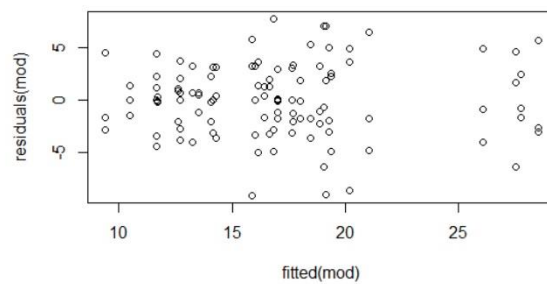


7. Histograma da normalidade dos resíduos (A) e homocedasticidade dos resíduos (B) da  $\tau_{\max}$ .

**A**

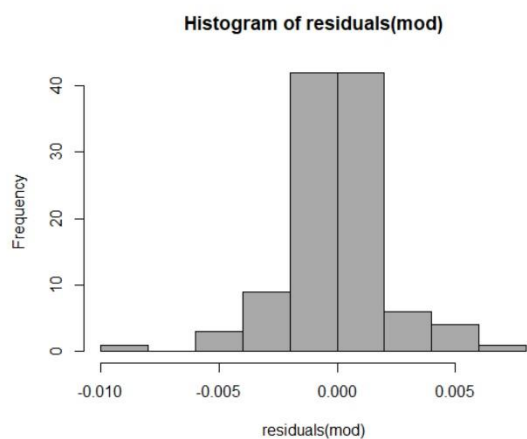


**B**

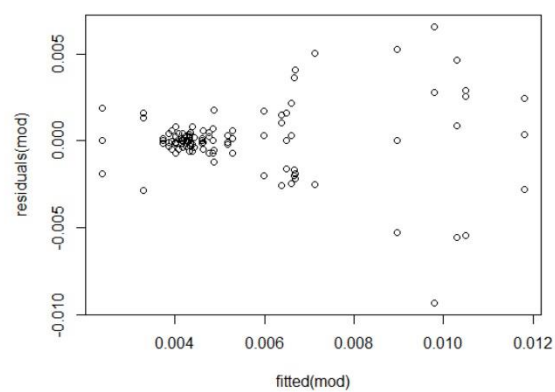


8. Histograma da normalidade dos resíduos (A) e homocedasticidade dos resíduos (B) da  $\gamma_{\tau \max}$ .

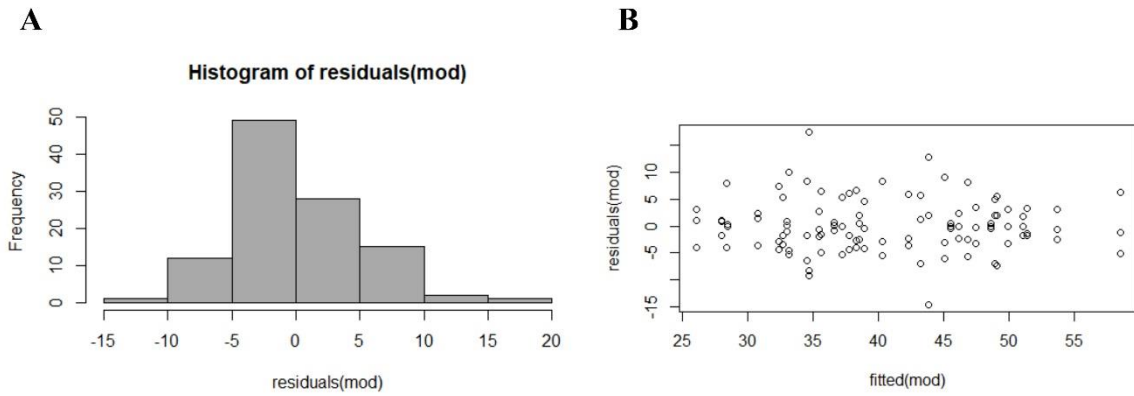
**A**



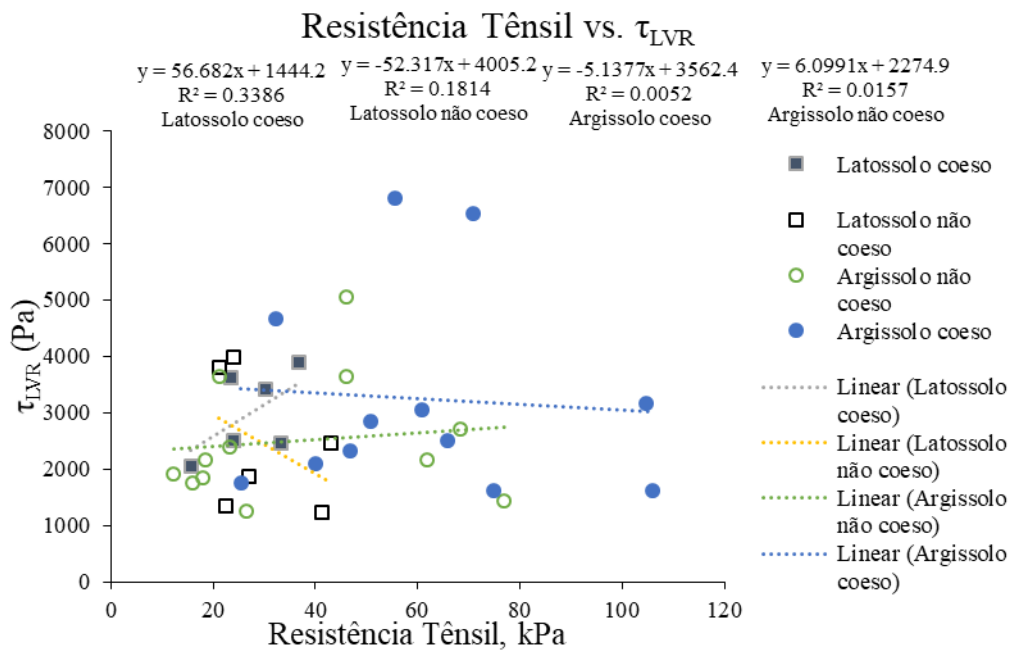
**B**

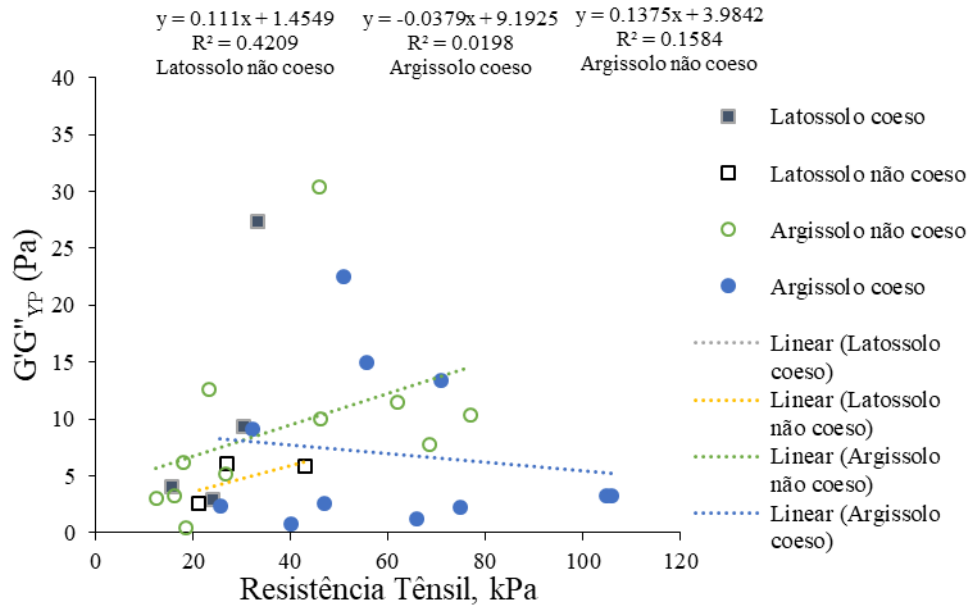
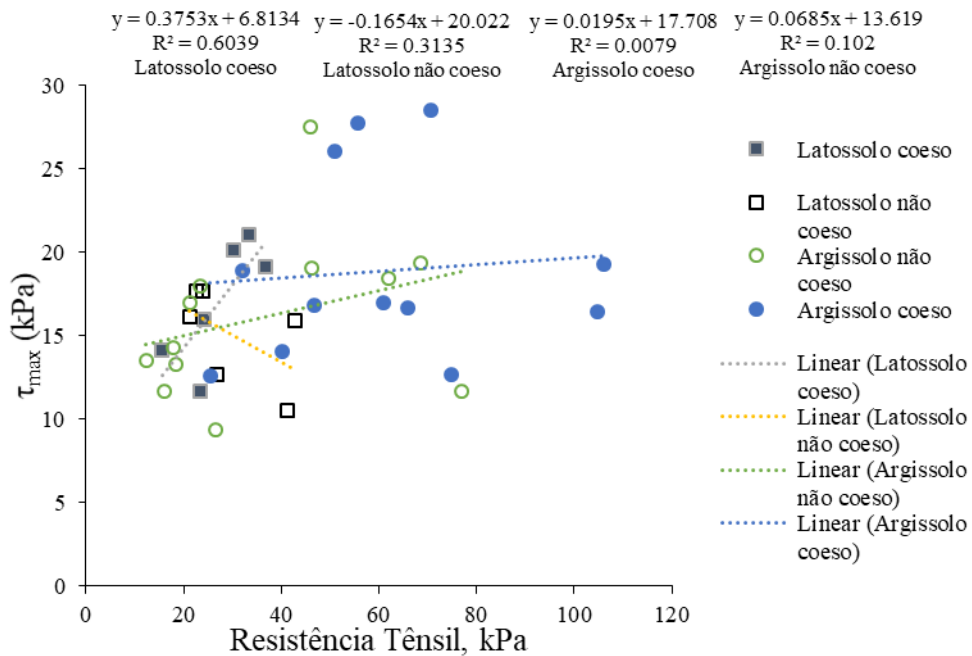


9. Histograma da normalidade dos resíduos (A) e homocedasticidade dos resíduos (B) da integral z.



10. Resistência Tênsil versus propriedades de resistência ao cisalhamento.



Resistência Tênsil vs.  $G''_{YP}$ Resistência Tênsil vs.  $\tau_{max}$ 

11. Resistência Tênsil versus propriedades de viscoelasticidade.

