UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO

TALMO HENRIQUE DOS SANTOS SILVA

# VOLUME ELEMENTAR REPRESENTATIVO EM SOLO COESO, SOB DIFERENTES USOS, TRATADO COM POLIACRILAMIDA: RELAÇÃO COM OS ATRIBUTOS FÍSICOS ASSOCIADOS À ESTRUTURA

Recife 2025

Talmo Henrique dos Santos Silva Engenheiro Agrônomo

Volume elementar representativo em solo coeso, sob diferentes usos, tratado com poliacrilamida: relação com os atributos físicos associados à estrutura

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo da Universidade Federal Rural de Pernambuco, como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Ciência do Solo.

Orientador:

Prof. Dr. Brivaldo Gomes de Almeida

Coorientadores:

Dr. Douglas Monteiro Cavalcante

Dr. José Coelho de Araújo Filho

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação Sistema Integrado de Bibliotecas da UFRPE Bibliotecário(a): Suely Manzi – CRB-4 809

S586v Silva, Talmo Henrique dos Santos.

Volume elementar representativo em solo coeso, sob diferentes usos, tratado com poliacrilamida: relação com os atributos físicos associados à estrutura / Talmo Henrique dos Santos Silva. – Recife, 2025.

70 f.; il.

Orientador: Brivaldo Gomes de Almeida. Co-orientador: José Coelho de Araújo Filho. Co-orientador: Douglas Monteiro Cavalcante.

Tese (Doutorado) – Universidade Federal Rural de Pernambuco, Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Recife, BR-PE, 2025.

Inclui referências e anexo(s).

1. Mitigação das mudanças climáticas - Pernambuco. 2. Polímeros. 3. Cana-de-açúcar. 4. Solo coeso 5. Solos - Umidade. I. Almeida, Brivaldo Gomes de, orient. II. Araújo Filho, José Coelho de, coorient. III. Cavalcante, Douglas Monteiro, coorient. IV. Título

CDD 631.4

# TALMO HENRIQUE DOS SANTOS SILVA

# Volume elementar representativo em solo coeso, sob diferentes usos, tratado com poliacrilamida: relação com os atributos físicos associados à estrutura

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, da Universidade Federal Rural de Pernambuco, como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Ciência do Solo.

Aprovada em 20 de fevereiro de 2025

Prof. Dr. Brivaldo Gomes de Almeida Orientador Universidade Federal Rural de Pernambuco

# BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. André Maciel Netto Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. Ademir de Oliveira Ferreira Universidade Federal Rural de Pernambuco

Prof. Dr. Marcus Metri Corrêa Universidade Federal Rural de Pernambuco

Prof. Dr. Wagner Luís de Souza Silva

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Pernambuco/Campos Barreiros

À minha amada avó (Mãe), **Maria de Lourdes (in memoriam)**. Por toda bondade, dedicação, conselhos e amor transmitido. Seu amor imensurável e sua fé inabalável são moldes da nossa família e esses laços não podem ser desfeitos, pois, em nossos corações eternos são aqueles que amamos.

Á meu avô (Pai), **Amaro Avelino** (in memoriam). Por sua força, amor e cuidados. Sua força, seu amor e cuidados vão ser sempre lembrados.

Á minha amada mãe, **Rosemary**. Por todo amor, cuidados, conselhos e dedicação. Meu amor por você não tem limites.

Á minha esposa, Nairlânia Odora e ao meu filho Théo Henrique. Por todo amor que vocês me transmitem, pelos cuidados, ensinamentos e momentos vividos de tantos que ainda teremos.

#### AGRADECIMENTOS

À **Deus** pela sua imensa bondade e cuidados, por ser meu protetor e guia.

À toda minha família, por todo incentivo e compreensão. Vocês são minha base forte e inabalável.

À minha mãe, **Rosemary**, por toda dedicação e esforço, por todo incentivo aos estudos, por todos os conselhos de vida e cuidados, sem você não conseguiria chegar tão longe, obrigado por ser meu porto seguro e exemplo de vida.

À minha esposa, **Nairlânia Odara**, por toda dedicação, companheirismo, cuidados, incentivos e conselhos durante toda minha trajetória, sem você tudo seria mais difícil.

Ao meu filho, **Théo Henrique**, por renovar minhas forças todos os dias, pelo carinho, brincadeiras, sorrisos e cada momento juntos. Meu amor por você não tem limites.

À minha avó, **Maria de Lourdes** (**in memoriam**), por todos cuidados, dedicação, conselhos, puxões de orelha e por todo amor transmitido. Meu amor por você está cravado em meu coração.

Ao meu irmão, **Rafaelly Enio**, por toda motivação, força e cuidados. Por ser meu amigo e porto seguro fiel, sempre disposto a ajudar e cuidar.

Aos meus sobrinhos, Ananda Rafaelly, Otavio Avelino e Luiz Fernando.

Ao meu primo e amigo, **Rafanele Escio "Junior" (in memoriam**), pela sua amizade, bondade e alegria. A morte nunca irá levar aqueles que mantemos em nossos corações.

Ao meu orientador e amigo, **Prof. Dr. Brivaldo Gomes de Almeida**, meu pai científico, agradeço por todos os anos de dedicação, esforço, conhecimentos compartilhados e por todo o auxílio na conclusão desta pesquisa. Por ser um exemplo de pesquisador e de pessoa, agradeço pelo acolhimento durante todos esses anos, por me auxiliar a me tornar um cientista melhor e por valorizar minhas conquistas. Minha gratidão é imensa.

Aos meus coorientadores **Dr. Douglas Monteiro Cavalcante** e **Dr. José Coelho de Araújo Filho**, por toda dedicação, conhecimentos compartilhados e toda ajuda na realização dessa pesquisa.

Ao meu amigo e técnico do Laboratório de Física do Solo, **José Eudes**, por toda ajuda, dedicação e conselhos. Sua colaboração foi essencial para essa pesquisa.

Aos meus amigos do Laboratório de Física do Solo: **Steffany Daiana**, **Arnaldo Joaquim**, **Alison José**, **Edilson Amaral**, **Paulo Henrique**, **Ana Lua**, **Rhyan Marques**, **Victor Miranda**, **Romulo Batista**, **Alicia Michelon**, **Alice Silva**, pela ajuda e amizade sincera facilitando essa caminhada no doutorado. Os momentos felizes e conversas sobre a vida deixaram minha jornada mais leve, agradeço a todos por tudo.

À Universidade Federal Rural de Pernambuco – UFRPE, por ser minha universidade formadora, desde a graduação até o doutorado. Sendo de grande importância em minha vida acadêmica e profissional.

Ao **Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo** – **UFRPE** e a todos os professores pela dedicação e ensino de excelência. Todas as disciplinas cursadas, todo conhecimento e aprendizado são os alicerces para uma vida profissional de sucesso.

À Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo – UFRPE, em especial à Profa. Dra. Giselle Fracetto por toda disponibilidade, paciência e dedicação.

À Fundação de Amparo à Ciência e Tecnologia do Estado de Pernambuco -FACEPE, pela concessão da bolsa de estudo, sendo parte fundamental para percorrer essa jornada na pesquisa.

Ao **Instituto Agronômico de Pernambuco- IPA** pela disponibilidade da área de estudo e auxílio durante a pesquisa, sendo parte fundamental desse trabalho.

À **Century Química do Brasil Ltda** pela disponibilidade e facilidade na aquisição do polímero, parte importante dessa pesquisa.

À Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – EMBRAPA Solos, Unidade de Execução de Pesquisa e Desenvolvimento de Recife (UEP Recife), pela carta de anuência para a participação do pesquisador Dr. José Coelho de Araújo Filho como Coorientador do doutorando.

"Viver é arriscar tudo! Senão, você é só um amontoado de moléculas aleatórias voando aonde o vento te leva." – Rick **Rick e Morty** 

# Volume elementar representativo em solo coeso, sob diferentes usos, tratado com poliacrilamida: relação com os atributos físicos associados à estrutura

#### **RESUMO**

No Brasil existem solos que apresentam horizontes pedogenéticos subsuperficiais adensados que, quando secos, apresentam forte coesão, restringindo o crescimento de plantas; mas, quando úmidos, sua estrutura se torna muito instável, passando à friável. Esses solos ocorrem predominantemente na unidade geomorfológica denominada Tabuleiros Costeiros, que se estende por grande parte do litoral brasileiro. Uma alternativa promissora para melhorar a condição coesa destes solos é o uso de polímeros. Dentre aqueles utilizados na agrícola, os à base de acrilamida, como a poliacrilamida (PAM), têm ganho destaque nas últimas décadas. A melhoria da qualidade física de solos coesos sob PAM tem sido avaliada pelo uso de parâmetros mais sensíveis às alterações da estrutura do solo. Porém, a precisão e exatidão dos resultados desses parâmetros físicos têm relação direta com a escolha correta do tamanho da amostra, devendo-se considerar um volume de solo que seja estatisticamente representativo e adequado para a sua caracterização. A identificação do menor volume para o qual se pode obter uma medida confiável para um determinado parâmetro é a base para a definição do termo "Volume Elementar Representativo (VER)". Nesse contexto, o objetivo da pesquisa foi definir o VER para uma área sob duas diferentes coberturas vegetais: uma sob mata nativa; e outra em pousio; para avaliar a redução da coesão dos solos e melhoria da sua qualidade física via uso da PAM. O experimento foi conduzido em áreas da estação experimental de Itapirema, do Instituto Agronômico de Pernambuco, em Goiana, Zona da Mata Norte de Pernambuco. Assim, na área experimental, foram selecionadas duas subáreas, em função da cobertura vegetal, sendo: uma sob mata nativa (controle); e outra atualmente em pousio, há aproximadamente 10 anos, antes cultivada com cana-de-açúcar. Nessas subáreas, a partir da abertura de perfis, foram realizados três tipos de amostragem: i) cilindros volumétricos, com aproximadamente 20; 50; 100, 150; 200 e 250 cm<sup>3</sup>; ii) em blocos de solos; iii) amostras não estruturadas. No laboratório, as amostras em cilindros e em blocos foram subdivididas em dois grupos, para aplicação dos tratamentos, por capilaridade, sendo: controle, apenas H<sub>2</sub>O; e com PAM, na concentração de 0,1 g L<sup>-1</sup>. Na sequência, uma parte dos blocos foi utilizada para sua subdivisão em agregados, com tamanhos específicos, em função dos ensaios para determinação dos atributos físicos dos solos. As amostras em cilindro foram destinadas aos ensaios de porosidade total (Pt) e sua distribuição em classes de tamanho de poros (macro, meso, micro e criptoporosidade); condutividade hidráulica saturada (Ksat); curva característica de retenção de água no solo (CCRAS); resistência do solo à penetração de raízes (Rp) e densidade do solo (Ds). As amostras em agregados foram usadas para determinar a resistência tênsil de agregados (Rt). Os resultados apontam que o VER para os atributos físico-hídricos do solo foi definido para 100 cm<sup>3</sup>, o qual apresentou menor variação nos dados obtidos entre os volumes estudados. Em relação à Rt, o tamanho indicado foi para agregados > 2 cm de diâmetro, sendo o VER definido para agregados com 3 cm, onde os valores de Rt, a partir desse diâmetro, são menos heterogêneos. Além disso, o uso da PAM foi eficaz em promover a melhoria da estabilidade estrutural dos solos coesos das duas subáreas, refletida em outros atributos físicos, como a redução da Rt para os agregados menores. Da mesma forma, o uso da PAM aumentou e uniformizou a distribuição de água no solo, caracterizada pelo aumento da água disponível às plantas, confirmada pela mudança no comportamento das CCRAS, associada aos poros menores (microporos e criptoporos), que aumentam a retenção de água. Entretanto, a aplicação do PAM elevou a Rp e, em alguns casos, a Ds, contribuindo para a redução dos poros maiores, como os macroporos e mesoporos.

Palavras-chave: Mitigação da coesão. Polímero. Cana-de-açúcar. Tabuleiros Costeiros.

Representative elementary volume in cohesive soil under different uses, treated with polyacrylamide: relationship with physical attributes associated with structure

#### ABSTRACT

In Brazil, some soils have dense subsurface pedogenetic horizons that, when dry, exhibit strong cohesion, restricting plant growth; however, when wet, their structure becomes highly unstable, transitioning to a friable state. These soils predominantly occur in the geomorphological unit known as the Coastal Tablelands, which extends across much of the Brazilian coastline. A promising alternative for improving the cohesive condition of these soils is the use of polymers. Among those used in agriculture, acrylamide-based polymers, such as polyacrylamide (PAM), have gained prominence in recent decades. The improvement of the physical quality of cohesive soils treated with PAM has been evaluated using parameters that are more sensitive to changes in soil structure. However, the precision and accuracy of the results of these physical parameters are directly related to the correct choice of sample size, requiring consideration of a soil volume that is statistically representative and suitable for characterization. Identifying the smallest volume that provides a reliable measurement for a given parameter is the basis for defining the term "Representative Elementary Volume (REV)". In this context, the objective of the research was to define the REV for an area under two different vegetation covers: one under native forest and another in fallow, in order to assess the reduction of soil cohesion and the improvement of its physical quality through the use of PAM. The experiment was conducted in areas of the Itapirema Experimental Station of the Agronomic Institute of Pernambuco, in Goiana, in the Northern Forest Zone of Pernambuco. Thus, in the experimental area, two subareas were selected based on vegetation cover: one under native forest (control) and another currently in fallow for approximately 10 years, previously cultivated with sugarcane. In these subareas, after profile excavation, three types of sampling were conducted: volumetric cylinders of approximately 20, 50, 100, 150, 200, and 250 cm<sup>3</sup>; soil blocks; and unstructured samples. In the laboratory, the samples in cylinders and blocks were subdivided into two groups for treatment application by capillarity: control (only H<sub>2</sub>O) and PAM at a concentration of 0,1 g L<sup>-</sup> <sup>1</sup>. Subsequently, part of the blocks was used for subdivision into aggregates of specific sizes, depending on the tests for determining soil physical attributes. The cylinder samples were used for tests on total porosity (Pt) and its distribution into pore size classes (macro, meso, micro, and cryptoporosity); saturated hydraulic conductivity (Ksat); soil water retention characteristic curve (CCRAS); soil penetration resistance to roots (Rp); and soil bulk density (Ds). The aggregate samples were used to determine aggregate tensile strength (Rt). The results indicate that the REV for soil physical-hydraulic attributes was defined as 100 cm<sup>3</sup>, which showed the least variation in data among the studied volumes. Regarding Rt, the recommended size was for aggregates >2 cm in diameter, with the REV defined for aggregates of 3 cm, where Rt values from this diameter onward were more homogeneous. Furthermore, PAM was effective in improving the structural stability of cohesive soils in both subareas, as reflected in other physical attributes, such as a reduction in Rt for smaller aggregates. Similarly, PAM use increased and standardized soil water distribution, characterized by an increase in available water for plants, confirmed by changes in CCRAS behavior associated with smaller pores (micropores and cryptopores), which enhance water retention. However, PAM application increased Rp and, in some cases, Ds, contributing to the reduction of larger pores, such as macropores and mesopores.

Keywords: Mitigation of soil cohesion. Polymer. Sugarcane. Coastal Tablelands

# LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Mapa de localização da área de estudo situada na Estação Experimental do
Instituto Agronômico de Pernambuco (IPA)22
Figura 2 - Área de mata nativa (a) e perfil do Argissolo Amarelo Distrocoeso epirredóxico
aberto na área de estudo (b)23
Figura 3 - Área em resiliência com pastagem (a) e perfil do Argissolo Amarelo Distrocoeso
epirredóxico aberto na área de estudo (b)23
Figura 4 - Cilindros volumétricos utilizados na coleta dos solos (20 até 250 cm <sup>3</sup> )24
Figura 5 - Bloco de solo esculpido no perfil (a); removidos do perfil e acondicionados em
plástico filme e plástico bolha (b)24
Figura 6 - Difratograma de raio X do Argissolo Amarelo Distrocoeso epirredóxico27
Figura 7 - Amostras coletadas em cilindros volumétricos (a); e em bloco de solo (b), ambas
submetidas ao processo de saturação com os tratamentos (água e PAM)28
Figura 8 - Preparação de agregados para ensaios de resistência tênsil (a), para obtenção da
faixa de volumes de agregados com base em diâmetros (b)
Figura 9 - Permeâmetro de carga constante e seus aparatos
Figura 10 - Mesa de tensão e distribuição espacial dos conjuntos cilindro-amostra31
Figura 11 - Sistema de câmaras de Richards de alta e baixa pressão (a), com detalhe da
distribuição espacial dos conjuntos cilindro-amostra na câmara de baixa pressão (b)32
Figura 12 - Penetrômetro eletrônico de bancada utilizado para os ensaios de resistência do
solo à penetração de raízes (a); com detalhe para o efeito de bordadura (b)33
Figura 13 - Curva característica de retenção de água no solo da área de mata sem PAM, para
os seis tamanhos das amostras avaliados. Log kPa = Logaritmo do $\Psi$ em quilopascal45
Figura 14 - Curva característica de retenção de água no solo da área de mata com PAM, para
os seis tamanhos das amostras avaliados. Log kPa = Logaritmo do $\Psi$ em quilopascal45
Figura 15 - Curva característica de retenção de água no solo da área de pousio sem PAM para
os seis tamanhos das amostras avaliados. Log kPa = Logaritmo do $\Psi$ em quilopascal46
Figura 16 - Curva característica de retenção de água no solo da área de pousio com PAM
para os seis tamanhos das amostras avaliados. Log kPa = Logaritmo do $\Psi$ em quilopascal47
Figura 17 - Resistência do solo à penetração de raízes, na área de mata sem PAM, e sua
relação com a umidade volumétrica do solo, para os seis tamanhos das amostras avaliados48
Figura 18 - Resistência do solo à penetração de raízes, na área de mata com PAM, e sua
relação com a umidade volumétrica do solo, para os seis tamanhos das amostras avaliados48

Figura 19 - Resistência do solo à penetração de raízes, na área em pousio sem PAM, e sua	
relação com a umidade volumétrica do solo, para os seis tamanhos das amostras avaliados.	49
Figura 20 - Resistência do solo à penetração de raízes, na área em pousio com PAM, e sua	
relação com a umidade volumétrica do solo, para os seis tamanhos das amostras avaliados.	50
Figura 21 - Agrupamento dos diferentes diâmetros de agregados com e sem PAM para	
resistência tênsil de agregados na área de mata pelo gráfico de Demsar	52
Figura 22 - Agrupamento dos diferentes diâmetros de agregados com e sem PAM para	
resistência tênsil de agregados na área de pousio pelo gráfico de Demsar	53

# LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Análise granulométrica, densidade de partículas sólidas do solo e classificação
textural do Argissolo Amarelo Distrocoeso epirredóxico para as duas áreas (mata e pousio).25
<b>Tabela 2</b> - Análise química do Argissolo Amarelo Distrocoeso epirredóxico
<b>Tabela 3</b> - Análise de formas de ferro do Argissolo Amarelo Distrocoeso epirredóxico27
<b>Tabela 4</b> - Propriedades da poliacrilamida aniônica, Superfloc A–130.28
<b>Tabela 5</b> – Volumes aproximados e dimensões médias reais dos cilindros utilizados
Tabela 6 - Comparação dos diferentes volumes das amostras, com e sem a aplicação do
PAM, na área de mata para diferentes atributos físicos
Tabela 7 - Comparação dos diferentes volumes de cilindros com e sem a aplicação do PAM
na área de pousio para diferentes atributos físicos41
Tabela 8 - Comparação dos diferentes diâmetros de agregados com e sem a aplicação do
PAM na área de mata e pousio para resistência tênsil de agregados51
Tabela 9 - Valores dos atributos físicos do solo nas amostras (volumes dos cilindros) que
foram estabelecidos como o volume elementar representativo (VER) em cada atributo
avaliado com e sem a aplicação da PAM nas áreas de mata e pousio54
Tabela 10 - Valores da resistência tênsil de agregados na área de mata e pousio referentes aos
diâmetros dos agregados que foram estabelecidos como o volume elementar representativo
(VER), com e sem a aplicação da PAM55
Tabela 11 - Análise de variância dos dados do experimento para área de Mata68
Tabela 12 - Análise de variância dos dados do experimento para área de Pousio.       70

1	IN	TRODUÇÃO	15
	1.1	Hipóteses	17
	1.2	Objetivos	17
	1.2	2.1 Objetivo Geral	17
	1.2	2.2 Objetivos Específicos	17
2	RI	EVISÃO DE LITERATURA	18
	2.1	Tabuleiros Costeiros	18
	2.2	Estrutura do solo e volume elementar representativo	19
	2.3	Uso do polímero de poliacrilamida	20
3	M	ATERIAL E MÉTODOS	22
	3.1	Seleção da área experimental e coleta dos solos	22
	3.2	Pré-tratamento das amostras	28
	3.3	Atributos físico-hídricos dos solos	30
4	PF	ROCESSAMENTO DOS DADOS	34
5	RI	ESULTADOS E DISCUSSÃO	34
	5.1	Avaliação dos atributos físicos da área de mata com e sem aplicação da PAM	34
	5.2	Avaliação dos atributos físicos da área de pousio com e sem aplicação da PAM	40
	5.3 e sen	Curva característica de retenção de água no solo para as áreas de mata e pousio c n aplicação da PAM	om 44
	5.4 aplic	Resistência do solo à penetração de raízes das áreas de mata e pousio com e sem	47
	5.5	Resistência tênsil dos agregados dos solos das áreas de mata e pousio com e sem	
	aplic	cação da PAM	50
	5.6	Volume elementar representativo para os atributos avaliados	53
6	CO	ONCLUSÕES	56
R	EFE	RÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	57
		~	

# SUMÁRIO

ANEXO B - DESCRIÇÃO MORFOLÓGICA DO PERFIL66										
ANEXO	С	-	TABELAS	DE	ANÁLISE	DE	VARIÂNCIA	DOS	DADOS	DO
EXPERIMENTO PARA ÁREAS DE MATA E POUSIO68										

# 1 INTRODUÇÃO

No Brasil existem solos que ocorrem, principalmente, em unidade geomorfológica denominada Tabuleiros Costeiros (TC), que apresentam horizontes pedogenéticos subsuperficiais adensados, que foram distinguidos dos demais a partir da sua classificação, criando-se o termo "caráter coeso". Estes solos, quando secos, apresentam forte coesão, restringindo o crescimento de plantas; mas, quando úmidos, sua estrutura torna-se muito instável, passando à friável, esboroando ao contato direto com a água.

Em Pernambuco, a ocorrência de solos coesos está relacionada a áreas de TC e Mares de Morros, que são cultivadas principalmente com cana-de-açúcar. Apesar das condições favoráveis ao uso dos solos dos TC, em virtude do relevo plano a suave ondulado, as camadas coesas atuam como barreiras, alterando significativamente a dinâmica da água no solo. Essa característica dificulta a infiltração da água, favorecendo o escoamento superficial e podendo levar ao encharcamento temporário das camadas superficiais. Além disso, essas camadas comprometem a recarga dos lençóis freáticos, impactando diretamente o desenvolvimento das plantas.

Os horizontes coesos têm sido objeto de estudo nos últimos anos, no entanto não há um entendimento definido sobre o manejo para maximizar a produtividade e longevidade das culturas. Uma alternativa promissora para melhoria da condição coesa nesses solos é a aplicação de polímeros, e dos utilizados para uso agrícola, aqueles à base de acrilamida, como a poliacrilamida (PAM), tem recebido maior destaque nas últimas décadas. O uso de PAM em solos coesos tem aumentado a estabilidade dos agregados, promovendo maior retenção de água pelos poros do solo, além de reduzir a resistência tênsil dos agregados, o que favorece a uma maior penetração do sistema radicular. Além disso, o uso da PAM como técnica para a melhoria da retenção de água e a redução da compactação do solo favorece práticas agrícolas mais sustentáveis, com menor impacto ambiental em relação as técnicas tradicionais, contribuindo para melhoria da qualidade do solo.

Nesse sentido, a qualidade do solo é frequentemente quantificada por meio de seus atributos, com destaque para os físicos, químicos e biológicos. Entre os atributos físicos, os mais usados para esta avaliação são aqueles que estão relacionados ao arranjamento das partículas e do espaço poroso do solo. Destes, destacam-se: densidade do solo; porosidade; condutividade hidráulica saturada; resistência tênsil de agregados; resistência do solo à penetração de raízes e índices de estabilidade de agregados.

Desse modo, a melhoria da qualidade física de solos coesos sob PAM tem sido avaliada pelo uso de parâmetros mais sensíveis às alterações da estrutura do solo, sejam estas induzidas pelas práticas de manejo, ou pelo uso de condicionadores químicos aos solos. Entretanto, a precisão e exatidão dos resultados desses atributos físicos têm relação direta com a escolha correta do método a ser utilizado na sua respectiva determinação, bem como a amostragem, que deve considerar um volume de solo que seja estatisticamente representativo e adequado para a sua caracterização.

Nesta perspectiva, considerando o solo como um sistema trifásico (sólido, líquido e gasoso) e heterogêneo, os atributos físicos que dependem do arranjamento estrutural variam consideravelmente dentro de um volume. A identificação do menor volume para o qual se pode obter uma medida confiável para um determinado parâmetro é a base para definição do termo "Representative Elementary Volume (REV)" ou "Volume Elementar Representativo (VER)".

Nesse sentido, o VER é definido como o menor volume de uma amostra a partir do qual o resultado de um atributo se torna independentemente do tamanho da amostra, sendo suficiente para representar as características e heterogeneidades do corpo de prova. Por esse ângulo, a definição do VER para os atributos físicos de solos tornará as amostragens e análises mais eficientes e confiáveis, aperfeiçoando a aplicabilidade em diagnosticar problemas relacionados ao manejo de solos, como no caso dos solos coesos sob uso de PAM.

Neste contexto, esta pesquisa teve como objetivo definir o VER como medida representativa para os ensaios dos atributos físicos do solo que dependem da estrutura; e, a partir dele, avaliar a eficiência do uso da poliacrilamida na atenuação do caráter coeso dos solos dos TC, em função do uso do solo (mata e em pousio). A definição do VER garantirá que as amostras sejam representativas, tornando as medidas mais confiáveis para os ensaios destinados à determinação de atributos físicos dependentes da estrutura do solo.

Assim, a partir da definição do VER será possível avaliar o uso da poliacrilamida em solos coesos, utilizando atributos diagnósticos confiáveis, podendo-se propor técnicas de manejo desses solos. Desse modo, pode-se testar as hipóteses definidas em função da melhoria da condição estrutural, e seus reflexos na disponibilidade de água às plantas e na produtividade da cultura na região dos TC.

#### 1.1 Hipóteses

• A definição do volume elementar representativo (VER) aumenta a confiabilidade na determinação dos atributos do solo, garantindo o uso de amostras com tamanho adequado para cada caso e contribui para maior precisão e exatidão nos resultados;

• A definição do VER para amostras de solos estruturados melhora a detecção de alterações nos atributos físicos dos solos coesos sob o efeito da aplicação de poliacrilamida (PAM);

• O uso do VER melhora a eficiência dos atributos físicos do solo, especialmente aqueles dependentes da estrutura, na sua aplicabilidade como indicadores da melhoria da condição estrutural de solos coesos sob a ação da PAM. Entre esses atributos, destacam-se: densidade do solo (Ds); porosidade total (Pt) e sua distribuição em classes de tamanho de poros - DTP (macro, meso, micro e criptoporosidade); condutividade hidráulica saturada (Ksat); curva característica de retenção de água no solo (CCRAS); resistência tênsil de agregados (Rt); resistência do solo à penetração de raízes (Rp).

#### 1.2 Objetivos

#### 1.2.1 Objetivo Geral

• Definir o volume elementar representativo (VER) para avaliar a condição estrutural de solos coesos com e sem a ação do polímero à base de poliacrilamida (PAM), verificando a sua eficiência e aplicabilidade na melhoria do diagnóstico da redução da coesão a partir dos resultados obtidos pelos atributos físicos dos solos, utilizando amostras com diferentes tamanhos.

#### 1.2.2 Objetivos Específicos

• Identificar o tamanho da amostra (cilindros volumétricos com 20; 50; 100, 150; 200 e 250 cm<sup>3</sup> e agregados com 2, 3, 4, 5 e 6 cm de diâmetro), que expresse o VER para determinação de cada atributo físico dos solos avaliados;

• Determinar atributos físico-hídricos utilizados na avaliação da qualidade estrutural dos solos coesos (Ds; Pt; DTP; Ksat; CCRAS; Rt; e Rp), determinados nas amostras com e sem PAM;

• Comparar os tratamentos (com e sem aplicação de PAM) dentro de cada área de forma isolada (mata nativa e pousio), avaliando as alterações por meio dos atributos físicos do solo.

### 2 REVISÃO DE LITERATURA

#### 2.1 Tabuleiros Costeiros

Os Tabuleiros Costeiros são unidades geomorfológicas relacionados a depósitos sedimentares da Formação Barreiras, tendo origem no período Terciário (LIMA et al., 2005; RÊGO et al., 2019; DIAS et al., 2021). Em sua maioria possui relevo plano a suavemente ondulado, com distribuição em quase todo o litoral brasileiro (JACOMINE, 1996). A exploração dessas áreas é principalmente por cultivo de pastagens, cana-de-açúcar, eucaliptos e coco verde.

Em relação às limitações, os solos dos Tabuleiros Costeiros apresentam horizontes coesos, que afetam tanto o crescimento radicular como a dinâmica da água do solo e sua aeração (REZENDE, 2000). O caráter coeso não é particularidade do Brasil, na Austrália, horizontes com esse tipo de endurecimento é denominado de hardsetting (McDONALD et al., 1990; GIAROLA et al., 2001). O caráter coeso pode ocorrer de forma natural por obstrução de poros, cimentação de compostos orgânicos, adensamento com consequente mudança na estrutura, mudanças nos ciclos de secagem e umedecimento (GIAROLA et al., 2001; VIEIRA et al., 2012; PIRES et al., 2024).

Solos que apresentam o caráter coeso têm comportamentos distintos em função do seu conteúdo de água. Quando secos, são extremamente duros, apresentam consistência variando de muito dura a extremamente dura, com elevada resistência à penetração de faca ou martelo pedológico, impedindo o desenvolvimento radicular das plantas, resultando em diminuição no crescimento e produção agrícola (MOREAU et al., 2006; LIMA NETO et al., 2009; HUOT et al., 2025). Quando úmidos, sua estrutura se desfaz, esboroando-se, o que causa falta de sustentação às plantas e drenagem insuficiente (GIAROLA, et al., 2001; LIMA et al., 2004).

As classes de solos que se destacam em áreas de Tabuleiros Costeiros são os Latossolos Amarelos e Argissolos Amarelos e Acinzentados (JACOMINE, 1996; CORRÊA et al., 2008; VIEIRA et al.; 2012). Em geral, ocorre em profundidade entre 30 a 70 cm ou até mais de 100 cm, em horizontes transicionais AB e/ou BA, podendo atingir o Bw ou coincidir com o Bt (EMBRAPA, 2018).

Um conjunto de atributos físicos podem ser utilizados para detecção de horizontes coesos, como: densidade do solo; porosidade total; distribuição de tamanho de poros; condutividade hidráulica; curva de retenção de água, resistência tênsil e resistência do solo à penetração de raízes (GIAROLA et al., 2001; LIMA et al., 2004; VIEIRA et al., 2012; MOTA,

et al., 2018).

#### 2.2 Estrutura do solo e volume elementar representativo

A estrutura do solo pode ser definida como o resultado do arranjo espacial das partículas sólidas do solo, como: areia; silte e argila, incluído componentes como a matéria orgânica, carbonatos e vazios do solo, também denominados de espaços porosos, para formar agregados ou arranjos estruturais (BRONICK LAL, 2005; RABOT et al., 2018). A estrutura do solo é considerada um fator chave para o funcionamento do solo, pois, atua como regulador da infiltração de água, resistência à erosão e trocas gasosas, é local para penetração de raízes e consequente sustentação vegetal, contribui na retenção de água, sendo habitat para microrganismos, onde ocorre reciclagem de nutrientes e dinâmica da matéria orgânica (BRONICK; LAL, 2005; RABOT et al., 2018).

O mecanismo diretamente ligado a formação da estrutura do solo é o de agregação do solo que teve o trabalho de Tisdall e Oades (1982), como destaque. Os agregados tendem a se formar em etapas, onde os microagregados se unem para formar macroagregados (EDWARDS; BREMNER, 1967; TISDALL; OADES, 1982; TANG et al., 2024). A união das partículas sólidas do solo dá origem a diferentes tamanhos de poros, esses poros são denominados de poros texturais, como alguns microporos e os criptoporos. Enquanto, poros resultantes de atividade biológica, clima e manejo são denominados de poros estruturais, como os macro, meso e alguns microporos (PREVEDELLO; ARMINDO, 2015; RABOT et al., 2018).

Para a real avaliação da condição estrutural do solo é necessário o uso de atributos físicos que estejam relacionados ao arranjamento das partículas e do espaço poroso do solo, dentre eles se destacam: densidade do solo; porosidade e sua distribuição por tamanho de poros; condutividade hidráulica saturada; curva característica de retenção de água no solo; resistência tênsil de agregados; resistência do solo à penetração de raízes e os índices de estabilidade de agregados (GIAROLA et al., 2001; LIMA et al., 2004; VIEIRA et al., 2012; MOTA, et al., 2018).

No entanto, a precisão e exatidão dos resultados desses atributos físicos têm relação direta com escolha correta do método a ser utilizado na sua respectiva determinação. Neste sentido, um exemplo de seleção de método pode ser ilustrado pela densidade do solo (Ds). Para tanto, considera-se dois métodos: o do torrão (parafinado) e o do cilindro volumétrico (GROSSMAN; REINSCH, 2002; ALMEIDA et al., 2017b). No primeiro caso, apesar da metodologia indicar que o volume representativo para a amostra do torrão pode variar entre 50

e 250 cm3, não há informações sobre o volume-limite, a partir do qual o aumento da amostra não promoverá mudanças significativas nos resultados da Ds. Para o segundo caso, quando as amostras são coletadas em cilindro volumétrico, alguns poucos trabalhos concluíram que cilindros com volume  $\approx 100$  cm<sup>3</sup> ( 5 cm X 5 cm, de diâmetro e altura respectivamente) é a opção mais adequada (SANTOS, 2014).

Nesta perspectiva, considerando o solo como um sistema trifásico e heterogêneo (HILLEL, 1998), os atributos físicos que dependem do arranjamento estrutural variam consideravelmente dentro de um volume. Portanto, para determinar tais atributos, a amostragem deve considerar um volume de solo que seja estatisticamente representativo e adequado para a sua caracterização (VIK; BASTESEN; SKAUGE, 2013; GASPARETO et al., 2023).

Esse volume representativo foi proposto por Bear (1972), que o definiu o termo "Representative Elementary Volume (REV)" ou "Volume Elementar Representativo (VER)", que seria o menor volume para o qual se pode obter uma medida confiável para um determinado parâmetro (BEAR, 1975). Assim, o VER pode ser obtido a partir da seleção de tamanhos que formem um gradiente em torno de um ponto central de uma amostra.

Portanto, quando se aumenta o tamanho do volume amostral, há uma tendência de estabilização da propriedade analisada ao se atingir o volume representativo, onde as propriedades macroscópicas se tornam relativamente insensíveis à pequenas alterações de volumes, obtendo-se as medidas de tais propriedades com alto grau de confiabilidade (CORBETT; ANGGRAENE; BOWDEN, 1999; FISCHER, 2019).

Por esse ângulo, a definição do VER, para os atributos físicos de solos, será útil para aumentar a eficiência destes enquanto indicadores de qualidade física de solos. Consequentemente, possibilitará aperfeiçoar sua aplicabilidade em diagnosticar problemas relacionados com o manejo inadequado em solos (degradação) ou características intrínsecas, como a presença de horizonte coeso.

#### 2.3 Uso do polímero de poliacrilamida

A poliacrilamida é um polímero constituído à base de monômeros de acrilamida, podendo variar em peso molecular, carga iônica e densidade de carga. A carga iônica pode ser positiva, negativa ou neutra, dependendo da substituição da componente amina (NH<sub>2</sub>) presente na cadeia. O peso molecular varia em relação a extensão da cadeia do polímero, a qual é diretamente proporcional ao peso molecular. Em relação a densidade de carga, a quantidade de substituições da NH<sub>2</sub> na cadeia do polímero é que vai definir essa densidade. As poliacrilamidas aniônicas apresentam baixos teores de acrilamida e elevado peso molecular, não é toxico, sendo ambientalmente mais seguros para o uso na agricultura (SOJKA et al., 2007; LABAHN et al., 2010; LU; WU; WEI, 2012; THAKUR; THAKUR; VOICU, 2018).

As cadeias de polímeros podem ser lineares, ramificadas ou reticuladas. As lineares tendem a parecer uma corda contínua, as ramificadas formam grandes estruturas isoladas e as reticuladas são conectadas entre si. As mudanças que ocorrem no ambiente tendem a contribuir na alteração da estrutura e no teor de água do polímero (THAKUR; THAKUR; VOICU, 2018).

A poliacrilamida (PAM) é utilizada para tratamento em águas residuais, mas, trabalhos recentes destacam a utilização desse polímero para atenuação da coesão em solos. Além da provável redução da coesão, o uso da PAM tem contribuído na atenuação da perda de solo e nutrientes por lixiviação (LI; WANG, 2016; YUAN, et al., 2017). Outro benefício da PAM em solos coesos é o aumento da disponibilidade de água para as plantas, a qual somada aos outros benefícios pode trazer redução de impactos ambientais (MARCELO et al., 2016; LENTZ, 2020; SAHA et al., 2020; ARANGEL; CINENSE, 2021).

Como mencionado, a disponibilidade de água para as plantas tende a ser maior com o uso da PAM; isso ocorre pelo fato do polímero contribuir na retenção de água no solo. Porém, a concentração da solução e o diâmetro dos poros do solo, afetam de forma significativa essa retenção de água (JUNG; JANG, 2016). Nesse sentido, Miranda *et* al. (2018) comentam que a maior eficiência da ação do polímero está relacionada à fração porosa do solo, com redução da resistência do solo à penetração de raízes. Além disso, o uso de PAM promove estabilidade estrutural, tanto em solos coesos como os não coesos, melhorando a agregação com formação de poros maiores, assim como o aumento no diâmetro médio geométrico e ponderado de agregados em solos coesos e não coesos (MELO et al., 2014).

A maior estabilidade estrutural proporcionada pela PAM deve-se às ligações que ocorrem entre as partículas do solo, sendo especialmente benéfica em solos arenosos, que naturalmente possuem baixa estruturação. Esse efeito contribui significativamente para a redução da erosão superficial, promovendo uma maior conservação do solo (WANG et al., 2018; AMIRI et al., 2019; YAVITT et al., 2021; ABDIKAMALOVA et al., 2024).

No contexto da sustentabilidade agrícola, o uso eficiente da PAM possibilita a conservação hídrica do solo, preservação das camadas pela maior estabilidade estrutural, redução da lixiviação de nutrientes e consequentemente reduzindo o impacto ambiental promovendo um modelo de produção mais equilibrado. No entanto, para garantir sua aplicação

de forma segura e sustentável, é essencial a realização de pesquisas que consigam determinar a concentração ideal do polímero, evitando riscos de contaminação ambiental e favorecendo a sustentabilidade. Dessa forma, a PAM pode continuar sendo uma aliada na conservação do solo e na promoção da agricultura sustentável (CHENG et al., 2024; YANG et al., 2023).

# **3 MATERIAL E MÉTODOS**

#### 3.1 Seleção da área experimental e coleta dos solos

O experimento foi conduzido em áreas da estação experimental de Itapirema, pertencente ao Instituto Agronômico de Pernambuco (IPA), no município de Goiana-PE, Zona da Mata Norte do estado de Pernambuco (Figura 1).

**Figura 1 -** Mapa de localização da área de estudo situada na Estação Experimental do Instituto Agronômico de Pernambuco (IPA).



De acordo com a classificação de Köppen o clima é do tipo Ams' e possui média pluviométrica anual de 2.002 mm, com vegetação predominantemente de floresta tropical subperenifólia (BECK et al., 2018). Este local é referência nos estudos com solos coesos desde

1960, ocorrendo em área de Tabuleiro Costeiro, sendo o solo classificado como Argissolo Amarelo Distrocoeso epirredóxico (ANDRADE, 2014).

Dentro da área experimental foram selecionadas duas subáreas, tomando como base a cobertura vegetal, sendo: uma sob mata nativa, servindo de referencial comparativo (Figura 2); e outra, atualmente em pousio, com pastagem, há aproximadamente 10 anos, mas que anteriormente estava sob cultivo de cana-de-açúcar, como ilustrado na Figura 3.

**Figura 2** - Área de mata nativa (a) e perfil do Argissolo Amarelo Distrocoeso epirredóxico aberto na área de estudo (b).



Fonte: Autor, 2024.

**Figura 3** - Área em resiliência com pastagem (a) e perfil do Argissolo Amarelo Distrocoeso epirredóxico aberto na área de estudo (b).



Fonte: Autor, 2024.

Em cada subárea foi aberto um perfil, realizada a respectiva descrição morfológica

(SANTOS et al., 2015), sendo os solos classificados como Argissolo Amarelo Distrocoeso epirredóxico. Na sequência, procedeu-se a amostragem dos solos, realizada no horizonte Bt (horizonte com máxima expressão da coesão), utilizando: i) cilindros volumétricos, com aproximadamente: 20, 50, 100, 150, 200 e 250 cm<sup>3</sup> (Figura 4); ii) e blocos de solos (Figura 5).



Figura 4 - Cilindros volumétricos utilizados na coleta dos solos (20 até 250 cm<sup>3</sup>).

Fonte: Autor, 2024.

**Figura 5** - Bloco de solo esculpido no perfil (a); removidos do perfil e acondicionados em plástico filme e plástico bolha (b).



Fonte: Autor, 2024.

Em relação à coleta dos cilindros volumétricos em campo, estes foram inseridos ao solo com auxílio do amostrador tipo Uhland. As amostras coletadas (conjunto cilindro-amostra) totalizaram 216 amostras por área, sendo: 18 amostras por cada volume de cilindro (18 amostras  $\times$  6 volumes de cilindros = 108 amostras) por tratamento ( $\times$  2: com e sem polímero), completando as 216 amostras por área. Assim, nas duas áreas selecionadas (sob mata e em pousio), as coletas tiveram um total de 432 amostras.

Por outro lado, no que se refere a coleta dos blocos, os procedimentos para suas amostragens seguiram a metodologia sugerida em Marcelo et al. (2016). Desse modo, foram coletados nove blocos por perfil, nas dimensões (cm):  $15 \times 20$  (largura × comprimento) × 15

(altura, podendo ser maior ou menor, em função da espessura do horizonte Bt). Após a remoção do perfil, os blocos, a exemplo das amostras em cilindro, foram envolvidos em plástico filme, seguido de plástico bolha, colocados em caixa de isopor, protegendo assim de perturbações durante o transporte para o laboratório de Física do Solo (LaFiS) da Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE).

Também foram coletadas amostras não estruturadas para realização de ensaios físicos, químicos e mineralógicos. A análise granulométrica foi realizada via densímetro conforme proposto por Gee e Or (2002) com adaptação, realizando leituras para obtenção da argila com densímetro após 24 h de repouso das amostras depois da agitação em equipamento Wagner a 50 rpm, sendo a areia obtida via peneiramento em peneiras com malha de abertura de 53 µm e 212 µm (separação de areia grossa e areia fina) e o silte obtido por diferença entre as frações anteriores. Sendo possível a obtenção das frações areia, silte e argila, assim como a argila dispersa em água, grau de floculação e dispersão. A densidade de partículas sólidas do solo (Dp) foi realizada pelo método do picnômetro (FLINT e FLINT, 2002). Os resultados desses ensaios físicos dos solos estudados estão na Tabela 1.

Horizontas			Dr	Classe						
Horizontes	Argila	Silte	Areia	AG	AF	ADA	GF	GD	Dp	Textural
	g kg <sup>-1</sup> %								kg dm <sup>-3</sup>	
Α	75,54	33,39	891,07	532,12	358,95	20,99	72,00	28,00	2,70	Areia
Ε	92,12	18,27	889,61	517,79	371,82	33,50	64,00	36,00	2,70	Areia-Franca
BE	150,87	33,93	815,20	450,23	364,97	104,77	31,00	69,00	2,73	Fra-Are
Bt (coeso)	323,62	26,94	649,44	356,39	293,05	16,81	95,00	5,00	2,78	Fra-Arg-Are

 Tabela 1 - Análise granulométrica, densidade de partículas sólidas do solo e classificação textural do Argissolo Amarelo Distrocoeso epirredóxico para as duas áreas (mata e pousio).

AG – areia grossa; AF- areia fina; ADA – argila dispersa em água; GF – grau de floculação; GD – grau de dispersão; Dp – densidade de partícula; Fra-Are – franco arenoso; Fra-Arg-Are – franco argilo arenosa. **Fonte**: Autor, 2024.

Nas análises químicas incluíram a determinação de pH em água e solução com KCl;  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$  e Al<sup>3+</sup> trocáveis extraídos por solução de KCl 1 mol L<sup>-1</sup>; H+Al por acetato cálcio; e K<sup>+</sup>, P e Na<sup>+</sup> extraídos por Mehlich-1 (TEIXEIRA et al., 2017). A partir dos resultados obtidos foram calculados:  $\Delta$ pH, saturação por alumínio (m), soma de bases (SB), saturação por bases (V) e capacidade de troca de cátions (CTC). O carbono orgânico total (COT) foi determinado por oxidação úmida com K<sub>2</sub>Cr<sub>2</sub>O<sub>7</sub> na concentração 0,4 mol L<sup>-1</sup>, usando o método Walkley-Black (NELSON; SOMMERS, 1996). Esses resultados podem ser observados na Tabela 2 a segui

Horizontos	Prof.	Area de mata															
Horizontes		pH	ΔpH	$\mathbf{K}^+$	$Na^+$	Ca <sup>2+</sup>	$Mg^{2+}$	Al <sup>3+</sup>	$H+Al^{3+}$	SB	$CTC_{\text{Ef}}$	CTC <sub>Pot</sub>	V	m	PST	Р	COT
	_ cm _	H <sub>2</sub> O KCl						mmo	lc kg <sup>-1</sup>					%		mg kg <sup>-1</sup>	dag kg <sup>-1</sup>
А	0-14	4,45 3,24	-1,21	0,36	0,59	3,97	1,36	6,67	48,40	6,28	12,95	54,68	11,49	51,49	4,57	11,25	1,99
Ε	14-30	4,59 3,79	-0,80	0,30	0,52	3,00	0,64	6,00	41,25	4,47	10,47	45,72	9,77	57,32	4,94	9,94	1,21
BE	30-43	5,05 4,16	-0,89	0,25	0,49	5,05	1,23	3,67	32,45	7,02	10,69	39,47	17,78	34,31	4,57	9,89	0,92
Bt (coeso)	43-70	4,87 3,98	-0,89	0,25	0,53	4,62	1,36	5,00	31,25	6,76	11,76	38,11	17,74	42,51	4,53	9,57	0,81
Horizontos	Prof.	Área de pousio															
Horizonites -	_ cm _	pH	ΔpH	$\mathbf{K}^+$	$Na^+$	Ca <sup>2+</sup>	$Mg^{2+}$	Al <sup>3+</sup>	H+Al <sup>3+</sup>	SB	$\text{CTC}_{\text{Ef}}$	CTC <sub>Pot</sub>	V	m	PST	Р	COT
		H <sub>2</sub> O KCl						mmo	lc kg <sup>-1</sup>					%		mg kg <sup>-1</sup>	dag kg <sup>-1</sup>
Bt (coeso)	43-70	5,30 4,27	-1,03	0,40	0,50	1,50	5,00	5,50	10,10	7,40	12,90	17,50	42,29	42,63	2,86	9,29	0,62

Tabela 2 - Análise química do Argissolo Amarelo Distrocoeso epirredóxico.

Prof. – profundidade;  $\Delta pH - (pH_{KCl} - pH_{H20})$ ; SB - soma de bases; CTC<sub>Ef</sub> - capacidade de troca de cátions efetiva; CTC<sub>Pot</sub> - capacidade de troca de cátions potencial; V - saturação por bases; m - saturação por alumínio; PST - percentagem de sódio trocável; P - fósforo; COT - carbono orgânico total. **Fonte**: Autor, 2024.

As análises mineralógicas foram feitas na fração argila do solo para obter a composição mineralógica do perfil, sendo realizadas por difratometria de raio X (DRX), em difratômetro XRD 6000 da Shimadzo, operando com radiação de Cu Kα a 40 kV e 30 mA, com monocromador de grafite. Esses dados (Figura 6) foram obtidos na tese de doutorado de Souza Junior (2024).



Figura 6 - Difratograma de raio X do Argissolo Amarelo Distrocoeso epirredóxico.

Também foram analisadas as formas de ferro de alta e baixa cristalinidade, pelos métodos de ditionito-citrato-bicarbonato de sódio (MEHRA; JACKSON, 1960); e oxalato ácido de amônio, pH 3,0, no escuro (MCKEAGUE; DAY, 1966), respectivamente. Essas formas analisadas do ferro são apresentadas na Tabela 3 (SOUZA JUNIOR, 2024). A razão Fe<sub>B</sub>/Fe<sub>A</sub> é frequentemente usada como um indicador da pedogênese, mais próximo de 1 predominância de ferro de baixa cristalinidade que é característico de solos menos intemperizados, próximo de 0 predominância de ferro de alta cristalinidade, característica de solos mais intemperizados.

Horizontes	FeA	Feb	<b>Гев/Ге</b> л
	Į		
Α	5,87	0,37	0,064
Ε	7,42	0,65	0,088
BE	9,34	0,77	0,083
Bt (coeso)	17,54	1,47	0,084

 Tabela 3 - Análise de formas de ferro do Argissolo Amarelo Distrocoeso epirredóxico.

 $Fe_A$  – ferro de alta cristalinidade (goethita e hematita);  $Fe_B$  – ferro de baixa cristalinidade (óxidos de ferro amorfo);  $Fe_B/Fe_A$  – relação de ferro de baixa e alta cristalinidade. **Fonte**: Adaptada de Souza Junior, 2024.

#### 3.2 Pré-tratamento das amostras

No laboratório (LaFiS), inicialmente, os cilindros volumétricos e os blocos foram subdivididos em dois grupos, que receberam os tratamentos: controle, aplicando-se água destilada; e com PAM, na concentração de 0,1 g L<sup>-1</sup>, definida com base no trabalho realizado por Marcelo et al. (2016). Além disso, outros autores vêm utilizando essa concentração do polímero em suas pesquisas para diferentes avaliações no solo (ZHANG et al., 2019; ALBALASMEH et al., 2021; SOLTANI et al., 2022). O polímero utilizado é aniônico da Superfloc, A-130 (poliacrilamida - PAM), fabricado pela Cytec (Tabela 4), possuindo alto peso molecular não sendo tóxico ao ambiente (SOJKA e SURAPANENI, 2000).

Propriedades Típicas	A-130
Aparência	Pó granulado branco
Grau de carga %	33
Peso molecular relativo	Alto
Densidade aparente, kg/m3	$850 \pm 50$
pH da solução a 0,5%, 25 °C	5,0 - 7,0
Viscosidade, cps	
0,10%	200
0,25%	400
0,50%	850
Especificações do produto	
Insolúveis % p/p (método BD 37)	2,0 máx.
Acrilamida residual, % (método BD 52)	0,05 máx.
PWG, Acrilamida residual, % (método BD 52)	0,020 máx
Viscosidade padrão, cps (método 20, 20A, 21)	4,4-5,8

**Tabela 4** - Propriedades da poliacrilamida aniônica, Superfloc A-130.

Fonte: Adaptada da Ficha técnica Kemira Superfloc

A aplicação dos tratamentos foi realizada por capilaridade, colocando-se cada grupo de cilindros e blocos em bandejas, forradas com espumas (2 cm de espessura), para receberem os tratamento: controle (água); e solução de PAM, como mostra a Figura 7.

**Figura 7** - Amostras coletadas em cilindros volumétricos (a); e em bloco de solo (b), ambas submetidas ao processo de saturação com os tratamentos (água e PAM).



Fonte: Autor, 2024.

Os cilindros com volumes medindo aproximadamente 20, 50, 100, 150, 200 e 250 cm<sup>3</sup>

(Tabela 5) foram tomados como base para os ensaios de definição do Volume Elementar Representativo (VER), que pode ser encontrado a partir de um ponto arbitrário dentro de um domínio de interesse considerado (KOESTEL; LARSBO; JARVIS, 2020). Para tanto, foram usados os seis volumes citados, incluindo o de 100 cm<sup>3</sup> que é o volume amplamente utilizado para coleta em cilindros volumétricos, complementado uma amplitude de volumes em uma faixa superior àquela utilizada por Borges; Pires (2012); Koestel; Larsbo; Jarvis (2020), que utilizaram volumes que variaram de 50 a 200 cm<sup>3</sup>.

Volume aprovimado dos cilindros	Dimensões reais						
	Altura	Diâmetro	Volume real				
cm <sup>3</sup>		_cm	cm <sup>3</sup>				
20	2,91	2,96	20,02				
50	2,75	4,81	49,97				
100*	5,01	5,00	98,37				
150	5,16	6,08	149,81				
200	4,66	7,40	200,41				
250	5,80	7,41	250,12				

Tabela 5 – Volumes aproximados e dimensões médias reais dos cilindros utilizados.

\* - cilindro com volume padrão para análises de física do solo. Fonte: Autor, 2024.

Essas amostras em cilindros volumétricos foram destinadas aos ensaios de Pt e sua distribuição (macro, meso, micro e criptoporosidade); Ksat; CCRAS; Rp; e Ds. Os métodos utilizados nos ensaios para quantificação desses atributos foram aqueles preconizados em Teixeira et al. (2017), utilizando, amostras a partir das classes de tamanhos, definidos durantes os respectivos ensaios.

Na sequência, os blocos foram umedecidos por capilaridade até próximo a capacidade de campo, posteriormente esses blocos na umidade mencionada foram utilizados para separação de agregados, com tamanhos específicos, em função dos ensaios para determinação da resistência tênsil de agregados – Rt (Figura 8).

**Figura 8** - Preparação de agregados para ensaios de resistência tênsil (a), para obtenção da faixa de volumes de agregados com base em diâmetros (b).



Fonte: Autor, 2024.

#### 3.3 Atributos físico-hídricos dos solos

As amostras coletadas em cilindros, utilizadas nos ensaios físico-hídricos, seguem uma sequência lógica: os conjuntos cilindro-amostra, após pré-tratamento (toalete, inserção de pano e liga), são utilizados para os ensaios de condutividade hidráulica saturada (Ksat); porosidade total (Pt); curva característica de retenção de água no solo (CCRAS); resistência do solo à penetração de raízes (Rp) e densidade do solo (Ds). Assim, após a saturação, os conjuntos cilindro-amostra seguem para os ensaios de Ksat, que, ao serem finalizados, os conjuntos são saturados novamente, seguindo para os ensaios da CCRAS, determinando-se: a distribuição de tamanho de poros - DTP, além da capacidade de campo e ponto de murcha permanente. Durante a execução da curva, a cada potencial equilibrado ( $\Psi$ ), os conjuntos são pesados, e uma parte segue para os ensaios de Rp, que, ao serem finalizados, os conjuntos vão à estufa (105°C, 24h), obtendo-se assim os dados para o cálculo da Ds. Maiores detalhes sobre cada atributo determinados nessa sequência, será comentado a seguir.

Os ensaios para determinação da Ksat foram realizados via permeâmetro de carga constante (PCC), conforme sugeridos em Reynolds e Elrick (2002). Cada amostra foi submetida à aplicação de uma carga hidráulica, equivalente a 1/3 da altura do corpo de prova. Durante o equilíbrio (estabilização da carga constante aplicada), o volume de água que atravessa os poros de toda área da seção transversal da amostra, em um tempo prefixado, é coletado, até que dois volumes consecutivos não difiram entre si (Figura 9). Assim, os cálculos para obtenção dos valores da Ksat serão realizados com base na Lei de Darcy, conforme equação (1).

Figura 9 - Permeâmetro de carga constante e seus aparatos.



$$Ksat = \left(\frac{Va}{At} \times \frac{L}{L+h}\right) \times 600$$
(1)

onde: Ksat - é expressa em mm h<sup>-1</sup>; Va é o volume de água coletado (cm<sup>3</sup>); L - é a altura do corpo de prova (cilindro-amostra); A - é a área da seção transversal do anel (cm<sup>2</sup>); t - é o tempo de fluxo da água pelo corpo de prova; e h - é a coluna de água aplicada no modo constante (carga hidráulica, expressa em centímetros de coluna de água: cca).

Após a determinação da Ksat os conjuntos cilindro-amostra foram ressaturados para iniciar os ensaios da Pt e DTP. A Pt foi determinada pelo método da saturação cujos procedimentos estão disponíveis em Almeida et al. (2017a), onde o conjunto cilindro-amostra é saturado, pesado e seco em estufa (105 °C), sendo então calculada pela equação (2).

$$Pt = \frac{V poros}{V total}$$
(2)

onde: Pt – porosidade total (cm<sup>3</sup> cm<sup>-3</sup>); V<sub>poros</sub> – é o volume de poros (cm<sup>3</sup>), obtido por meio do volume de água para saturar os poros do solo; V<sub>total</sub> – é o volume total do solo (cm<sup>3</sup>), assumido como o volume do cilindro volumétrico usado na coleta ( $\pi \times r^2 \times h$ ).

Antes de concluir os ensaios da Pt (secagem em estufa a 105 °C, 24 h), os conjuntos cilindro-amostra foram utilizados para a determinação da DTP, sendo estes distribuídos em mesa de tensão, dando início aos procedimentos para construção da curva característica de retenção de água no solo (CCRAS), gerando dados para cálculo da DTP. Cada conjunto cilindro-amostra saturado, foi levado à mesa de tensão (Figura 10).

Figura 10 - Mesa de tensão e distribuição espacial dos conjuntos cilindro-amostra.



Fonte: Autor, 2024.

Desse modo, a macroporosidade (Ma) e mesoporosidade (Me) foram determinadas equilibrando os conjuntos cilindro-amostra nos potenciais ( $\Psi$ ) 0 e -1 kPa (Macro) e -1 a -6 kPa (Meso). Esse equilíbrio ocorre quando não se tem mais gotejamento no ponto de drenagem da

mesa conforme preconizado em Almeida *et* al. (2017a). Ainda utilizando a mesa de tensão, os conjuntos foram equilibrados no  $\Psi$  -10 kPa e de posse dos dados foi possível calcular a umidade volumétrica ( $\theta$ ), aqui assumida como a capacidade de campo ( $\theta_{CC}$ ), para solos arenosos. No caso dos solos de textura mais argilosa a  $\theta_{CC}$  foi equilibrada no  $\Psi$  -33,33 kPa, obtido pelo uso da câmara de Richards de baixa pressão (Figura 11).

**Figura 11** - Sistema de câmaras de Richards de alta e baixa pressão (a), com detalhe da distribuição espacial dos conjuntos cilindro-amostra na câmara de baixa pressão (b).



Fonte: Autor, 2024.

Na sequência, os conjuntos cilindro-amostra tiveram suas umidades equilibradas nos  $\Psi$  -300 e -1.500 kPa via câmara de Richards de alta pressão (DANE; HOPMANS, 2002). O equilíbrio da umidade no  $\Psi$  a -300 kPa foi usado para separação da microporosidade em duas subclasses, onde a microporosidade estrutural e biológica (Micro<sub>E+B</sub>) foi obtida pelo equilíbrio dos conjuntos nos  $\Psi$  de -6 e -300 kPa; enquanto para a microporosidade textural (Micro<sub>Textural</sub>) foram aplicados os  $\Psi$  de -300 e -1.500 kPa. O  $\Psi$  de -1.500 kPa foi usado como limite para separação entre a Micro<sub>Textural</sub> e a criptoporosidade (Cripto: -1.500 e  $\cong$  10<sup>6</sup> kPa). Deste modo, após equilíbrio da umidade do solo no  $\Psi$  de -1.500 kPa, os conjuntos foram secos em estufa a 105 °C. Com os dados obtidos (pares de coordenadas  $\Psi$  e  $\theta$ ), foram geradas as CCRAS.

Na sequência, a resistência do solo à penetração de raízes (Rp) foi determinada usando parte dos conjuntos cilindro-amostra, utilizada para a construção da CCRAS. Assim, após cada equilíbrio do  $\Psi$ , o conjunto cilindro-amostra foi pesado e transferido para um penetrômetro eletrônico de bancada em laboratório. O penetrômetro possui agulha (base do cone de 4 mm), acoplada à célula de carga de 20 kg, que em movimento descendente (4 mm min<sup>-1</sup>) alcança o centro do topo do corpo de prova (cilindro-amostra), penetrando-o com carga (pressão) constante (Figura 12a), sendo necessária a calibração do equipamento antes do início dos ensaios. A força necessária para penetração da agulha na amostra é registrada por sistema de aquisição de dados, onde o software fornece os resultados na unidade de MPa.

Durante os ensaios, a agulha não penetra a total extensão da amostra, interrompendo seu avanço alguns centímetros antes de alcançar a base da amostra, onde, para efeitos de cálculos, os dados do início da inserção são descartados. Estes procedimentos são importantes para eliminação do efeito de bordadura, que ocorre nas extremidades da amostra, com espessura definida em função da sua altura, sendo considerados apenas os dados centrais (Figura 12b).





Fonte: Autor, 2024.

Após a determinação da Rp, os conjuntos foram secos em estufa (105 °C), pesados, sendo a Ds finalmente calculada [equação (3)], determina pelo método do cilindro volumétrico conforme Almeida *et* al. (2017b), tendo como princípio a relação entre a massa de sólidos contida no cilindro e o volume do solo, representado pelo volume do cilindro ( $\pi \times r^2 \times h$ ).

$$Ds = \frac{Massa \, de \, solidos}{Volume \, total} \tag{3}$$

onde:  $Ds - \acute{e}$  a densidade do solo (g cm<sup>-3</sup>); Massa de sólidos (g); Volume total do solo (cm<sup>3</sup>).

Já as amostras dos solos coletadas em blocos foram convertidas em agregados, com diâmetros equivalentes ( $\emptyset_{eq}$ ) médios de 2; 3; 4; 5 e 6 cm (Figura 8), sendo estes utilizados para determinar a resistência tênsil de agregados (Rt) e definição do volume elementar representativo.

Inicialmente, antes da determinação da Rt as classes de agregados tiveram suas umidades equilibradas à temperatura ambiente, para que as variações fossem em função dos tratamentos. A força para ruptura dos agregados foi obtida pelo método indireto (compressão), utilizando penetrômetro de bancada (Figura 12), no qual substitui-se a agulha, antes utilizada para obter a Rp, por uma chapa, que é acoplada à célula de carga, em movimento descendente, comprimindo o agregado, promovendo a sua ruptura. Os dados são registrados por sistema eletrônico de aquisição, calculando-se a Rt pela equação (4), conforme Dexter e Kroesbergen (1985).

$$Rt = \left[0.576 \left(\frac{F_{max}}{D_{ef}^2}\right)\right] \div 1000$$
(4)

onde: Rt - é a resistência tênsil dos agregados, em kPa; 0,576 é o valor da constante de proporcionalidade da relação entre a força compressiva aplicada e a Rt gerada no interior do agregado;  $F_{máx}$  - é a força máxima aplicada para ruptura do agregado, em N, e D<sub>ef</sub> - é o diâmetro efetivo do agregado (m), calculado pela equação (5), conforme Watts e Dexter (1998).

$$D_{ef_{(m)}} = D_m \left(\frac{M}{M_0}\right)^{\frac{1}{3}}$$
(5)

sendo:  $D_m$  é o diâmetro médio dos agregados, expresso em m, definido pela média aritmética das malhas das peneiras usadas na separação de cada classe de tamanho;  $M_i$  é a massa individual do agregado (g); e  $M_o$  é a massa média dos agregados (g), obtida pela média aritmética de todos os pesos dos agregados (conjunto geral dos pesos).

#### 4 PROCESSAMENTO DOS DADOS

Os dados obtidos foram submetidos à testes de hipóteses de normalidade de dados (Shapiro-Wilk teste; p < 0,05) e homocedasticidade (Levene teste; p < 0,05), sendo as variáveis submetidas à análise de variância (ANOVA) de classificação dupla e as médias comparadas pelo teste de Tukey a p < 0,05. Os dados foram analisados com o programa estatístico SAS (Statistical Analytics Sysem), versão student.

# 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 5.1 Avaliação dos atributos físicos da área de mata com e sem aplicação da PAM

Na Tabela 6 são apresentados os dados referentes à interação dupla entre os diferentes volumes de cilindros e o tratamento com e sem o polímero PAM na área de mata, considerando diferentes atributos físicos. A análise revelou padrões importantes sobre a estrutura do solo e sua dinâmica hídrica. A seguir, são apresentados os resultados para cada atributo, comparando os volumes dentro de cada tratamento e avaliando as diferenças entre o uso ou não do polímero em cada volume.

A porosidade total (Pt) apresentou tendência de redução com o aumento do volume do cilindro dentro de cada tratamento. Nos tratamentos com PAM, os volumes de 20 e 50 cm<sup>3</sup> mantiveram valores mais elevados e estatisticamente iguais com 0,41 e 0,40 cm<sup>3</sup> cm<sup>-3</sup>

respectivamente, enquanto volumes superiores (100, 150, 200 e 250 cm<sup>3</sup>) apresentaram redução significativa não diferindo estatisticamente entre si (Tabela 6). O mesmo padrão foi observado nos tratamentos sem PAM. Essa continuidade nos valores estatísticos demonstra a eficiência desses volumes de cilindros na determinação desse atributo, corroborando a adequação metodológica para a avaliação desse parâmetro pelo volume elementar representativo (VER).

A redução da Pt em cilindros maiores pode estar associada à maior compactação do solo nesses volumes, devido ao aumento da massa de solo contida nos cilindros, o que pode influenciar a distribuição dos poros. De fato, a maior massa de solo associada a grande quantidade de partículas finas como a argila (Tabela 1 horizonte Bt) tende a afetar a agregação do solo, reduzindo a porosidade total (COLOMBI et al., 2017; FENG et al., 2019; MARTINEZ; DE SOUZA, 2020). No entanto, ao comparar os tratamentos para o mesmo volume, não houve diferença significativa.

É importante destacar que solos coesos tendem a apresentar elevada densidade do solo e baixa porosidade total, como já observado em Lima Neto et al. (2009) e Corrêa et al. (2008) reafirmando os valores encontrados nessa pesquisa para os cilindros maiores.

A macroporosidade (Ma) seguiu um comportamento semelhante à porosidade total. Nos tratamentos com PAM, os menores volumes ( $20 e 50 cm^3$ ) apresentaram maior Ma com 0,09 e 0,07 cm<sup>3</sup> cm<sup>-3</sup> respectivamente, enquanto volumes acima de 100 cm<sup>3</sup> tiveram redução significativa (Tabela 6).
Tratamento	Vcil	Pt	Ma	Me	Mi E+B	Mit	Crip	AD (100)	AD (333)	Ds	Ksat
	_cm <sup>-3</sup> _			cm <sup>3</sup>	cm <sup>-3</sup>			%	)	_g cm <sup>-3</sup> _	_mm h <sup>-1</sup> _
	20	0,41 Aa	0,09 Aa	0,06 Aa	0,11 Aa	0,04 Aa	0,12 Aa	7,46 Da	3,64 Ca	1,59 Ba	13,41 Ba
	50	0,40 Aa	0,07 Aa	0,04 Bb	0,12 Aa	0,03 ABa	0,13 Aa	13,61 Aa	5,67 Ca	1,73 Aa	35,96 Aa
	100	0,34 Ba	0,05 Ba	0,03 Ba	0,10 Aa	0,01 Ba	0,14 Aa	8,86 Ca	1,35 Da	1,71 Aa	30,20 Aa
Com PAM	150	0,33 Ba	0,03 BCa	0,04 Ba	0,13 Aa	0,01 Bb	0,12 Aa	12,40 Ba	9,96 Aa	1,71 Aa	28,41 Aa
	200	0,35 Ba	0,01 Ca	0,04 Ba	0,12 Aa	0,02 Ba	0,15 Aa	12,23 Ba	6,83 Ba	1,77 Aa	23,26 Aa
	250	0,33 Ba	0,02 Ca	0,04 Ba	0,11 Aa	0,03 ABa	0,13 Aa	10,60 Ba	8,15 Ba	1,73 Aa	29,36 Aa
	20	0,43 Aa	0,09 Aa	0,07 Aa	0,10 Aa	0,03 Ba	0,15 Ba	8,69 Ba	3,19 Ca	1,63 Ba	22,62 Aa
	50	0,41 Aa	0,04 Bb	0,08 Aa	0,12 Aa	0,03 Ba	0,11 Da	11,65 Aa	6,00 Aa	1,69 ABa	27,95 Aa
	100	0,35 Ba	0,04 Ba	0,04 Ba	0,11 Aa	0,02 Ca	0,17 Aa	8,59 Ca	2,31 Da	1,67 ABa	17,95 Aa
Sem PAM	150	0,34 Ba	0,03 Ba	0,04 Ba	0,09 Ab	0,05 Aa	0,13 Ca	12,43 Aa	5,79 Bb	1,63 Ba	68,06 Aa
	200	0,33 Ba	0,01 Ba	0,04 Ba	0,10 Aa	0,02 Ca	0,14 Ca	9,22 Ba	3,88 Bb	1,76 Aa	19,54 Aa
	250	0,32 Ba	0,05 Ba	0,03 Ba	0,10 Aa	0,02 Ca	0,13 Ca	6,78 Da	1,96 Eb	1,74 Aa	25,78 Aa
CV	(%)	5,13	26,90	20,43	8,08	29,19	8,97	14,95	20,90	4,00	45,35

Tabela 6 - Comparação dos diferentes volumes das amostras, com e sem a aplicação do PAM, na área de mata para diferentes atributos físicos.

Vcil - volume do cilindro, Pt - porosidade total, Ma - macroporosidade, Me - mesoporosidade,  $Mi_{E+B} - Microporosidade$  estrutural e biológica,  $Mi_T - Microporosidade$  textural, Crip - Criptoporosidade, AD (100) - água disponível na capacidade de campo dos solos arenosos, <math>AD (333) - água disponível na capacidade de campo dos solos arenosos, <math>D (333) - água disponível na capacidade de campo dos solos argilosos, <math>Ds - densidade do solo, Ksat - condutividade hidráulica do solo saturado, <math>CV - coeficiente de variação. Médias seguidas por letras maiúsculas idênticas na coluna não apresentam diferenças entre si para os diferentes volumes no mesmo tratamento (dentro do tratamento) e, letras minúsculas idênticas na coluna não apresentam diferenças no mesmo volume entre os tratamentos pelo teste Tukey à 5% de probabilidade.

Esse resultado pode ser explicado pela fragilidade de poros maiores que podem ser colapsados e transformados em poros menores; além disso, os ciclos de umedecimento e secagem das amostras afetam a Ma, caso que acontece com as amostras durante os ensaios, onde, associado a migração das partículas de argila, acarreta no entupimento dos poros, podendo levar a maior redução da Ma, principalmente em cilindros que apresentam maior representatividade (COLOMBI et al., 2017; FENG et al., 2019; MARTINEZ; DE SOUZA, 2020; THURRAKHLEI; SHAH; NAVEED, 2024).

Esses resultados diferem dos encontrados em Rab et al. (2014), que não identificaram diferenças significativas na Ma ao avaliar volumes com 124 cm<sup>3</sup> e 280 cm<sup>3</sup> de solo. Contudo, os autores relataram redução no diâmetro dos poros, o que sugere mudanças estruturais mais sutis. No tratamento sem PAM, foi observado o mesmo padrão, confirmando que os diferentes volumes de cilindros afetam a distribuição da Ma. Comparando os tratamentos para um mesmo volume, não houve diferenças significativas.

A mesoporosidade (Me) apresentou variações entre os volumes dentro de cada tratamento, com os valores mais altos concentrados nos cilindros menores (20 e 50 cm<sup>3</sup>), onde os cilindros a partir de 100 cm<sup>3</sup> não diferiram estatisticamente. No entanto, as diferenças não foram estatisticamente significativas entre os tratamentos para o mesmo cilindro, apenas os cilindros com 50 cm<sup>3</sup> apresentaram diferenças entre o uso ou não da PAM, mostrando que a PAM pode modificar poros como os Me (Tabela 6). Tais resultados indicam que a Me é influenciada predominantemente pelo volume do cilindro.

Assim, para a determinação da classe dos Me, recomenda-se o uso cilindros a partir de 100 cm<sup>3</sup>, volume este que definiu o VER para esta classe de poros, levando em consideração a variabilidade apresentada pelo tamanho da amostra (LOYOLA; PEREIRA; CORDÃO NETO, 2021; PESTRENIN et al., 2023; XUE et al., 2022). Entretanto, apesar do solo na área de mata já apresentar um equilíbrio na distribuição dos poros intermediários, foi demostrado que o uso do polímero pode alterar esses tipos de poros.

A microporosidade estrutural e biológica (Mi  $_{E+B}$ ) não apresentou diferença significativa dentro de cada tratamento e entre os tratamentos para o mesmo volume, indicando que essa classe de poros permanece relativamente estável, mesmo com o aumento do volume do cilindro ou uso da PAM (Tabela 6).

Em relação a microporosidade textural ( $Mi_T$ ), dentro do tratamento com PAM, a partir das amostras coletadas via cilindros com 50 cm<sup>3</sup>, não foram observadas diferenças estatísticas.

Dentro do tratamento sem PAM ocorreu maior heterogeneidade, tendo o cilindro com 150 cm<sup>3</sup> o maior valor, com 0,05 cm<sup>3</sup> cm<sup>-3</sup> (Tabela 6). Esses resultados sugerem que o uso da PAM pode converter microporos e promover maior estabilidade estrutural devido à formação de novas ligações entre o polímero (aniônico), matéria orgânica e os coloides do solo (óxidos de ferro). Este acontecimento já foi destacado em Wang et al. (2018) e Yavitt et al. (2021), ressaltando que a matéria orgânica (Tabela 2) e os óxidos de ferro (presentes nesse solo conforme Tabela 3 e Figura 6) tendem a fazer ligações com substâncias carregadas negativamente no solo, como no caso do polímero utilizado

Para a criptoporosidade (Crip) o cilindro com 100 cm<sup>3</sup>, dentro do tratamento sem PAM, apresentou o maior valor, com 0,17 cm<sup>3</sup> cm<sup>-3</sup> (Tabela 6). Esse comportamento pode estar relacionado à variações naturais da estrutura do solo em pequenas escalas, causando maior heterogeneidade, principalmente sem a presença de um agente estabilizador como o polímero PAM (SIX et al., 2002; SOJKA et al., 2007; WANG et al., 2018; CHIMISSO et al., 2021; YAVITT et al., 2021).

A água disponível para as plantas (AD), avaliada nos potenciais matriciais de -100 cca (AD 100), que corresponde à capacidade de campo em solos arenosos, e de -333 cca (AD 333), referente à capacidade de campo em solos argilosos, apresentou diferença significativa entre os tratamentos para o mesmo volume do cilindro apenas para os cilindros com 150, 200 e 250 cm<sup>3</sup> para a AD 333, onde os maiores valores foram encontrados para esses cilindros no tratamento sob aplicação da PAM, com valores de 9,96; 6,83 e 8,15%, respectivamente (Tabela 6).

Esses resultados indicam que a aplicação da PAM contribui significativamente para o aumento da capacidade do solo em reter água disponível para as plantas (LENTZ, 2020; SAHA et al., 2020; ARANGEL e CINENSE, 2021). Esse efeito pode ser atribuído à estabilização da estrutura do solo, proporcionada pela interação entre o polímero e os coloides do solo, promovendo o rearranjo da porosidade e o aumento dos microporos que retêm água de forma acessível às plantas. Estudos recentes, como o de Rix et al. (2023), destacam que o uso da PAM é eficaz na melhoria da retenção da umidade no solo, corroborando os resultados obtidos nesta pesquisa e reforçando a relevância da PAM como uma ferramenta promissora na retenção de água em solo coeso.

Por outro lado, avaliando os resultados da AD 100 e AD 333 dentro dos tratamentos foi observado maior heterogeneidade nos valores desse atributo físico-hídrico, demonstrando que os diferentes volumes de cilindros associados ao uso da PAM influenciam a disponibilidade de água para as plantas (Tabela 6). Neste contexto, Huang, Zhao e Shao (2021) e Saha et al. (2020)

destacam que a textura do solo desempenha um papel fundamental na capacidade de retenção de água. Assim, a variação no volume dos cilindros impacta diretamente a distribuição das partículas, gerando alterações nos valores de água disponível. Essa dinâmica ocorre devido à redistribuição dos poros dentro de cada cilindro, que também é afetada com a presença da PAM.

Além disso, solos coesos, caracterizados por apresentarem valores elevados de criptoporos (como demonstrado na Tabela 6), podem limitar a disponibilidade de água para as plantas. Apesar dos criptoporos contribuírem para a retenção de água, eles oferecem resistência à acessibilidade a água pelas raízes, reduzindo a efetividade no suprimento hídrico às plantas (SCHARWIES; DINNENY, 2019). O uso da PAM por sua vez, quando aplicado em doses e concentrações adequadas, surge como uma alternativa eficaz para mitigar as limitações impostas pela alta Crip, promovendo maior disponibilidade de água às plantas por meio da reorganização dos poros e da estabilização da estrutura do solo (SIX et al., 2002; SOJKA et al., 2007; WANG et al., 2018; SAHA et al., 2020; CHIMISSO et al., 2021; YAVITT et al., 2021).

A densidade do solo (Ds) se manteve relativamente constante dentro de cada tratamento, onde apenas os cilindros com 20cm<sup>3</sup> apresentaram valores menores em comparação aos cilindros maiores. É importante destacar que as amostras coletadas com esses cilindros apresentaram os maiores valores de porosidade total do solo para os dois tratamentos e, consequentemente, as menores Ds. Essa relação é destacada em Chen (2018) e Turrakheil et al. (2024), com os valores de Ds sendo inversos aos da Pt. Entre os tratamentos para o mesmo volume, não foram identificadas diferenças significativas, reforçando que a PAM não teve impacto marcante na densidade do solo. Esse resultado sugere que nem o uso do polímero nem o volume dos cilindros acima de 20 cm<sup>3</sup> interferem significativamente na determinação do Ds.

Em relação à condutividade hidráulica saturada (Ksat), observou-se que apenas os cilindros com 20 cm<sup>3</sup> dentro do tratamento com PAM apresentaram diferenças significativas, com valor de 13,41 mm h<sup>-1</sup> (Tabela 6). A grande variabilidade nos valores dificultou a identificação de diferenças estatísticas entre os volumes de cilindros e os tratamentos com ou sem PAM. O menor valor encontrado para o cilindro com 20cm<sup>3</sup> deve-se ao efeito da restrição da conectividade dos poros, onde a PAM deve provavelmente restringir o fluxo de água em volumes de solos menores, o que causa o entupimento dos poros, seja pelo uso do PAM e sua viscosidade ou pela flutuação de partículas do solo, devido aos ciclos de umedecimento e secagem das amostras (PIRES et al., 2024 THURRAKHLEI; SHAH; NAVEED, 2024).

Em relação a elevada variabilidade do Ksat esta pode ser atribuída às características intrínsecas do solo, como a heterogeneidade da distribuição de poros e possíveis distorções

durante os ensaios com as amostras. De fato, a Ksat é influenciada por fatores como tipo de solo, uso do solo, posição na paisagem, umidade, profundidade e textura do solo, erros experimentais, métodos de amostragem, medição e conectividade dos poros (DEB; SHUKLA, 2012; DIXON et al., 2019; MESQUITA et al., 2022; PIRES et al., 2024). Além disso, é importante ressaltar que a determinação da Ksat requer atenção especial, devido à sua alta sensibilidade a pequenos distúrbios no solo e à variação espacial de seus valores. O uso da PAM, para estabilizar a estrutura do solo, pode ajudar a reduzir essa variabilidade, mas outros fatores, como a técnica de coleta e preparo das amostras, também desempenham papel crucial.

#### 5.2 Avaliação dos atributos físicos da área de pousio com e sem aplicação da PAM

Na Tabela 7 são apresentados os dados referentes à interação dupla entre os volumes dos conjuntos cilindro-amostra para os tratamentos com e sem PAM na área de pousio; destacando os resultados para cada atributo, comparando os volumes dentro de cada tratamento e avaliando as diferenças entre os tratamentos com e sem a aplicação do polímero.

A porosidade total (Pt) apresentou variações significativas dentro de cada tratamento. Dentro dos tratamentos com e sem a aplicação da PAM, os volumes com 20 e 50 cm<sup>3</sup> exibiram os maiores valores com 0,38 e 0,42 cm<sup>3</sup> cm<sup>-3</sup> e 0,44 e 0,42 cm<sup>3</sup> cm<sup>-3</sup>, respectivamente, enquanto volumes maiores (100 cm<sup>3</sup> ou mais) tiveram reduções significativas (Tabela 7).

A redução Pt em cilindros maiores já foi destacada anteriormente, sendo associada à compactação e ao aumento de partículas finas, como argila (Tabela 1, horizonte Bt), que participam do processo de agregação do solo (COLOMBI et al., 2017; FENG et al., 2019; MARTINEZ e DE SOUZA, 2020). Contudo, não houve diferença significativa entre os tratamentos para um mesmo volume, indicando que a PAM não afetou de forma significativa esse atributo. Esses valores são característicos de solos coesos, conhecidos por sua alta densidade e baixa porosidade total (Lima Neto et al., 2009; Corrêa et al., 2008), corroborando os resultados obtidos.

Esses volumes podem ser considerados confiáveis para a determinação da Pt e, consequentemente, do seu VER. Isso corrobora Bear (1975), Loyola, Pereira e Cordão Neto (2021), Xue et al. (2022) e Pestrenin et al. (2023), onde relatam que o VER pode ser obtido por meio da seleção de tamanhos que formem um gradiente em torno de um ponto central de uma amostra, avaliado pela variação que ocorre entre os dados analisados.

Tratamento	Vcil	Pt	Ma	Me	Mi <sub>E+B</sub>	Mi <sub>T</sub>	Crip	AD (100)	AD (333)	Ds	Ksat
	_cm <sup>-3</sup> _			cm <sup>3</sup> cm <sup>3</sup>	-3			%	/o	_g cm <sup>-3</sup> _	_mm h <sup>-1</sup> _
Com PAM	20	0,379 Ba	0,06 Ab	0,05 Ab	0,09 Bb	0,03 Aa	0,14 Aa	6,80 Fb	2,66 Ea	1,66 Ba	14,10 Ba
	50	0,417 Aa	0,07 Aa	0,06 Aa	0,11 Aa	0,03 Aa	0,17 Aa	10,31 Da	6,61 Ca	1,73 Aa	20,09 ABa
	100	0,346 Da	0,04 Ba	0,03 Ba	0,09 Ba	0,04 Aa	0,14 Aa	10,54 Ca	2,24 Eb	1,74 Aa	17,87 ABa
	150	0,327 Ea	0,02 BCa	0,03 Ba	0,12 Aa	0,02 Aa	0,12 Aa	12,71 Ba	10,13 Aa	1,72 Aa	35,63 Aa
	200	0,349 Ca	0,01 Ca	0,05 Aa	0,11 Aa	0,02 Aa	0,15 Aa	8,87 Eb	7,23 Ba	1,67 Aa	34,85 Aa
	250	0,327 Fa	0,03 Ba	0,02 Bb	0,13 Aa	0,02 Aa	0,14 Aa	12,73 Aa	6,09 Da	1,73 Aa	14,80 ABa
	20	0,441 Aa	0,08 Aa	0,07 Aa	0,12 Ba	0,04 Aa	0,15 Aa	11,57 Ba	3,69 Ca	1,65 Ea	26,43 Aa
	50	0,423 Ba	0,06 Aa	0,07 Aa	0,11 Ca	0,04 Aa	0,14 Aa	11,76 Ba	7,27 Aa	1,72 Ba	9,21 Ba
Sam DAM	100	0,347 Da	0,04 Ba	0,03 Ca	0,10 Ca	0,03 Aa	0,15 Aa	9,20 Cb	7,50 Aa	1,64 Fb	9,10 Ba
Selli PAM	150	0,321 Fa	0,03 Ba	0,02 Ca	0,10 Cb	0,02 Aa	0,15 Aa	9,06 Cb	5,81 Bb	1,77 Aa	34,11 Aa
	200	0,365 Ca	0,03 Ba	0,04 BCa	0,13 Aa	0,03 Aa	0,14 Aa	12,49 Aa	3,53 Db	1,69 Ca	30,56 Aa
	250	0,339 Ea	0,03 Ba	0,05 Ba	0,09 Db	0,03 Aa	0,14 Aa	8,31 Db	6,04 Ba	1,68 Da	14,80 ABa
CV	(%)	4,19	21,84	18,75	6,63	23,43	7,23	6,60	13,78	2,96	56,08

Tabela 7 - Comparação dos diferentes volumes de cilindros com e sem a aplicação do PAM na área de pousio para diferentes atributos físicos.

Vcil - volume do cilindro, Pt - porosidade total, Ma - macroporosidade, Me - mesoporosidade,  $Mi_{E+B} - Microporosidade$  estrutural e biológica,  $Mi_T - Microporosidade$  textural, Crip - Criptoporosidade, AD (100) - água disponível na capacidade de campo dos solos arenosos, <math>AD (333) - água disponível na capacidade de campo dos solos arenosos, <math>D(333) - água disponível na capacidade de campo dos solos argilosos, <math>Ds - densidade do solo, Ksat - condutividade hidráulica do solo saturado, <math>CV - coeficiente de variação. Médias seguidas por letras maiúsculas idênticas na coluna não apresentam diferenças entre si para os diferentes volumes no mesmo tratamento (dentro do tratamento) e, letras minúsculas idênticas na coluna não apresentam diferenças no mesmo volume entre os tratamentos pelo teste Tukey à 5% de probabilidade.

Os valores da macroporosidade (Ma) apresentaram um padrão semelhante, independente do tratamento aplicado (com e sem PAM), com os maiores resultados para as amostras de volumes menores (20 e 50 cm<sup>3</sup>), com 0,06 e 0,07 cm<sup>3</sup> cm<sup>-3</sup> e 0,08 e 0,06 cm<sup>3</sup> cm<sup>-3</sup>, respectivamente; sendo que, a partir do volume com 100 cm<sup>3</sup>, os resultados não apresentaram diferenças significativas dentro dos dois tratamentos. Em relação a comparação entre os tratamentos, considerando o mesmo volume das amostras, apenas aquelas coletadas nos cilindros com 20 cm<sup>3</sup> apresentaram diferenças significativas, sendo o menor valor encontrado para o tratamento com PAM (0,06 cm<sup>3</sup> cm<sup>-3</sup>), conforme visto na Tabela 7.

A PAM, como já foi destacado anteriormente, tende a reduzir a quantidade de poros maiores, como os macroporos (Ma). Este efeito ocorre devido às ligações entre o polímero e os coloides do solo, unindo-as de forma mais compacta, assim como a migração de argila e facilidade no colapso dos Ma, reduzindo sua quantidade no solo (COLOMBI et al., 2017; WANG et al., 2018; FENG et al., 2019; MARTINEZ; DE SOUZA, 2020; YAVITT et al., 2021; THURRAKHLEI; SHAH; NAVEED, 2024).

A mesoporosidade (Me) variou dentro dos tratamentos (com e PAM), onde os maiores valores foram encontrados para as amostras coletadas nos cilindros menores (20 e 50 cm<sup>3</sup>), assim como na Ma. Os resultados comparados entre os tratamentos, para o mesmo volume, comprovaram que os cilindros com 20 e 250 cm<sup>3</sup> apresentaram os menores valores de Me para o tratamento com PAM (0,05 e 0,02 cm<sup>3</sup> cm<sup>-3</sup>) respectivamente, como visto na Tabela 7. Esses resultados reafirmam o que vem sendo discutido anteriormente sobre o efeito da PAM na redistribuição das classes dos poros dos solos estudados.

Para a microporosidade estrutural e biológica (Mi  $_{E+B}$ ) a avaliação entre os tratamentos, para o mesmo volume, apresentou diferença significativa para as amostras coletadas com os cilindros de 20, 150 e 250 cm<sup>3</sup> (Tabela 7), onde o uso da PAM promoveu uma redistribuição da porosidade do solo, fato ligado a capacidade do polímero em fazer ligações com as partículas do solo e afetar algumas classes de poros do solo como os Ma, Me e Mi  $_{E+B}$ , comprovado com os resultados demonstrados na Tabela 7 (COLOMBI et al., 2017; FENG et al., 2019; MARTINEZ; DE SOUZA, 2020).

Dentro do tratamento com PAM as amostras coletadas nos cilindros de 50, 150, 200 e  $250 \text{ cm}^3$  apresentaram os maiores valores, e não diferiram estatisticamente entre si, e dentro do tratamento sem PAM as amostras dos cilindros de 50, 100 e  $150 \text{ cm}^3$  também não diferiram estatisticamente (Tabela 7), destacando a eficiência desses volumes na determinação da Mi <sub>E+B</sub>, demonstrando uma boa representação da condição real do solo para esse atributo (LOYOLA;

#### PEREIRA; CORDÃO NETO, 2021; PESTRENIN et al., 2023; XUE et al., 2022).

Em relação a microporosidade textural (Mi<sub>T</sub>) e a criptoporosidade (Crip) não foram encontradas diferenças significativas dentro e entre os tratamentos (Tabela 7). Esses resultados reforçam que tais atributos podem ser determinados pelos diferentes volumes de cilindros utilizados nessa pesquisa, independente do uso ou não da PAM. Tais resultados ressaltam a boa estabilidade microestutural dos solos coesos na área de pousio, fato esse comprovado pelos elevados valores de Crip, que fazem parte de microagregados, relacionados a microagregação que estabiliza a estrutura do solo; porém, é importante destacar que naturalmente solos coesos podem alcançar elevados valores de micro e criptoporos (ZHENG et al., 2022; LI; ZHAO; ZHANG, 2023).

Os resultados para a água disponível, avaliada nos potenciais matriciais de -100 cca, para solos arenosos, e -333 cca, para solos argilosos (AD 100 e AD 333, respectivamente), dentro dos tratamentos (com e sem PAM), de maneira geral, foram maiores valores para as amostras contidas nos cilindros maiores (Tabela 7). A análise dos resultados para AD 100, entre os tratamentos e para o mesmo volume das amostras, demonstrou que apenas para aquelas coletadas nos cilindros de 50 cm<sup>3</sup> não identificou diferenças significativas. Por outro lado, os resultados da AD 333 para as amostras dos cilindros com 100, 150 e 200 cm<sup>3</sup> apresentaram diferenças significativas entre os tratamentos. Nestes casos, o tratamento com PAM, nos cilindros maiores (150 e 200), apresentaram valores mais elevados de AD 333 (10,13 e 7,23 %, respectivamente) para as plantas (Tabela 7).

Esses resultados destacam que o uso do polímero PAM é eficiente em aumentar a retenção de água disponível para as plantas em amostras com diferentes volumes (LENTZ, 2020; SAHA et al., 2020; ARANGEL; CINENSE, 2021); conseguindo uniformizar a distribuição de partícula e estabilizar os microagregados, que preservam os poros de menores diâmetros, especialmente os micro e criptoporos, que são mais numerosos em solos coesos (HUANG; ZHAO; SHAO, 2021; SAHA et al., 2020).

Avaliando os resultados da densidade do solo (Ds), dentro dos tratamentos com e sem a aplicação da PAM, observou-se que, no tratamento com PAM, apenas as amostras com cilindro de 20 cm<sup>3</sup> apresentaram diferenças significativas, tendo o menor valor (1,66 g cm<sup>-3</sup>). No tratamento sem PAM, houve maior heterogeneidade entre os resultados, sendo que as amostras com cilindros de 150 cm<sup>3</sup> as que apresentaram as maiores Ds, com 1,77 g cm<sup>-3</sup> (Tabela 7).

Essa variação pode ser explicada pela relação inversa entre a Ds e porosidade do solo,

conforme destacado em Chen (2018) e Turrakheil et al. (2024). No tratamento com PAM, as amostras com cilindros de 20 cm<sup>3</sup> apresentaram uma das maiores porosidades totais (Pt), com 0,38 cm<sup>3</sup> cm<sup>-3</sup>, enquanto, no tratamento sem PAM, as amostras com cilindros de 150 cm<sup>3</sup> obtiveram menor porosidade total, com 0,32 cm<sup>3</sup> cm<sup>-3</sup> (Tabela 7). Esses resultados sugerem que a PAM contribui para a estabilidade estrutural do solo ao interagir com suas partículas como já destacado, diminuindo as alterações na Ds e Pt das amostras (COLOMBI et al., 2017; WANG et al., 2018; FENG et al., 2019; MARTINEZ; DE SOUZA, 2020; YAVITT et al., 2021; THURRAKHEIL; SHAH; NAVEED, 2024).

Por fim, a condutividade hidráulica saturada (Ksat) apresentou alta variabilidade dentro de cada tratamento, tendo o maior CV entre os atributos analisados (56,08 %), onde os resultados, a partir das amostras com os cilindros de 50 cm<sup>3</sup> com PAM, não apresentaram diferenças significativas; o mesmo sendo observado para as amostras coletadas sem PAM, a partir dos cilindros com 150 cm<sup>3</sup>. Além disso, os valores foram estatisticamente semelhantes entre os tratamentos para o mesmo volume (Tabela 7).

Esses resultados indicam uma maior variabilidade na determinação do Ksat, devido a fatores do solo, tamanho da amostra e metodologias como justificado anteriormente para área de mata e reforçados também para a área de pousio (DEB; SHUKLA, 2012; DIXON et al., 2019; MESQUITA et al., 2022). Contudo, apesar da variabilidade apresentada pela Ksat, é possível determiná-la utilizando diferentes volumes de amostras de solo, como os utilizados nessa pesquisa, tomando os devidos cuidados durante as análises com os fatores anteriormente citados.

## 5.3 Curva característica de retenção de água no solo para as áreas de mata e pousio com e sem aplicação da PAM

Quanto ao comportamento da curva característica de retenção de água no solo (CCRAS), a análise dos dados da umidade inicial ( $\theta$  na saturação =  $\theta_{sat}$  = Pt), para o tratamento controle (área de mata), sem aplicação do PAM (Figura 13), é possível observar maior variação nas  $\theta_{sat}$  para os diferentes volumes das amostras, sendo mais elevada para aquelas coletadas nos cilindros menores (20 cm<sup>3</sup>, seguida do 50 cm<sup>3</sup>), ficando mais uniformes nos cilindros maiores.

Em relação às CCRAS das amostras com PAM (Figura 14) a distância entre as  $\theta_{sat}$  das amostras menores (20 e 50 cm<sup>3</sup>) e as demais  $\theta_{sat}$  (100; 150; 200 e 250 cm<sup>3</sup>) foi menor quando comparadas com as da Figura 13, para a curva sem PAM, tendo os valores mais próximos.



**Figura 13** - Curva característica de retenção de água no solo da área de mata sem PAM, para os seis tamanhos das amostras avaliados. Log kPa = Logaritmo do  $\Psi$  em quilopascal.

**Figura 14 -** Curva característica de retenção de água no solo da área de mata com PAM, para os seis tamanhos das amostras avaliados. Log kPa = Logaritmo do  $\Psi$  em quilopascal.



A PAM atua como condicionador estrutural do solo, conforme relatado em Sojka et al. (2007), Lentz et al. (2020), Saha et al. (2020) e Albalasmeh et al. (2021), melhorando a retenção de água. Esse fato, somado ao maior teor de argila presente nesse horizonte Bt (Tabela 1), explica a maior uniformidade na perda de água no solo tratado com PAM.

Ao longo das CCRAS da Figura 13 os valores das umidades volumétricas ( $\theta$ ) das amostras sem PAM tendem a ser mais dispersos, principalmente nos potenciais finais, quando as  $\theta$  têm menores valores. Quando esta análise é feita para as CCRAS das amostras com PAM (Figura 14), suas  $\theta$  têm valores finais mais uniformes, formando dois grupos distintos: um com 20 e 50 cm<sup>3</sup>; e outro com os demais volumes (100 a 250 cm<sup>3</sup>), mantendo certa dispersão entre os dois grupos. A aplicação de PAM em solos que naturalmente já possuem elevados valores de poros menores (micro e criptoporos) conforme Zheng et al. (2022) e Li, Zhao e Zhang (2023) reduz a heterogeneidade na distribuição de água ao criar um ambiente mais uniforme para retenção de água, o que justifica a menor dispersão entre as CCRAS com PAM.

As CCRAS das Figuras 15 e 16 ilustram a dinâmica da água nos poros dos solos da área de pousio, sem e com aplicação de PAM respectivamente, para os diferentes volumes de amostras estudados. Seguindo a mesma tendência da área sob mata (Figuras 13 e 14), as amostras com menores volumes (20 e 50 cm<sup>3</sup>) da área de pousio, para os tratamentos sem e com PAM (Figuras 15 e 16), tiveram comportamento semelhante, onde apresentaram os maiores valores da  $\theta_{sat}$ .

**Figura 15 -** Curva característica de retenção de água no solo da área de pousio sem PAM para os seis tamanhos das amostras avaliados. Log  $kPa = Logaritmo do \Psi em quilopascal.$ 





**Figura 16 -** Curva característica de retenção de água no solo da área de pousio com PAM para os seis tamanhos das amostras avaliados. Log  $kPa = Logaritmo do \Psi$  em quilopascal.

Em relação à dispersão entre as curvas, observa-se nas amostras sem PAM (Figura 15) que as curvas estão mais dispersas entre si, antes e depois do ponto de inflexão (indicado pela seta roxa), diferentemente das curvas das amostras com PAM (Figura 16), que apresentaram maior uniformidade, estando mais próximas entre si.

Portanto, o uso da PAM tende a uniformizar as diferenças entre as  $\theta$  das CCRAS das amostras em todos os volumes avaliados, principalmente nos potenciais finais (menores valores de  $\theta$ ), provavelmente devido a menor variabilidade dos Mi<sub>E+B</sub> das amostras sob PAM (Tabela 7), uma vez que essa classe de poros tem papel fundamental na retenção de água dos solos (SCHARWIES; DINNENY, 2019).

## 5.4 Resistência do solo à penetração de raízes das áreas de mata e pousio com e sem aplicação da PAM

As Figuras 17 e 18 ilustram o comportamento da resistência do solo à penetração de raízes (Rp) em função da umidade volumétrica do solo ( $\theta$ ), comparando área de mata, com e sem a aplicação de PAM, para as amostras coletadas em diferentes volumes.

**Figura 17** - Resistência do solo à penetração de raízes, na área de mata sem PAM, e sua relação com a umidade volumétrica do solo, para os seis tamanhos das amostras avaliados.



**Figura 18** - Resistência do solo à penetração de raízes, na área de mata com PAM, e sua relação com a umidade volumétrica do solo, para os seis tamanhos das amostras avaliados.



É possível notar que a Rp tende a aumentar com a redução da  $\theta$  em ambos os tratamentos (sem e com PAM). O comportamento é diferenciado entre os volumes das amostras, onde as

dos cilindros maiores (100, 150, 200 e 250 cm<sup>3</sup>) apresentaram maior resistência em relação aos volumes menores (20 e 50 cm<sup>3</sup>), independentemente do tratamento aplicado (Figuras 17 e 18). Entretanto, é importante salientar que o uso da PAM aumentou a Rp da maioria das amostras, exceto aquelas coletadas com os cilindros de 100 cm<sup>3</sup>, onde ocorreu redução (12 para 10 MPa).

Isso ocorre porque a PAM, aliada à elevada capacidade de floculação desse solo (grau de floculação de 95%, conforme mostrado na Tabela 1), tende a aglutinar as partículas, formando uma película que aumenta a Rp do solo, devido à redução dos poros maiores (Tabelas 6 e 7). Esta hipótese é corroborada em Soltani et al. (2022), que avaliaram diferentes doses de PAM e concluíram que o polímero possui um efeito marcante na floculação da argila, atuando como um agente compactador entre as partículas do solo. Resultados semelhantes foram apresentados em Dewi, Amalia e Mase (2023), que, ao avaliarem diferentes doses de PAM em solos coesos, observaram que o aumento na dose do polímero tende a aumentar a coesão do solo. Desse modo, as amostras coletadas nos cilindros de maior dimensão apresentam maiores variações estruturais, devido ao maior volume coletado, sendo esse impacto significativamente influenciado pelo uso da PAM.

Assim, como na mata, o uso da PAM elevou a Rp dos solos da área de pousio, sendo que neste caso o aumento foi observado em todos os volumes avaliados (Figuras 19 e 20).



20,0

**Figura 19** - Resistência do solo à penetração de raízes, na área em pousio sem PAM, e sua relação com a umidade volumétrica do solo, para os seis tamanhos das amostras avaliados.



**Figura 20** - Resistência do solo à penetração de raízes, na área em pousio com PAM, e sua relação com a umidade volumétrica do solo, para os seis tamanhos das amostras avaliados.

Este fato reforça que a dose de PAM utilizada afeta negativamente esse atributo, devido sua capacidade de flocular, agregando as partículas, elevando a coesão e consequentemente a Rp do solo (SOLTANI et al., 2022; DEWI; AMALIA; MASE, 2023).

# 5.5 Resistência tênsil dos agregados dos solos das áreas de mata e pousio com e sem aplicação da PAM

Outro atributo utilizado para avaliar a redução da coesão dos solos estudados e melhoria da sua qualidade física via uso da PAM foi a resistência tênsil de agregados dos solos (Rt), cujos resultados estão apresentados na Tabela 8.

Observa-se que os agregados com diâmetro de 2 cm, sem a adição de PAM, tiveram os maiores valores de Rt (56,61 kPa), destacando-se significativamente em relação aos demais tratamentos, exceto nos agregados com 3 cm sem PAM. Por outro lado, os agregados com 2 cm sob PAM apresentaram Rt menor (16,01 kPa), sendo diferente significativamente dos agregados com 2 cm sem PAM. A elevada resistência dos agregados observadas no tratamento sem PAM pode ser atribuída à maior compactação e coesão natural de solos coesos, aliada ao fato de que agregados menores tendem a apresentar maior resistência à ruptura.

<b>T</b> 4	D'^	R	t
1 ratamento	Diametro –	Mata	Pousio
	cm	kP	a
	2	16,01 Ab	46,40 Ab
	3	19,20 Ab	31,88 ABb
Com PAM	4	17,00 Ab	35,12 ABa
	5	27,90 Aa	30,98 ABa
	6	16,27 Aa	15,45 Ba
	2	56,61 Aa	73,06 Aa
	3	44,63 ABa	53,36 ABa
Sem PAM	4	35,26 Ba	45,19 Ba
	5	17,43 Ca	33,63 BCa
	6	17,81 Ca	20,07 Ca
CV	(%)	42,78	37,39

**Tabela 8** - Comparação dos diferentes diâmetros de agregados com e sem a aplicação do PAM na área de mata e pousio para resistência tênsil de agregados.

Rt – resistência tênsil de agregados, CV – coeficiente de variação. Médias seguidas por letras maiúsculas idênticas na coluna não apresentam diferenças entre si para os diferentes diâmetros no mesmo tratamento (dentro do tratamento) e, letras minúsculas idênticas não apresentam diferenças no mesmo diâmetro do agregado e entre os tratamentos pelo teste Tukey à 5% de probabilidade.

De fato, Mamevod et al. (2007) ressaltaram que agregados menores frequentemente possuem maior estabilidade em comparação aos agregados maiores. Por outro lado, divergindo dos resultados encontrados nessa pesquisa, estudos em Georgees et al. (2016) e Albalasmesh et al. (2021), utilizando doses de PAM quatro e dez vezes superiores às empregadas neste estudo, concluíram que a estabilidade dos agregados tende a aumentar com o uso do polímero. Possivelmente devido às doses mais elevadas aplicadas por esses autores e ao fato de os estudos terem sido realizados em solos não coesos, que naturalmente já apresentam elevada Rt.

No presente caso, a PAM pode ter influenciado a formação de ligações mais instáveis com as partículas do solo, por se tratar de amostras em agregados, resultando em menor penetração nos poros e em alguns casos formando poros maiores e espaços internos mais amplos dentro do agregado. Mamevod et al. (2007) destacaram que a solução de PAM pode penetrar até certa profundidade dentro dos agregados, limitando a estabilização da superfície dos poros internos. Esse fato pode facilitar a ruptura dos agregados, diminuindo sua resistência. Imhoff, Silva e Dexter (2002), já destacavam que a redução na Rt dos agregados está associada à força com que as ligações químicas entre as partículas são feitas, seja elas de origem orgânica ou inorgânicas, podendo tornar os agregados instáveis. Contudo, a PAM conseguiu reduzir a Rt para agregados com 2, 3 e 4 cm de diâmetro, quando é feita a avaliação entre os tratamentos para o mesmo diâmetro de agregado (Tabela 8).

O gráfico de Demsar para os agregados da área de mata (Figura 21) apresenta o agrupamento dos diferentes diâmetros de agregados e tratamentos (com e sem PAM), organizados em função da média de Rt (kPa).





O grupo com os maiores valores de Rt foi formado pelos agregados da mata com diâmetros de 2 e 3 cm (sem PAM), sendo os de 2 cm (sem PAM) o mais destacado. De fato, agregados menores tendem a possuir maior estabilidade (MAMEVOD et al., 2007). O maior valor de Rt nesse grupo pode ser explicado pela coesão natural dos solos coesos, como já destacado, e consequentemente, levando aos maiores de Rt (LIMA et al., 2005; ARAÚJO et al., 2018). A presença de matéria orgânica (Tabela 2) e elevada micro e criptoporosidade (Tabela 6) podem ter contribuído para os altos valores de Rt para os agregados da mata, sem a aplicação da PAM.

Avaliando a Rt dos agregados da área de pousio (Figura 22), assim como os da área de mata, os agregados com diâmetro de 2 cm (sem aplicação de PAM) apresentaram os maiores valores (73,06 kPa). Como já justificado, agregados menores possuem maior área de contato entre partículas, promovendo a coesão natural, principalmente em solos coesos (LIMA et al., 2005; MAMEVOD et al., 2007; ARAÚJO et al., 2018). A ausência de PAM neste caso demonstra as boas condições estruturais do solo da área de pousio, apresentando Rt coerentes em agregados pequenos. Isto pode também ser efeito da matéria orgânico presente no solo (Tabela 2), conforme já relatado em Tisdall e Oades (1982), a matéria orgânica têm forte influência na ligação entre partículas do solo e consequentemente na formação de agregados.



**Figura 22** - Agrupamento dos diferentes diâmetros de agregados com e sem PAM para resistência tênsil de agregados na área de pousio pelo gráfico de Demsar.

Assim, como na mata, os agregados da área de pousio com diâmetros de 2 e 3 cm (sem PAM) ficaram no grupo que apresentou os maiores valores de Rt, fortalecendo as justificativas mencionadas anteriormente, onde agregados menores (2 e 3 cm) possuem maior área de contato entre partículas, o que favorece a coesão e a resistência estrutural natural (LIMA et al., 2005; MAMEVOD et al., 2007; ARAÚJO et al., 2018). A ausência de PAM não foi prejudicial à condição estrutural do solo sob pousio, pois, neste caso, o solo com pastagem apresenta boa estrutura intrínseca em agregados pequenos, causando estabilização do solo em níveis microestruturais (WANG; GUO, 2021).

O grupo com menor resistência tênsil foi formado pelos agregados com diâmetros de 3, 4, 5 e 6 cm (com PAM) e 5 e 6 cm (sem PAM), mantendo a mesma tendência da área sob mata, comprovando a eficiência da dose de PAM em reduzir e estabilizar a Rt do solo coeso.

#### 5.6 Volume elementar representativo para os atributos avaliados

A definição do volume elementar representativo (VER) para as amostras utilizadas nos diferentes ensaios para determinação dos atributos estudados, teve como base os resultados de cada atributo, onde, a partir de um dado tamanho, as médias não diferiam significativamente, até certos limites, com o aumento do tamanho das amostras, obtidas via cilindros volumétricos (20; 50; 100; 150; 200 e 250 cm<sup>3</sup>) e agregados, com diferentes diâmetros (2; 3; 4; 5 e 6 cm). Assim, para a análise do VER referente aos atributos físicos dos solos determinados a partir das amostras coletadas via cilindros volumétricos [Pt; Ma; Me, Mi<sub>E+B</sub>; Mi<sub>T</sub>; Crip; AD (100); AD (333); Ds; Ksat e Rp], os resultados dos respectivos atributos foram organizados na Tabela 9.

Área Mata Pousio	A	Volume da Amostra (cm <sup>3</sup> )												
	Atributo	Com PAM					Sem PAM							
		20	50	100	150	200	250	20	50	100	150	200	250	
	Pt (cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> )	-	-	0,34	-	-	-	-	-	0,35	-	-	-	
	Ma (cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> )	-	-	0,05	-	-	-	-	0,04	-	-	-	-	
	Me (cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> )	-	0,04	-	-	-	-	-	-	0,04	-	-	-	
	Mi <sub>E+B</sub> (cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> )	0,11	-	-	-	-	-	0,10	-	-	-	-	-	
	<b>Mi</b> <sub>T</sub> (cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> )	-	-	0,01	-	-	-	-	-	0,02	-	-	-	
Mata	Crip (cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> )	-	-	0,14	-	-	-	-	-	-	0,13	-	-	
	AD-100 (%)	-	-	-	12,40	-	-	-	11,65	-	-	-	-	
	AD-333 (%)	-	-	-	-	6,83	-	-	-	-	5,79	-	-	
	Ds (g cm <sup>-3</sup> )	-	1,73	-	-	-	-	-	1,69	-	-	-	-	
	Ksat (mm h <sup>-1</sup> )	-	35,96	-	-	-	-	22,62	-	-	-	-	-	
	Rp (MPa)	-	-	10,00	-	-	-	-	-	12,00	-	-	-	
	$Pt (cm^3 cm^{-3})$	-	-	0,35	-	-	-	-	-	0,35	-	-	-	
	Ma (cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> )	-	-	0,04	-	-	-	-	-	0,04	-	-	-	
	Me (cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> )	-	-	0,03	-	-	-	-	-	0,03	-	-	-	
	Mi <sub>E+B</sub> (cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> )	-	0,11	-	-	-	-	-	0,11	-	-	-	-	
	$Mi_T (cm^3 cm^{-3})$	0,03	-	-	-	-	-	0,04	-	-	-	-	-	
Pousio	Crip (cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> )	0,14	-	-	-	-	-	0,15	-	-	-	-	-	
	AD-100 (%)	-	-	10,54	-	-	-	-	-	9,20	-	-	-	
	AD-333 (%)	-	-	2,24	-	-	-	-	7,27		-	-	-	
	Ds (g cm <sup>-3</sup> )	-	1,73	-	-	-	-	-	-	1,64	-	-	-	
	Ksat (mm h <sup>-1</sup> )	-	20,09	-	-	-	-	-	-	-	34,11	-	-	
	Rp (MPa)	-	-	12,00	-	-	-	-	-	10,00	-	-	-	

**Tabela 9** - Valores dos atributos físicos do solo nas amostras (volumes dos cilindros) que foram estabelecidos como o volume elementar representativo (VER) em cada atributo avaliado com e sem a aplicação da PAM nas áreas de mata e pousio.

Pt – porosidade total, Ma – macroporosidade, Me – mesoporosidade, Mi <sub>E+B</sub> – Microporosidade estrutural e biológica, Mi<sub>T</sub> – Microporosidade textural, Crip – Criptoporosidade, AD (100) – água disponível na capacidade de campo dos solos arenosos, AD (333) – água disponível na capacidade de campo dos solos argilosos, Ds – densidade do solo, Ksat – condutividade hidráulica do solo saturado.

Desse modo, na Tabela 9 estão apresentados os valores nas amostras em cilindros que foram definidas como VER para cada atributo, onde, a parir destes, o aumento do volume da amostra não mais influenciou os resultados do referido atributo até certo limite. Diferentes atributos podem apresentar distintos valores de VER, e esse volume pode ser influenciado pelo uso da PAM, devido as alterações que o polímero pode causar na estrutura do solo, fato comprovado ao longo dessa pesquisa.

No entanto, para a maioria dos atributos analisados, o volume de 100 cm<sup>3</sup> se mostrou o mais representativo, independentemente da presença da PAM. Esse volume, além de ser o padrão em análises físicas do solo, destacou-se entre os volumes testados. Isso indica que a metodologia e os volumes empregados foram eficazes na avaliação do VER. Esses resultados estão em conformidade com o que propõem Bear (1975), Loyola, Pereira e Cordão Neto (2021), Xue et al. (2022) e Pestrenin et al. (2023), os quais afirmam que o VER pode ser determinado por meio da seleção de tamanhos que formem um gradiente em torno de um ponto central da amostra, sendo essa avaliação baseada na variação observada entre os dados analisados.

Para a definição do VER para as amostras coletadas em agregados, que, neste caso, foram usadas na determinação da Rt, utilizou-se o mesmo fundamento para a definição do VER das amostras obtidas via cilindros. Neste contexto, a Tabela 10 demonstra os valores da Rt nos diâmetros dos agregados que foram estabelecidos como VER para as áreas de mata e pousio com e sem a aplicação do polímero.

	D:âmstas	R	t
Iratamento	Diametro —	Mata	Pousio
	cm	kF	Pa
Com PAM	2	16,01	-
Com PAM	3	-	31,88
Sem PAM	3	44,63	53,36

**Tabela 10** - Valores da resistência tênsil de agregados na área de mata e pousio referentes aos diâmetros dos agregados que foram estabelecidos como o volume elementar representativo (VER), com e sem a aplicação da PAM.

Rt-resistência tênsil de agregados

Na maioria das condições avaliadas (mata e pousio, com e sem aplicação da PAM) os agregados com diâmetro de 3 cm foram os mais representativos, apresentando menor variabilidade em relação aos demais diâmetros avaliados. No entanto, na área de mata com a aplicação da PAM, os agregados com diâmetro de 2 cm também foram considerados como VER. Isso se deve ao efeito do polímero, que atua como agente modificador da estrutura dos

agregados, devido à sua capacidade de formar diferentes ligações com as partículas do solo. Esse mecanismo pode uniformizar os valores de Rt entre os agregados de diferentes diâmetros (MAMEVOD et al., 2007; COLOMBI et al., 2017; FENG et al., 2019; MARTINEZ; DE SOUZA, 2020). Contudo, foi possível definir o VER para os atributos físicos do solo avaliados, com base em diferentes volumes e com a metodologia de aumento progressivo do tamanho das amostras, partindo de um ponto central já conhecido.

### 6 CONCLUSÕES

A presente pesquisa proporcionou avanços significativos no entendimento da condição estrutural e das propriedades físico-hídricas dos solos coesos dos Tabuleiros Costeiros de Pernambuco, contribuindo para o aprimoramento das técnicas de manejo e conservação desses ambientes nas duas áreas de estudo (Mata e Pousio). Os resultados evidenciaram a importância da seleção adequada do Volume Elementar Representativo (VER) para a determinação dos atributos físico-hídricos do solo, demonstrando que volumes de 50 e 100 cm<sup>3</sup> proporcionam medições mais consistentes para parâmetros como porosidade total (Pt) e sua distribuição de tamanho de poros, curva característica de retenção de água no solo (CCRAS), resistência à penetração de raízes (Rp), densidade do solo (Ds) e condutividade hidráulica saturada (Ksat).

Outro ponto relevante foi a confirmação da eficiência da poliacrilamida aniônica (PAM) na melhoria da estabilidade estrutural do solo. O uso da PAM promoveu aumento na retenção de água disponível para as plantas, estabilização dos agregados e redução da resistência tênsil para agregados menores. Entretanto, a aplicação desse polímero também resultou em aumento na Rp e na Ds, o que exige cautela na sua utilização, especialmente em solos já densificados.

Os resultados também destacaram a relevância do diâmetro dos agregados na avaliação da sua resistência tênsil (Rt), sugerindo que agregados com diâmetro igual ou superior a 3 cm são mais adequados para estudos dessa natureza. Foi demonstrado que agregados de menores diâmetros (2 e 3 cm) apresentam maiores Rt devido à maior área de contato entre partículas, favorecendo a coesão natural do solo.

Portanto, a pesquisa contribui não apenas para o entendimento dos processos físicohídricos em solos coesos, mas também para a formulação de estratégias de manejo sustentáveis que promovam a conservação do solo e o aumento da produtividade agrícola.

## **REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

ABDIKAMALOVA, A.; KULDASHEVA, S.; ESHMETOV, I.; BOYMIRZAEV, A.; KHOLNAZAROV, B. Influence of copolymers of acrylamide and acrylic acid on the structure and water strength of soil. **E3S Web of Conferences**, v. 538, p. 03005, 2024. DOI: https://doi.org/10.1051/e3sconf/202453803005

ALBALASMEH, A. A.; HAMDAN, E. H.; GHARAIBEH, M. A.; HANANDEH, A. E. Improving aggregate stability and hydraulic properties of Sandy loam soil by applying polyacrylamide polymer, **Soil and Tillage Research**, Volume 206, p.104-821, 2021. ISSN 0167-1987. DOI: https://doi.org/10.1016/j.still.2020.104-821

ALMEIDA, B. G.; FREITAS, P. L.; TEIXEIRA, W. G.; VIANA, J. H. M.; DONAGEMMA, G. K. **Porosidade**. In: TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. (eds.). Manual de métodos de análise de solo. 3.ed. rev. ampl. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, p.82-94, 2017a. ISBN: 978-85-7035-771-7.

ALMEIDA, B. G.; VIANA, J. H. M.; TEIXEIRA, W. G.; DONAGEMMA, G. K. Densidade do solo. In: TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. (eds.). Manual de métodos de análise de solo. 3.ed. rev. ampl. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, p.65-75, 2017b. ISBN: 978-85-7035-771-7.

AMIRI, E. H. EMAMI; MOSADDEGHI, M. R; ASTARAEI, A. R. Shear strength of an unsaturated loam soil as affected by vetiver and polyacrylamide. **Soil and Tillage Research**, v. 194, p. 104331, nov. 2019. DOI: https://doi.org/10.1016/j.still.2019.104331

ANDRADE, K. R. Atributos físico-hídricos de solos coesos da zona da mata de Pernambuco sob ação de condicionadores químicos. Dissertação (Mestrado em Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo) - Universidade Federal Rural de Pernambuco. Recife, p. 115. 2014.

ARANGEL, C.; CINENSE, M. Water-Saving Technique using Polyacrylamide Polymer as Soil Amendments. **International Journal os Science and Technoloy**, v. 5, n. 2, 2021. DOI: https://doi.org/10.22137/clsu-ijst.2021.isn2.vln5

ARAÚJO, A. M. S. S.; MENEZES, A. S.; ALENCAR, T. L.; SILVA, C. P.; ASSIS JÚNIOR, R. N.; ROMERO, R. E.; COSTA, M. C. G.; ALMEIDA, B. G.; MOTA, J. C. A. Tensile strength in horizons with and without cohesive character: Variability and relation with granulometry. **Catena**, v. 166, p. 290-297, 2018. DOI: https://doi.org/10.1016/j.catena.2018.04.017

BEAR, J. Dynamics of fluid in porous media. **Soil Science**, v 120 (2), p. 162-163. 1975. DOI: 10.1097/00010694-197508000-00022

BEAR, J. Dynamics of fluids in porous media. New York, Elsevier, p. 764, 1972. ISBN: 978-0-486-65675-5.

BECK, H. E.; ZIMMERMANN, N. E.; MCVICAR, T. R.; VERGOPOLAN, N.; BERG, A.; WOOD, E. F. Present and future Köppen-Geiger climate classification maps at 1-km resolution. **Scientific Data**, v. 5, p. 180-214, 2018. DOI: https://doi.org/10.1038/sdata.2018.214

BORGES, J. A. R.; PIRES, L. F. Representative elementary area (REA) in soil bulk density measurements through gamma ray computed tomography. **Soil and Tillage Research**, v. 123, p. 43-49, 2012. DOI: https://doi.org/10.1016/j.still.2012.03.008

BRONICK, C. J.; LAL, R. Soil structure and management: a review. **Geoderma**, v. 124, p. 3-22, 2005. DOI: https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2004.03.005

COLOMBI, T.; BRAUN, S.; KELLER, T.; WALTER, A. Artificial macropores attract crop roots and enhance plant productivity on compacted soils. **Science of The Total Environment**, v. 574, p. 1283-1293, 2017. DOI: https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.07.194

CORBETT, P. W. M.; ANGGRAENE, S.; BOWDEN, D. The use of the probe permeameter in carbonates - addressing the problems of permeability support and stationarity. **The Log Analyst**, 40 (5), p.316-326, 1999. DOI: SPWLA-1999-v40n5a1

CORRÊA, M. M.; KER, J. C.; BARRÓN, V.; TORRENT, J.; CURI, N.; TORRES, T. C. P. 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**, Campinas, v. 32 (1), p. 297-313, 2008. DOI: https://doi.org/10.1590/S0100-06832008000100028

CHEN, Y. Curvas de retenção de água no solo derivadas como uma função da densidade seca do solo. **Geo Hazards**. v. 1(1), p. 3-19, 2018. DOI: https://doi.org/10.3390/geohazards1010002

CHENG, Y.C.; WANG, C.P.; LIU, K.Y. PAN, S. Y. Towards sustainable management of polyacrylamide in soil-water environment: Occurrence, degradation, and risk. **Science of The Total Environment**. v. 926, p. 171587, 2024. DOI: https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.17158

CHIMISSO, V. CONTI, S., KONG, P., FODOR, C., MEIER, W. P. Metal cation responsive anionic microgels: behaviour towards biologically relevant divalent and trivalent ions. **Soft Matter**, v. 17, n. 3, p. 715–723, 2021. DOI: http://xlink.rsc.org/?DOI=d0sm01458c

DANE, J.H.; HOPMANS, J.W. Water retention and storage. In: DANE, J.H; TOPP, G.C. (Ed). **Methods of soil analysis: Part 4 – physical methods**. Madison: American Society of America, p. 671-720, 2002.

DEB, S. K.; SHUKLA, M. K. Variability of hydraulic conductivity due to multiple factors. **American Journal of Environmental Sciences**, v. 8(5), p. 489-502, 2012. DOI: 10.3844/AJESSP.2012.489.502.

DEWI, A.; AMALIA, D.; MASE, L. Z. Experimental Study of a Cohesive Soil Modified by Polyacrylamide on Local Soils in West Java, Indonesia. **Transportation Infrastructure Geotechnology**, v. 11, p. 588–611, 2023. DOI: https://doi.org/10.1007/s40515-023-00295-1

DEXTER, A.R.; KROESBERGEN, B. Methodology for determination of tensile strength of soil aggregates. **Journal of Agricultural Engineering Research**, New York, v.31, n. 2, p. 139-147, 1985. DOI: https://doi.org/10.1016/0021-8634(85)90066-6

DIAS, A. N. C.; GUADAGNIN, F.; RANGEL, C. V. G. T.; CHEMALE JUNIOR, F.; OLIVEIRA, T. R. P.; MOURA, C. A.; PEREIRA, V. Q.; ALVES, J. S. E. Provenance of Neogene deposits of Barreiras Formation in the southeastern Brazilian continental margin. **International Journal of Earth Sciences**, v. 110, p. 233–249, 2021. DOI: https://doi.org/10.1007/s00531-020-01949-y DIXON, N.; CROSBY, C. J.; STIRLING, R.; HUGHES, P. N.; SMETHURST, J.; BRIGGS, K.; HUGHES, D.; GUNN, D.; HOBBS, P.; LOVERIDGE, F.; GLENDINNING, S.; DIJKSTRA, T.; HUDSON, A. In situ measurements of near-surface hydraulic conductivity in engineered clay slopes. **Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology**, v. 52(1), p. 123-135, 2019. DOI: 10.1144/QJEGH2017-059

EDWARDS, A. P.; BREMNER, J.M. Microaggregates in soils. Journal of Soil Science, v. 18, p. 64 – 73, 1967. DOI: https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.1967.tb01488.x

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 3.ed. Brasília: EMBRAPA, p. 353, 2018.

FENG, Y.; WANG, J.; LIU, T.; BAI, Z.; LENDO, L. Using computed tomography images to characterize the effects of soil compaction resulting from large machinery on threedimensional pore characteristics in an opencast coal mine dump. **Journal of Soils and Sediments**. v. 19. p. 1467-1478, 2019. DOI: 10.1007/s11368-018-2130-0

FISCHER, J. The choice of representative volumes in the approximation of effective properties of random materials. **Rational Mechanics and Analysis**, v. 234(2): p. 635-726, 2019. DOI: 10.1007/S00205-019-01400-W

FLINT, A. L.; FLINT, L.E. Particle density. In: DANE, J. H.; TOPP. G. C. (Ed.). Methods of soil analysis. Madison: Soil Science Society of America, pt. 4, p. 229-240, 2002.

GASPARETO, J.V.; OLIVEIRA, J. A. T.; ANDRADE, E.; PIRES, L. F. Volume elementar representativo em função dos usos da terra e processos do solo com base na análise do sistema de poros 3D. **Agricultura**, 13(3), p. 736, 2023. DOI: https://doi.org/10.3390/agriculture13030736

GEE, G. W.; OR, D. Particle-size analysis. In: DANE, J. H.; TOPP, G. C. (Ed.). Methods of soil analysis. Part 4. Physical methods. Madison: SSSA Book Series No. 5, p. 255-293, 2002.

GEORGEES, R. N.; HASSAN, R. A.; EVANS, R. P.; JEGATHEESAN, P. An evaluation of performance-related properties for granular pavement materials using a polyacrylamide additive. **International Journal of Pavement Engineering**, v. 19(2), p. 153–163, 2016. DOI: https://doi.org/10.1080/10298436.2016.1172710

GIAROLA, N.F.B., SILVA, A.P., TORMENA, C., SOUZA, L.S., RIBEIRO, L.P. 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. DOI: https://doi.org/10.1590/S0100-06832001000100026

GROSSMAN, R. B.; REINSCH, T. G. The solid phase. In DANE, J. H.; TOPP, G. C. (Eds.), SSSA Book Series: **5. Methods of Soil Analysis Part 4-Physical Methods**. p. 201–415, 2002. Madison, WI: Soil Science Society of America Inc.

HILLEL, D. Environmental soil physics: fundamentals, applications, and environmental considerations. New York: Academic Press, p. 771, 1998. ISBN-13: 9780123485250.

HUANG, L.; ZHAO, W.; SHAO, W. A resposta dos parâmetros fisiológicos das plantas à disponibilidade de água no solo durante a seca prolongada é afetada pela textura do solo. **Journal of Arid Land**, v. 13, n. (7), p. 688-698, 2021. DOI: 10.1007/S40333-021-0075-4

HUOT, C.; PHILP, J.; ZHOU, Y.; DENTON, M. D. (2025). Root Penetration Is Associated with Root Diameter and Root Growth Rate in Tropical Forage Grasses. **Grasses**, v. 4, p. 4, 2025. DOI: https://doi.org/10.3390/grasses4010004

IMHOFF, S.; SILVA, A.P.; DEXTER, A.R. Factors contributing to the tensile strength and friability of Oxisols. **Soil Science Society American Journal, Amsterdan**, v. 66, n. 3, p. 1656-1661, 2002. DOI: https://doi.org/10.2136/sssaj2002.1656

JACOMINE, P.K.T. Distribuição Geográfica, Características e Classificação dos Solos Coesos dos Tabuleiros Costeiros. In: **Anais da Reunião Técnica Sobre Solos dos Tabuleiros Costeiros**, Cruz das Almas: EMBRAPA/UFBA, p. 13–26, 1996.

JUNG, J; JANG, J. Soil–water characteristic curve of sediments containing a polyacrylamide solution. **Géotech Lett**, v. 6(1), p. 89–94, 2016. DOI: https://doi.org/10.1680/jgele.15.00163

KOESTEL, J.; LARSBO, M.; JARVIS, N. Scale and REV analyses for porosity and pore connectivity measures in undisturbed soil. **Geoderma**, v. 366, p. 114-206, 2020. DOI: https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114206

LABAHN, S. K., FISHER, J. C., ROBLETO, E. A., YOUNG, M. H., MOSER, D. P. Microbially mediated aerobic and anaerobic degradation of acrylamide in a western United States irrigation canal. **Journal of Environmental Quality**, 39, 5, p. 1563–1569, 2010. DOI: https://doi.org/10.2134/jeq2009.0318

LENTZ, R. D. Long-term water retention increases in degraded soils amended with crosslinked polyacrylamide. **Agronomy Journal**, v. 112, n. 4, p. 2569-2580, 2020. DOI: https://www.doi.org/10.1002/AGJ2.20214

LI, F. H.; WANG, A. P. Interaction effects of polyacrylamide application and slope gradient on potassium and nitrogen losses under simulated rainfall. **Catena**, v.136, p. 162–174, 2016. DOI: https://doi.org/10.1016/j.catena.2015.05.008

LIMA NETO, J. A.; RIBEIRO, M. R.; CORRÊA, M. M.; SOUZA JUNIOR, V. S.; LIMA, J. F. W. F.; FERREIRA, R. F. A. L. Caracterização e gênese do caráter coeso em latossolos amarelos e argissolos dos tabuleiros costeiros do estado de Alagoas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, n. 4, p. 1001-1011, 2009. DOI: https://doi.org/10.1590/S0100-06832009000400024

LIMA, H.V.; SILVA, A.P.; JACOMINE, P.T.K.; ROMERO, R.E.; LIBARDI, P.L. Identificação e caracterização de solos coesos no estado do Ceará. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.28, p.467-476, 2004. DOI: https://doi.org/10.1590/S0100-06832004000300008

LIMA, H.V.; SILVA, A.P.; ROMERO, R.E.; JACOMINE, P.K.T. Physical behavior of a gray cohesive argisol in Ceara. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 29, p. 33-40, 2005. DOI: https://doi.org/10.1590/S0100-06832005000100004

LI, X.; ZHAO, H.; ZHANG, L. Microporosity Structures of Widely-Graded Soils. In: Fundamental Behavior of Unsaturated Widely-Graded Soil. **Springer Nature**. n. 1, p. 41-78, 2023. DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-19-3402-5\_3

LOYOLA, A. C.; PEREIRA, J. M.; CORDÃO NETO, M. P. General Statistics-Based Methodology for the Determination of the Geometrical and Mechanical Representative Elementary Volumes of Fractured Media. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, v. 54, p. 1841–1861, 2021. DOI: https://doi.org/10.1007/s00603-021-02374-6

LU, M.; WU, X; WEI, X. Chemical degradation of polyacrylamide by advanced oxidation processes. **Environmental Technology**, v. 33, p.1021–1028. 2012. DOI: https://doi.org/10.1080/09593330.2011.606279

MAMEDOV, A, I.; BECKMANN, S.; HUANG, C.; LEVY, G. J. Aggregate Stability as Affected by Polyacrylamide Molecular Weight, Soil Texture, and Water Quality. **Soil Science Society of America Journal**, v. 71(6), p. 1909-1918, 2007. DOI: https://doi.org/10.2136/sssaj2007.0096

MARCELO, V. F.; ALMEIDA, B. G.; ARAÚJO FILHO, J. C.; SOUA, W. L. S. Disponibilidade hídrica de solo coeso sob a ação de poliacrilamida: qualidade física ambiental. **Revista Brasileira de Ciências Ambientais**, n. 42, p. 12-25, 2016. DOI: http://dx.doi.org/10.5327/Z2176-947820160009

MARTINEZ, P.; DE SOUZA, I. F. Genesis of pseudo-sand structure in Oxisols from Brazil – A review, **Geoderma Regional**, v. 22, p. e00292, 2020. DOI: https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2020.e00292

MELO, D. M.; ALMEIDA, B. G.; SOUZA, E. R.; SILVA, L. S.; JACOMINE, P. K. T. Structural quality of polyacrylamide-treated cohesive soils in the coastal tablelands of Pernambuco. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 38, p. 476-485. 2014. DOI: https://doi.org/10.1590/S0100-06832014000200012

MEHRA, O. P.; JACKSON, M. L. Iron oxide removal from soils and clays by a dithionite citrate system buffered with sodium bicarbonate. **Clay and clay minerals**, New York, v.7, 1960. DOI: https://doi.org/10.1016/B978-0-08-009235-5.50026-7

MESQUITA, G. M.; DOS SANTOS, F. C. V.; DORES, A. L.; CORRECHEL, V. Spatial variability of hydraulic conductivity of saturated soil in conservation unit. **Revista de Agricultura Neotropical**, v. 9(1), p. e6532-e6532, 2022. DOI: 10.32404/rean.v9i1.6532

MIRANDA, M. F. A.; FREIRE, M. B. S.; ALMEIDA, B. G.; FREIRE, A. G.; FREIRE, F. J.; PESSOA, L. G. M. Improvement of degraded physical attributes of a saline-sodic soil as influenced by phytoremediation and soil conditioners, **Archives of Agronomy and Soil Science**, v. 64:9, p. 1207-1221, 2018. DOI: https://doi.org/10.1080/03650340.2017.1419195

MOREAU, A. M. S. S.; KER, J. C.; COSTA, L. M.; GOMES, F. H. Caracterização de solos de duas topossequências em tabuleiros costeiros do sul da Bahia. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 30, n. 6, p. 1007-1019, 2006. DOI: https://doi.org/10.1590/S0100-06832006000600010

MOTA, J. C. A.; MENEZES, A. S.; NASCIMENTO, C. D. V.; ALENCAR, T. L.; ASSIS JÚNIOR, R. N.; TOMA, R. S.; ROMERO, R. E.; COSTA, M. C. G.; COOPER, M. 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. DOI: https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2018.e00197

MCKEAGUE, J. A.; DAY, J. Dithionite-and oxalate-extractable Fe and Al as aids in differentiating various classes of soils. **Canadian Journal of Soil Science**, v. 46, n. 1, p. 13-22, 1966. DOI: https://doi.org/10.4141/cjss66-003

MCDONALD, R.C., ISBELL, R.F., SPEIGHT, J.G., WALKER, J., HOPKINS, M.S., 1990. Australian Soil and Land Survey Field Handbook, 2nd ed. Inkata Press, Melbourne.

NELSON, D.W.; SOMMERS, L.E. Total carbon, organic carbon, and organic matter. In: BLACK, C.A., ed. **Methods of soil analysis. Part 3. Chemical methods**. Madison, Soil Science of America and American Society of Agronomy, p.961-1010, 1996.

PREVEDELLO, C. L.; ARMINDO, R.A. **Física do solo com problemas resolvidos**. 2<sup>a</sup> Edição revisada e ampliada. Curitiba: C. L. Prevedello, p. 474, 2015. ISBN: 8590757420.

62

PESTRENIN, V. M.; PESTRENINA, I. V.; LANDIK, L. V.; FAGALOV, A. R.; PELEVIN A. G. Representative volume and effective material characteristics of periodic and statistically uniformly reinforced fiber composites. **PNRPU Mechanics Bulletin**, n.1, p. 103-110, 2023. DOI: https://doi.org/10.15593/perm.mech/2023.1.10

PIRES, L. F.; OLIVEIRA, J. A. T.; GASPARETO, J. V.; POSADAS, A. N. D.; Lourenço, A. L. F. Impact of Wetting-Drying Cycles on Soil Intra-Aggregate Pore Architecture Under Different Management Systems. **AgriEngineering**, v. 7, p. 9, 2024. DOI: https://doi.org/10.3390/agriengineering7010009

RAB, M. A.; HALING, R. E.; AARONS, S. R.; HANNAH, M.; YOUNG, I. M.; GIBSON, D. Evaluation of X-ray computed tomography for quantifying macroporosity of loamy pasture soils, **Geoderma**, v. 213, p. 460-470, 2014. DOI: https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2013.08.037

RABOT, E.; WIESMEIER, M.; SCHULUTER, S. VOGEL, H. J. Soil structure as an indicator of soil functions: A review. **Geoderma**, v. 314, p. 122-137, 2018. DOI: https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.11.009

REYNOLDS, W.D.; ELRICK, D.E. **Constant head well permeameter. Methods of soil analysis**. Part 4. Physical Methods (Soil Science Society of America Book Serries), v. 5, 2002.

REZENDE, J. O. **Solos coesos dos tabuleiros costeiros**: limitações agrícolas e manejo. Salvador: SEAGRI-SPA, p. 117, 2000.

RÊGO, L. G. S.; SILVA, J. J. A.; SOUZA, C. M. M.; PORTELA, J. C.; MOURA, I. N. B. M.; SILVA, A. C. R.; MIRANDA, N, O. Pedogenesis in the Barreiras Formation Under Climates of Rio Grande do Norte, Brazil. Journal of Agricultural Science, v. 11, p. 19-29, 2019. DOI: https://doi.org/10.5539/jas.v11n16p19

RIX, J. P., LO, T. H., GHOLSON, D. M., SPENCER, G. D., SINGH, G. Effects of conservation practices on rainfed maize yield, furrow water infiltration, and soil moisture for surface sealing loam soils in the Yazoo-Mississippi Delta. **Soil Science Society of America Journal**, v. 87, p. 1485-1497, 2023. DOI: https://doi.org/10.1002/saj2.20595

SANTOS, C. L. A. **Curva característica de água no solo: relações com estrutura e volume da amostra**. Dissertação (Mestrado em agronomia)- Universidade Federal do Ceará, Fortaleza-CE, p. 33, 2014.

SAHA, A.; RATTAN, B.; SEKHARAN, S.; MANNA, U. Quantifying the interactive effect of water absorbing polymer (WAP)-soil texture on plant available water content and irrigation frequency. **Geoderma**, v. 368, p.114-310, 2020. DOI: https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114310

SIX, J., FELLER, C., DENEF, K., OGLE, S. M., DE MORAES, J. C., SA, ALBRECHT, A. Soil organic matter, biota and aggregation in temperate and tropical soils - Effects of no tillage. **Agronomie**, v. 22, n. 7-8, p. 755–775, 2002. DOI: https://10.1051/agro:2002043

SOUZA JUNIOR, A. J. **Dinâmica da poliacrilamida em solos coesos sob efeito da aplicação de silicato**. Tese (Doutorado em Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo) - Universidade Federal Rural de Pernambuco. Recife, p. 95. 2024.

SOJKA, R.E.; SURAPANENI, A. Potential use of polyacrylamide (PAM) in Australian agriculture to improve off and on-site environmental impacts and infiltration management. Tatura: **Institute for Sustainable Irrigated Agriculture**, v. 39, p. 1-37, 2000. DOI: https://eprints.nwisrl.ars.usda.gov/id/eprint/1247

SOJKA, R. E.; BJORNEBERG, D. L., ENTRY, J. A.; LENTZ, R. D.; ORTZ, W. J. Polyacrylamide in agriculture and environmental land management. Advances in agronomy, v. 92, p. 75–162, 2007.DOI: https://doi.org/10.1016/S0065-2113(04)92002-0

SOLTANI, A.; DENG, U.; TAHERI, A.; O'KELLY, B. C. Intermittent swelling and shrinkage of a highly expansive soil treated with polyacrylamide, **Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering**, v. 14, p. 252-261, 2022. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2021.04.009

SCHARWIES, J. D.; DINNENY, J. R. Water transport, perception, and response in plants. **Journal of Plant Research**, v. 132 (3), p. 311-324, 2019. DOI: 10.1007/S10265-019-01089-8

TANG, N.; DULTZ, S.; GERTH, d.; KLUMPP, E. Soil colloids as binding agents in the formation of soil microaggregates in wet-dry cycles: A case study for arable Luvisols under different management, **Geoderma**, v. 443, p.116830, 2024. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2024.116830

TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. **Manual de métodos de análise de solo**. 3.ed. rev. ampl. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, p. 514, 201. ISBN: 978-85-7035-771-7

TISDALL, J.M., OADES, J.M. Organic matter and water-stable aggregates in soils. **Journal of Soil Science**. v. 33, p.141 – 163, 1982. DOI: https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.1982.tb01755.x

TURRAKHEIL, K, S.; SHAH, S, S, A.; NAVEED, M. Evolution of Soil Pore Structure and Shear Strength Deterioration of Compacted Soil under Controlled Wetting and Drying Cycles. **Atmosphere**, v. 15 (7): p. 843, 2024. DOI: https://doi.org/10.3390/atmos15070843.

THAKUR, V. K; THAKUR, M. K.; VOICU, S.I. Gels Horizons: From Science to Smart Materials. Editora Springer, p. 405, 2018.

VIEIRA, J. M.; ROMERO, R. E.; FERREIRA, T. O.; ASSIS JÚNIOR, R. N. Contribuição de material amorfo na gênese de horizontes coesos em Argissolos dos Tabuleiros Costeiros do Ceará. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 43, n. 4, p. 623-632, 2012. DOI: https://doi.org/10.1590/S1806-66902012000400002

VIK, B., BASTESEN, E., SKAUGE, A. Evaluation of representative elementary volume for a vuggy carbonate rock – part I: porosity, permeability, and dispersivity. **Journal of Petroleum Science and Engineering**, v. 112, p. 36-47, 2013. DOI: https://doi.org/10.1016/j.petrol.2013.03.029

WANG, P., WANG, J., ZHANG, H., DONG, Y., ZHANG, Y. The role of iron oxides in the preservation of soil organic matter under long-term fertilization. **Journal of Soils and Sediments**, v. 19, n. 2, p. 588–598, 2018. DOI: https://doi.org/10.1007/s11368-018-2085-1

WANG, J.; GUO, D. Effects of Grassland Patches on the Composition and Stability of Soil Aggregates in the Qinghai-Tibet Plateau. **IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science**, v. 793, p. 012013, 2021.DOI: https://doi.org/10.1088/1755-1315/793/1/012013

WATTS, C.W.; DEXTER, A. R. Soil friability: Theory, measurement and the effects of management and organic carbon content. **European Journal of 'Soil Science**, v. 49, p. 73-84, 1998. DOI: https://doi.org/10.1046/j.1365-2389.1998.00129.x

YANG, J.; LI, S.; DI, H.; LIU, D.; WANG, X.; ZHAO, Y. D. (2023). Influence of anionic polyacrylamide on the freeze–thaw resistance of silty clay. **Cold Regions Science and Technology**. v. 219, p. 104-111, 2023. DOI: https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2023.104111

YAVITT, J. B., PIPES, G. T., OLMOS, E. C., ZHANG, J., SHAPLEIGH, J. P. Soil Organic Matter, Soil Structure, and Bacterial Community Structure in a Post-Agricultural Landscape. **Frontiers in Earth Science**, v. 9, p. 1-15, 2021. DOI: https://doi.org/10.3389/feart.2021.590103

YUAN, X. F.; JIAN, J. S; WEI, X. D.; YING, Y. Application of polyacrylamide reducing nitrate-N and soluble P losses from a Lou soil in a soil column experiment. **International Agricultural Engineering Journal**, v. 26(1), p. 1–8, 2017. ISBN: 0858-2114.

XUE, Y.; CAI, Z.; ZHANG, H.; LIU, Q.; CHEN, L.; GAO, J.; HU, F. Insights into Heterogeneity and Representative Elementary Volume of Vuggy Dolostones. **Energies**, v. 15, p. 5817, 2022. DOI: https://doi.org/10.3390/en15165817

ZHANG, T.; DENG, Y.; LAN, H.; ZHANG, F.; ZHANG, H.; WANG, C.; TAN, Y.; YU, R. Experimental Investigation of the Compactability and Cracking Behavior of Polyacrylamide-Treated Saline Soil in Gansu Province, China. Polymers, v. 11. p. 90, 2019. DOI: https://doi.org/10.3390/polym11010090

ZHENG, J.; YANG, Z.; GAO, H.; LAI, X.; WU, X.; HUANG, Y. Experimental study on microstructure characteristics of saturated remolded cohesive soil during consolidation. Scientific Reports, v. 12, p. 18378, 2022. DOI: https://doi.org/10.1038/s41598-022-23323-5

## ANEXO A - DESCRIÇÃO GERAL DO PERFIL - Itapirema, Goiana - PE

## **DATA**: 21/03/2013

**CLASSIFICAÇÃO** – ARGISSOLO AMARELO Distrocoeso epirredóxico, A moderado, textura arenosa / argilosa, fase floresta subperenifólia relevo plano.

**LOCALIZAÇÃO, MUNICÍPIO, ESTADO E COORDANADAS** – Estação de Itapirema – IPA, Goiana – PE. Parte sul da estação, ao lado da área de mata.

SITUAÇÃO, DECLIVE E COBERTURA VEGETAL SOBRE O PERFIL – Topo plano de tabuleiro com 0 - 2 % de declive, sob cobertura de floresta secundária (floresta subperenifólia).

**ALTITUDE** - +/- 70 m

LITOLOGIA E CRONOLOGIA – Sedimentos do Grupo Barreiras do período Terciário.

MATERIAL ORIGINÁRIO – Sedimentos areno-argilosos.

**PEDREGOSIDADE** – Não pedregosa.

**ROCHOSIDADE** – Não rochosa.

**RELEVO LOCAL** – Plano.

**RELEVO REGIONAL** – Plano e suave ondulado.

**EROSÃO** – Não aparente.

DRENAGEM – Bem à moderadamente drenado

**VEGETAÇÃO PRIMÁRIA** – Floresta tropical, subperenifólia.

USO ATUAL – Reserva florestal em área circundada por cana-de-açúcar.

DESCRITO E COLETADO POR – José Coelho, Brivaldo Almeida e Kairon Andrade.

### ANEXO B - DESCRIÇÃO MORFOLÓGICA DO PERFIL - Itapirema, Goiana - PE

**Oo** (5 - 0 cm), camada orgânica constituída por folhas e raízes, parcialmente decompostas, com resíduo de galhos de árvore, com espessura diversificada; transição plana e abrupta.

A (0 – 14) cm, (10 YR 4/2, úmida); areia; grãos simples e fraca à moderada, pequena e média blocos subangulares e granular; muitos poros pequenos e comuns médios e grandes; solta, não plástica e não pegajosa; transição plana e clara.

E (14 – 30) cm, (10 YR 5/3, úmida); areia franca (+); fraca à moderada, pequena e média blocos subangulares e angulares; muitos poros pequenos e comuns médios; muito friável, não plástica e não pegajosa, transição plana e clara.

**BE** (30 - 43) cm, (10 YR 6/3, úmida); franco-arenosa; fraca pequena e média blocos subangulares; muitos poros pequenos e médios; muito friável, não plástica e não pegajosa, transição plana e clara.

**Bt (43 – 70) cm**, (10 YR 6/4); franco-argilo-arenosa; maciça e partes, fraca pequena e média blocos subangulares; poros comuns pequenos e poucos médios; friável com partes firmes, plástica e pegajosa, transição plana e gradual.

**Bt/Bw (70 – 135) cm**, (10 YR 7/6), mosqueado abundante, médio e distinto (5 YR 6/6); argiloarenosa; fraca pequena e média blocos subangulares e angulares; muitos poros pequenos e poucos médios; muito friável com partes muito firmes (mosqueados), plástica e pegajosa, transição plana e difusa.

**Bw (135 – 190) cm**, (10 YR 7/8), mosqueado pouco, médio e proeminente (2,5 YR 4/6); argiloarenosa; fraca pequenas e média blocos subangulares com aspecto maciço poroso; muitos poros pequenos e poucos médios; muito friável, plástica e pegajosa.

**RAÍZES** – Muitas finas, comuns médias e raras grossas no A; poucas finas e médias e raras grossas no E; raras finas e médias no BE e no Bt, no Bt/Bw e no BW.

## **OBSERVAÇÕES**:

- O solo estava úmido, não sendo possível tirar a cor e consistência à seco.

- O horizonte de máxima coesão é o Bt.

- O horizonte Bw no estado úmido, aparentemente não apresenta coesão.

- Os moqueados vermelho do horizonte Bw/Bt, se assemelhou a um horizonte plástico fragmentado.

- Os moqueados do horizonte Bt (horizonte com coesão máxima) indicam feições redoximórficas sugerindo restrições de permeabilidade neste horizonte. Estes mosqueados estão mais concentrados no topo do horizonte Bt.

## ANEXO C - TABELAS DE ANÁLISE DE VARIÂNCIA DOS DADOS DO EXPERIMENTO PARA ÁREAS DE MATA E POUSIO.

Variável	Fonte de	Graus de	Tipo do	Soma dos	Quadrado	F valor	P>F
	variação	libertade	erro (III)	quadrados	médio		
	Modelo	11		0,2963	0,0269	78,00	<0,0001
Pt	Erro	204		0,0704	0,0003		
(cm <sup>3</sup> .cm <sup>-3</sup> )	Total	215		0,3668			
-	Tratamento	1	0,0013		0,0013	3,96	0,0479
	Vcil	5	0,2907		0,0580	168,35	<0,001
	Trat x Vcil	5	0,0042		0,0008	2,45	0,035
	Modelo	11		0,0589	0,0053	22,51	<0,0001
Ma	Erro	99		0,0235	0,0002		
(cm <sup>3</sup> .cm <sup>-3</sup> )	Total	110		0,0824			
-	Tratamento	1	0,0001		0,0001	0,36	0,5500
	Vcil	5	0,0521		0,0104	43,83	<0,001
	Trat x Vcil	5	0,0077		0,0015	6,48	<0,001
	Modelo	11		0,0276	0,0025	24,23	<0,0001
Me	Erro	78		0,0080	0,0001		
(cm <sup>3</sup> .cm <sup>-3</sup> )	Total	89		0,0357			
-	Tratamento	1	0,0013		0,0013	12,96	0,0006
	Vcil	5	0,0135		0,0027	26,16	<0,001
	Trat x Vcil	5	0,0074		0,0014	14,41	<0,001
	Modelo	11		0,0039	0,0004	4,59	0,0009
Mi (E+B)	Erro	24		0,0018	0,0001		
(cm <sup>3</sup> .cm <sup>-3</sup> )	Total	35		0,0058			
-	Tratamento	1	0,0012		0,0012	16,03	0,0005
	Vcil	5	0,0004		0,0001	1,15	0,3642
	Trat x Vcil	5	0,0022		0,0004	5,75	0,0013
	Modelo	11		0,0041	0,0003	6,91	<0,0001
Mi <sub>T</sub>	Erro	24		0,0012	0,0001		
(cm <sup>3</sup> .cm <sup>-3</sup> )	Total	35		0,0054			
-	Tratamento	1	0,0003		0,0003	5,88	0,2320
	Vcil	5	0,0015		0,0003	5,79	0,0012
	Trat x Vcil	5	0,0022		0,0004	8,23	0,0001
	Modelo	11		0,0100	0,0009	6,23	<0,0001
Crip	Erro	24		0,0035	0,0001		
(cm <sup>3</sup> .cm <sup>-3</sup> )	Total	35		0,0135			

 Tabela 11 - Análise de variância dos dados do experimento para área de Mata.

	Tratamento	1	0,0002		0,0002	1,80	0,1927
	Vcil	5	0,0059		0,0011	8,07	0,0001
	Trat x Vcil	5	0,0038		0,0008	5,28	0,0021
	Modelo	11		326,04	29,64	13,22	<0,0001
AD (100)	Erro	24		148,02	2,24		
(%)	Total	35		474,06			
	Tratamento	1	14,86		14,86	6,63	0,0123
	Vcil	5	277,03		55,41	24,70	<0,0001
	Trat x Vcil	5	44,15		8,83	3,94	0,0035
	Modelo	11		326,04	29,64	13,22	<0,0001
AD (333)	Erro	24		148,02	2,24		
(%)	Total	35		474,06			
	Tratamento	1	14,86		14,86	6,63	0,0123
	Vcil	5	277,03		55,41	24,70	<0,0001
	Trat x Vcil	5	44,15		8,83	3,94	0,0035
	Modelo	11		0,3627	0,03	7,21	<0,0001
Ds	Erro	118		0,5395	0,00		
(g.cm <sup>-3</sup> )	Total	129		0,9023			
	Tratamento	1	0,0101		0,0101	2,22	0,1389
	Vcil	5	0,3019		0,0603	13,21	<0,0001
	Trat x Vcil	5	0,0500		0,0100	2,19	0,0601
	Modelo	11		5171,89	470,17	3,56	0,0003
Ksat	Erro	118		13191,22	131,91		
$(mm.h^{-1})$	Total	129		18363,11			
	Tratamento	1	51,08		51,08	0,39	0,5352
	Vcil	5	3365,59		673,12	5,10	0,0003
	Trat x Vcil	5	2024,73		404,94	3,07	0,0128
	Modelo	9		18.292,14	2.032,46	15,44	<0,0001
Rt	Erro	90		11.845,14	131,61		
(kPa)	Total	99		30.137,28			
	Tratamento	1	5.680,45		5.680,45	43,16	<0,0001
	Diametro	4	4.588,34		1.147,09	8,72	<0,0001
	Trat x Diametro	4	8.023,35		2.005,84	15,24	<0,0001

Vcil – volume do cilindro, Pt – porosidade total, Ma – macroporosidade, Me – mesoporosidade, Mi  $_{E+B}$  – Microporosidade estrutural e biológica, Mi<sub>T</sub> – Microporosidade textural, Crip – Criptoporosidade, AD (100) – água disponível na capacidade de campo dos solos arenosos, AD (333) – água disponível na capacidade de campo dos solos arenosos, AD (333) – água disponível na capacidade de campo dos solos arenosos, Br – densidade do solo, Ksat – condutividade hidráulica do solo saturado, Rt – resistência tênsil de agregados.

<b>X</b> 7 • 4 1	Fonte de	Graus de	Tipo do	Soma dos	Quadrado	F valor	<b>P&gt;F</b>
variavel	variação	libertade	erro (III)	quadrados	médio		
	Modelo	11		0,3302	0,0300	127,98	<0,0001
Pt	Erro	204		0,0478	0,0002		
(cm <sup>3</sup> .cm <sup>-3</sup> )	Total	215		0,3781			
-	Tratamento	1	0,0123		0,0123	52,55	<0,0001
	Vcil	5	0,2920		0,0584	249,00	<0,0001
	Trat x Vcil	5	0,0258		0,0051	22,06	<0,0001
	Modelo	11		0,0363	0,0033	24,49	<0,0001
Ma	Erro	96		0,0129	0,0001		
(cm <sup>3</sup> .cm <sup>-3</sup> )	Total	107		0,0492			
-	Tratamento	1	0,0007		0,0007	5,40	0,0222
	Vcil	5	0,0335		0,0067	49,75	<0,0001
	Trat x Vcil	5	0,0019		0,0003	2,8900	0,0179
	Modelo	11		0,0265	0,0024	30,86	<0,0001
Me	Erro	78		0,0061	0,000078		
$(cm^{3}.cm^{-3})$	Total	89		0,0326			
-	Tratamento	1	0,0007		0,0007	9,25	0,0032
	Vcil	5	0,0216		0,0043	55,41	<0,0001
	Trat x Vcil	5	0,0033		0,0006	8,45	<0,0001
	Modelo	11		0,0071	0,0006	12,87	<0,0001
Mi (E+B)	Erro	24		0,0012	0,00005		
(cm <sup>3</sup> .cm <sup>-3</sup> )	Total	35		0,0084			
-	Tratamento	1	0,00005		0,00005	1,05	0,3161
	Vcil	5	0,0020		0,0004	8,32	0,0001
	Trat x Vcil	5	0,0050		0,0010	19,79	<0,0001
	Modelo	11		0,0017	0,0002	3,17	0,0087
Mi <sub>T</sub>	Erro	24		0,0012	0,00005		
(cm <sup>3</sup> .cm <sup>-3</sup> )	Total	35		0,0029			
-	Tratamento	1	0,0004		0,0004	7,96	0,0095
	Vcil	5	0,0011		0,0002	4,37	0,0057
	Trat x Vcil	5	0,0002		0,00005	1,02	0,4297
	Modelo	11		0,0035	0,0003	2,92	0,0138
Crip	Erro	24		0,0026	0,0001		
(cm <sup>3</sup> .cm <sup>-3</sup> )	Total	35		0,0061			
-	Tratamento	1	0,00001		0,00001	0,09	0,7607
	Vcil	5	0,0014		0,00029	2,63	0,0497
	Trat x Vcil	5	0,0021		0,00041	3,77	0,0117
	Modelo	11		287,17	26,11	54,07	<0,0001

 Tabela 12 - Análise de variância dos dados do experimento para área de Pousio.

AD (100)	Erro	66		31,87	0,4828		
(%)	Total	77		319,03			
	Tratamento	1	1,10		1,10	2,29	0,1353
	Vcil	5	81,61		16,32	33,81	<0,0001
	Trat x Vcil	5	196,89		39,38	81,56	<0,0001
	Modelo	11		315,86	28,71	46,17	<0,0001
AD (333)	Erro	48		29,86	0,6220		
(%)	Total	59		345,72			
	Tratamento	1	0,4751		0,4751	0,76	0,3865
	Vcil	5	142,58		28,52	45,84	<0,0001
	Trat x Vcil	5	145,96		29,19	46,93	<0,0001
	Modelo	11		0,2184	0,0199	7,88	<0,0001
Ds	Erro	114		0,2873	0,0025		
(g.cm <sup>-3</sup> )	Total	125		0,5057			
	Tratamento	1	0,0091		0,0091	3,62	0,0597
	Vcil	5	0,1127		0,0225	8,94	<0,0001
	Trat x Vcil	5	0,0779		0,0156	6,18	<0,0001
	Modelo	11		9.505,94	864,18	7,12	<0,0001
Ksat	Erro	99		12.013,24	121,35		
(mm.h <sup>-1</sup> )	Total	110		21.519,18			
	Tratamento	1	115,08		115,08	0,95	0,3325
	Vcil	5	6.621,76		1.324,35	10,91	<0,0001
	Trat x Vcil	5	2.006,85		401,37	3,31	0,0084
	Modelo	9		23.986,41	2.665,16	12,65	<0,0001
Rt	Erro	90		18.959,37	210,66		
(kPa)	Total	99		42.945,78			
	Tratamento	1	3.903,91		3.903,91	18,53	<0,0001
	Diametro	4	17.568,97		4.392,24	20,85	<0,0001
	Trat x Diametro	4	2.513,53		628,38	2,98	0,0231

Vcil - volume do cilindro, Pt – porosidade total, Ma – macroporosidade, Me – mesoporosidade, Mi <sub>E+B</sub> – Microporosidade estrutural e biológica, Mi<sub>T</sub> – Microporosidade textural, Crip – Criptoporosidade, AD (100) – água disponível na capacidade de campo dos solos arenosos, AD (333) – água disponível na capacidade de campo dos solos arenosos, AD (333) – água disponível na capacidade de campo dos solos arenosos, AD (333) – água disponível na capacidade de campo dos solos arenosos, AD (333) – água disponível na capacidade de campo dos solos arenosos, AD (333) – água disponível na capacidade de campo dos solos arenosos, AD (333) – água disponível na capacidade de campo dos solos arenosos, AD (333) – água disponível na capacidade de campo dos solos arenosos, AD (333) – água disponível na capacidade de campo dos solos arenosos, AD (333) – água disponível na capacidade de campo dos solos arenosos, AD (333) – água disponível na capacidade de campo dos solos arenosos, AD (333) – água disponível na capacidade de campo dos solos arenosos, AD (333) – água disponível na capacidade de campo dos solos arenosos, AD (333) – água disponível na capacidade de campo dos solos arenosos, AD (333) – água disponível na capacidade de campo dos solos arenosos, AD (333) – água disponível na capacidade de campo dos solos arenosos, AD (333) – água disponível na capacidade de campo dos solos arenosos, AD (333) – água disponível na capacidade de campo dos solos arenosos, AD (333) – água disponível na capacidade de campo dos solos arenosos, AD (333) – água disponível na capacidade de campo dos solos arenosos, AD (333) – água disponível na capacidade de campo dos solos arenosos, AD (333) – água disponível na capacidade de campo dos solos arenosos, AD (333) – água disponível na capacidade de campo dos solos arenosos, AD (333) – água disponível na capacidade de campo dos solos arenosos, AD (333) – água disponível na capacidade de campo dos solos arenosos, AD (333) – água disponível na capacidade de campo dos solos arenosos, AD (333) – água disp