



JOSIANE DA CONCEIÇÃO ALMEIDA

**COMPOSTOS ORGÂNICOS, CICLOS DE
UMEDECIMENTO E SECAGEM E A CAPACIDADE DE
SUPORTE DE CARGA DE TECNOSSOLOS**

**LAVRAS-MG
2025**

JOSIANE DA CONCEIÇÃO ALMEIDA

**COMPOSTOS ORGÂNICOS, CICLOS DE UMEDECIMENTO E SECAGEM E A
CAPACIDADE DE SUPORTE DE CARGA DE TECNOSSOLOS**

Tese apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, área de concentração em Recursos Ambientais e Uso da Terra, para obtenção do título de Doutor.

Prof. PhD. Moacir de Souza Dias Júnior
Orientador

Prof. Dr. Renato Saldanha Bastos
Coorientador

LAVRAS-MG
2025

**Ficha Catalográfica elaborada pelo Sistema de Geração
de Ficha Catalográfica da Biblioteca Universitária da UFLA, com
dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).**

Almeida, Josiane da Conceição.

Compostos orgânicos, ciclos de umedecimento e secagem e a capacidade de
suporte de carga de Tecnossolos / Josiane da Conceição Almeida. - 2025.
92 p. : il.

Orientador: Moacir de Souza Dias Júnior
Coorientador: Renato Saldanha Bastos

Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Lavras, 2025.
Bibliografia.

1. Rejeitos de mineração. 2. Hidrofobicidade. 3. Estruturação do solo. 4. Pressão de
pré-consolidação. I. Dias Júnior, Moacir de Souza. II. Bastos, Renato Saldanha. III.
Universidade Federal de Lavras. IV. Título.

JOSIANE DA CONCEIÇÃO ALMEIDA

**COMPOSTOS ORGÂNICOS, CICLOS DE UMEDECIMENTO E SECAGEM E A
CAPACIDADE DE SUPORTE DE CARGA DE TECNOSOLOS**

**ORGANIC COMPOUNDS, WETTING AND DRYING CYCLES, AND THE LOAD-
BEARING CAPACITY OF TECHNOSOILS**

Tese apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, área de concentração em Recursos Ambientais e Uso da Terra, para obtenção do título de Doutor.

APROVADA em 31 de janeiro de 2025

Prof. Dr. Moacir de Souza Dias Júnior	UFLA
Prof. Dr. Renato Saldanha Bastos	IFSULDEMINAS - Campus Três Corações
Prof. Dr. Eduardo da Costa Severiano	IFG
Prof. Dr. Bruno Montoani Silva	UFLA
Prof. Dr. Piero Iori	UFJ

Prof. PhD. Moacir de Souza Dias Júnior
Orientador

Prof. Dr. Renato Saldanha Bastos
Coorientador

LAVRAS – MG
2025

À minha mãe e aos meus irmãos.

Dedico!

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Deus pela vida e pelo privilégio de ter colocado pessoas tão especiais em meu caminho.

À minha mãe, Rosária, que há tantos anos, com muito trabalho e amor, faz o melhor para que nós filhos, consigamos alcançar nossos sonhos.

Ao meu irmão Joaslei agradeço o suporte, paciência, incentivo e acreditar na minha capacidade. Ao meu irmão Pedro agradeço o apoio, torcida e trazer mais alegria e amor aos nossos dias.

Aos amigos que Viçosa me proporcionou, Josué, Thamires, Valcívica, Maurício, Jordan, que sempre torceram por mim, agradeço pelas boas lembranças.

Em especial, agradeço aos meus amigos William, Felipe e Amana, pela amizade leve e cheia de amor, ao longo desses anos. Obrigada por toda paciência, por me ouvirem, torcerem por mim e se fazerem presentes, mesmo longe.

Ao meu amigo Allan, pela amizade desde a graduação e me acolher em Lavras.

A Dayane, pela amizade, ajuda nos experimentos e deixar mais leve esse tempo em Lavras.

Ao professor Moacir, meu orientador, agradeço por ter me aceitado como orientada, aos ensinamentos, suporte e ter permitido que esse trabalhado acontecesse.

Ao professor Renato, meu coorientador, sou imensamente grata toda paciência, amizade, ensinamentos transmitidos e dedicação ao longo desses anos.

Ao professor Bruno, agradeço pelos ensinamentos com tanta inspiração pela Física do solo e estar sempre disposto a ajudar.

Aos técnicos Doroteo e Maria Luiza, pelo apoio com as análises e boas conversas que deixaram o processo mais leve.

A UFLA e ao Departamento de Ciência do Solo, pela estrutura que possibilitou o desenvolvimento da pesquisa.

A todos que torceram por mim.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

RESUMO GERAL

Os Tecnossolos oriundos de mineração de ferro possuem limitações, dentre elas a estruturação. O objetivo deste estudo foi investigar o efeito de compostos orgânicos (c.o) com diferentes graus de hidrofobicidade e ciclos de umedecimento e secagem (US) na estruturação dos Tecnossolos formados após o rompimento da barragem de Fundão, em Mariana (MG), por meio da capacidade de suporte de carga (CSC). Foram conduzidos dois experimentos: (exp-1) incubação de amostras com c.o por períodos de 180, 365 e 547 dias; e (2) análise do impacto de 26, 52 e 78 ciclos de US associados aos c.o. Ambos os experimentos seguiram o esquema fatorial $3 \times 2 \times 4 \times 3$, sendo 3 períodos de incubação (180, 365 e 547 dias – exp-1) ou 3 ciclos de US (26, 52 e 78 – exp-2), 2 c.o (amido e ácido esteárico), 4 doses [0,0 (controle); 2,5; 5,0 e 10,0 g kg⁻¹] e 3 tensões iniciais de medida de CSC (-10, -100 e -1.500 kPa). Os delineamentos experimentais foram em blocos casualizados, com 3 repetições. Após a aplicação dos c.o, o Tecnossolo foi acondicionado em cilindros volumétricos, alocados em bandejas, umedecidos até a capacidade de campo (c.c) estimada e mantidos em casa de vegetação. No exp-1, as bandejas foram vedadas, enquanto no exp-2 permaneceram abertas com umedecimentos semanais das amostras até a c.c. Ao final dos períodos de incubação e ciclos de US, as amostras foram saturadas e estabilizadas até as tensões -10, -100 e -1.500 kPa. Posteriormente foram submetidas ao teste de compressão uniaxial para obtenção das pressões de pré-consolidação e os modelos de CSC. Adicionalmente obtidas a porosidade total (Pt), microporosidade (Mi) e macroporosidade (Ma). Os resultados indicaram que, no exp-1, os c.o não influenciaram a Pt, Ma e Mi do Tecnossolo. No entanto, existe efeito na estruturação do Tecnossolo, aos 180 dias, evidenciado pelo aumento da CSC. É possível alcançar com menor dose (2,5 g kg⁻¹) do c.o hidrofóbico, o aumento da CSC do Tecnossolo, com efeito semelhante à aplicação do c.o hidrofílico em maior dose (10 g kg⁻¹). Aos 365 dias, o c.o hidrofílico tem efeito na estruturação do Tecnossolo, funcionando como um modulador da CSC em relação à umidade do solo. No entanto, em períodos superiores a 365 dias, os c.o não apresentam efeito no aumento da CSC do Tecnossolo. No exp-2, o c.o hidrofóbico e os ciclos de US influenciaram a Pt e Mi. O c.o hidrofóbico contribuiu para o início de estruturação no Tecnossolo, indicado pelos maiores valores CSC. Esse efeito é alcançado com uma menor dose (2,5 g kg⁻¹) e com o menor número de ciclos de US (26), ou, com doses mais elevadas (10,0 g kg⁻¹) e maior número de ciclos de US (52 e 78). Em contrapartida, o c.o hidrofílico associado a um número de ciclos de US prolongado (78), diminui a CSC do Tecnossolo. Conclui-se que a aplicação de c.o, em especial, o hidrofóbico em doses baixas e menor número de ciclos de US, pode auxiliar na estruturação de Tecnossolos oriundos da mineração de ferro.

Palavras-chave: rejeitos de mineração; hidrofobicidade; estruturação do solo; pressão de pré-consolidação.

GENERAL ABSTRACT

The Technosols derived from iron mining have limitations, among which is their structuring. The objective of this study was to investigate the effect of organic compounds (OCs) with different degrees of hydrophobicity and wetting and drying (WD) cycles on the structuring of Technosols formed after the collapse of the Fundão dam in Mariana (MG), using load-bearing capacity (LBC) as an indicator. Two experiments were conducted: (1) incubation of samples with OCs for 180, 365, and 547 days; and (2) analysis of the impact of 26, 52, and 78 WD cycles associated with the application of OCs. Both experiments followed a $3 \times 2 \times 4 \times 3$ factorial scheme, comprising 3 incubation periods (180, 365, and 547 days – exp-1) or 3 WD cycles (26, 52, and 78 – exp-2), 2 types of OCs (starch and stearic acid), 4 doses [0.0 (control); 2.5; 5.0 and 10.0 g kg⁻¹], and 3 initial tensions for LBC measurement (-10, -100, and -1,500 kPa). The experimental designs were randomized block designs with 3 replications. After applying the OCs, the Technosol was placed in volumetric cylinders, set in trays, moistened to estimated field capacity (FC), and kept in a greenhouse. In exp-1, trays were sealed, while in exp-2, they remained open and were moistened weekly to FC. At the end of the incubation periods and WD cycles, the samples were saturated and equilibrated to tensions of -10, -100, and -1,500 kPa. They were then subjected to uniaxial compression testing to determine pre-consolidation pressures and develop LBC models. Additionally, total porosity (TP), microporosity (Mi), and macroporosity (Ma) were measured. The results indicated that in exp-1, OCs did not influence TP, Ma, or Mi of the Technosol. However, an effect on structuring was observed at 180 days, evidenced by increased LBC. It is possible to achieve increased LBC with a lower dose (2.5 g kg⁻¹) of the hydrophobic OC, with a similar effect to that of a higher dose (10 g kg⁻¹) of the hydrophilic OC. At 365 days, the hydrophilic OC showed an effect on Technosol structuring, acting as a modulator of LBC in relation to soil moisture. However, beyond 365 days, OCs did not affect the increase in LBC of the Technosol. In exp-2, the hydrophobic OC and WD cycles influenced TP and Mi. The hydrophobic OC contributed to the initial structuring of the Technosol, indicated by higher LBC values. This effect was achieved with a lower dose (2.5 g kg⁻¹) and fewer WD cycles (26), or with higher doses (10.0 g kg⁻¹) and more cycles (52 and 78). Conversely, the hydrophilic OC, when associated with a prolonged number of WD cycles (78), reduced the LBC of the Technosol. It is concluded that the application of OCs, especially hydrophobic ones at low doses and under fewer WD cycles, can aid in the structuring of Technosols derived from iron mining.

Keywords: organic compounds; wetting and drying cycles; load-bearing capacity; Technosols.

INDICADORES DE IMPACTO

Os rompimentos de barragens de mineração de ferro nos últimos anos (Mariana - 2015 e Brumadinho – 2019) geraram diversos impactos ambientais, sociais e econômicos. Os Tecno solos formados após a deposição da lama de rejeitos, geralmente possuem características diferentes dos solos nativos. São solos com alta densidade, com pouca ou nenhuma estruturação, geralmente ricos em sódio, baixa porosidade, o que dificulta a recuperação de áreas atingidas. Dessa forma, entender o comportamento físico desses solos, pode auxiliar em processos de recuperação dessas áreas, bem como o manejo de áreas contendo esse tipo de solo. O objetivo do trabalho foi analisar o efeito de compostos orgânicos com distintos graus de hidrofobicidades, e os ciclos de umedecimento e secagem sobre a estruturação de Tecno solo oriundo do rompimento da barragem de rejeito de mineração de ferro de Fundão, em Mariana (MG), através da determinação da capacidade de suporte de carga do solo. Os impactos deste estudo na sociedade são considerados em potencial, pois ele representa um passo inicial em uma linha de pesquisa ainda incipiente. No entanto, os resultados já obtidos fornecem dados importantes que poderão ser utilizados em investigações futuras, ampliando o conhecimento técnico e científico sobre esses solos e sua recuperação. A pesquisa visa melhorar o conhecimento sobre a capacidade de suporte de carga de Tecno solos, utilizando compostos orgânicos e ciclos de umedecimento e secagem, o que pode subsidiar estratégias de reabilitação de áreas degradadas pela mineração, com efeitos positivos para o uso futuro dessas terras. Dentre os impactos da pesquisa estão os sociais e extensionistas. A tragédia ambiental de Mariana afetou diretamente populações de diversos municípios de Minas Gerais e do Espírito Santo. Futuramente a melhoria do solo pode favorecer o estabelecimento de plantas e novos usos. O conhecimento gerado pode ser aplicado na recuperação de áreas com Tecno solos. Isso traz potencial impacto econômico pois a partir da formação de estruturas do solo, esse responderá melhor ao desenvolvimento de plantas, permitindo a retomada do uso produtivo dessas áreas.

Este trabalho pode ser classificado nas temáticas Política Nacional de Extensão de Meio ambiente (recuperação de áreas degradadas), Tecnologia e produção (inovações no manejo de solos) e Trabalho (possibilidade de reabilitação de áreas para uso agrícola e produtivo). Também se encontra alinhado aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da Agenda 2030 da ONU: ODS 9: Indústria, inovação e infraestrutura (tecnologia para recuperação de solos), ODS 13: Ação contra a mudança global do clima (uso do solo para captura de carbono), ODS 15: Vida terrestre (recuperação da biodiversidade em áreas degradadas). Assim, os impactos deste trabalho estão além do meio acadêmico e pode auxiliar em ações concretas de extensão e desenvolvimento sustentável em territórios afetados pelo rompimento de barragens de mineração de ferro.

IMPACT INDICATORS

The collapse of iron mining tailings dams in recent years (Mariana – 2015 and Brumadinho – 2019) has caused numerous environmental, social, and economic impacts. The Technosols formed after the deposition of tailings slurry generally have different characteristics from native soils. These are soils with high density, little to no structure, often rich in sodium, and low porosity, which hinders the recovery of affected areas. Therefore, understanding the physical behavior of these soils can assist in the recovery processes of such areas, as well as in the management of land containing this type of soil. The objective of this study was to analyze the effect of organic compounds with different degrees of hydrophobicity and wetting and drying cycles on the structure of Technosol originating from the collapse of the Fundão iron mining tailings dam in Mariana (MG), through the determination of the soil's load-bearing capacity. The societal impacts of this study are considered to be potential, as it represents an initial step in a still incipient line of research. However, the results obtained already provide important data that can be used in future investigations, expanding the technical and scientific knowledge about these soils and their recovery. This research aims to improve understanding of the load-bearing capacity of Technosols using organic compounds and wetting and drying cycles, which may support strategies for rehabilitating areas degraded by mining, with positive effects for the future use of such lands. The impacts of the research include social and extension aspects. The environmental disaster in Mariana directly affected populations in several municipalities of Minas Gerais and Espírito Santo. In the future, soil improvement may favor plant establishment and new land uses. The knowledge generated can be applied to the recovery of areas with Technosols, bringing potential economic impact, as improved soil structure enhances plant development, enabling the productive use of these lands to resume. This work can be classified under the themes of the National Extension Policy for Environment (rehabilitation of degraded areas), Technology and Production (innovations in soil management), and Labor (possibility of rehabilitating areas for agricultural and productive use). It is also aligned with the United Nations 2030 Agenda Sustainable Development Goals (SDGs): SDG 9 – Industry, Innovation, and Infrastructure (technology for soil recovery); SDG 13 – Climate Action (land use for carbon capture); and SDG 15 – Life on Land (restoration of biodiversity in degraded areas). Thus, the impacts of this work go beyond the academic sphere and may contribute to concrete outreach actions and sustainable development in territories affected by iron mining dam failures.

LISTA DE FIGURAS – PARTE 1

Figura 1 - Fluxograma básico do processo de exploração mineral.....	20
Figura 2 - Localização do complexo de mineração de Germano	22
Figura 3 - Tecnosolo formado após o rompimento da barragem de Fundão (Mariana- MG).	25
Figura 4 - Tecnosolo formado após o rompimento da barragem de Fundão (Mariana- MG) evidenciando a falta de estruturação.....	25
Figura 5 - Representação da molhabilidade de um líquido na superfície, evidenciando o ângulo de contato.....	29
Figura 6 – Consolidômetro de ar comprimido.....	32
Figura 7 - Curva de compressão do solo	33
Figura 8 - Modelo da capacidade de suporte de carga	35
Figura 9 - Modelo de capacidade de suporte de carga, acrescido de intervalo de confiança e os critérios para analisar o efeito do manejo sobre a estrutura do solo.	35

LISTA DE FIGURAS – PARTE 2

Artigo 1 - Efeito da aplicação de compostos orgânicos hidrofóbico e hidrofílico na estruturação e capacidade de suporte de carga de Tecnosolos

Figura - 1: Pt, Ma e Mi das amostras de Tecnosolo de Mariana (MG), tratado com os compostos orgânicos hidrofílico e hidrofóbico, nas doses [0 (controle); 2,5; 5,0; 10,0 g kg⁻¹], aos 365 dias de incubação..... 52

Figura - 2: Modelos de capacidade de suporte de carga do Tecnosolo formado cinco anos após rompimento da barragem de Fundão em Mariana (MG), tratado com os compostos orgânicos e 180 dias de incubação. 54

Figura - 3: Modelos de capacidade de suporte de carga do Tecnosolo formado cinco anos após rompimento da barragem de Fundão em Mariana (MG), tratado com os compostos orgânicos e 365 dias de incubação. 54

Figura - 4: Modelos de capacidade de suporte de carga do Tecnosolo formado cinco anos após rompimento da barragem de Fundão em Mariana (MG), tratado com os compostos orgânicos e 547 dias de incubação. 55

Artigo 2 - Efeitos de compostos orgânicos associados a ciclos de umedecimento e secagem na estruturação e capacidade de suporte de carga de Tecnosolos

Figura 1: Pt (%), Ma (%) e Mi (%) de amostras construídas do Tecnosolo de Mariana, mediante à aplicação de compostos orgânicos em diferentes doses e submetidas a 78 ciclos (547 dias) de US. Ctrl: controle. AE: ácido esteárico. Am: amido. 2,5; 5,0; 10,0 g kg⁻¹: doses dos compostos orgânicos. 70

Figura 2: Modelos de capacidade de suporte de carga do Tecnosolo de Mariana (MG), cinco anos após o desastre, tratado com compostos orgânicos e submetido a 26 ciclos de US. Ctrl: controle. AE: ácido esteárico. Am: amido. 2,5; 5,0; 10,0: doses do composto orgânico (g kg⁻¹). Ψ : tensão (kPa). σ_p : pressão de pré-consolidação (kPa). ***: significativo ($p < 0,001$). R²: coeficiente de determinação. 72

Figura 3: Modelos de CSC do Tecnosolo de Mariana (MG), cinco anos após o desastre, tratado com compostos orgânicos e submetido a 78 ciclos de US. Ctrl: controle. AE: ácido esteárico. Am: amido. 2,5; 5,0; 10,0: doses do composto orgânico (g kg⁻¹). Ψ : tensão (kPa). σ_p : pressão de pré-consolidação (kPa). ***: significativo ($p < 0,001$). R²: coeficiente de determinação..... 72

Figura 4: Modelos de CSC do Tecnosolo de Mariana (MG), cinco anos após o desastre, tratado com 10,0 g kg⁻¹ de compostos orgânicos (hidrofílico e hidrofóbico) e submetido a 26 (a), 52 (b) e 78 (c) ciclos de US. Ctrl: controle. AE: ácido esteárico. Am: amido. Ψ : tensão (kPa). σ_p : pressão de pré-consolidação (kPa). ***: significativo ($p < 0,001$). R²: coeficiente de determinação. 73

Figura 5: Representação das amostras úmidas de Tecnosolo tratadas com os compostos orgânicos (hidrofóbico e hidrofílico) submetidas a 78 ciclos de US..... 74

LISTA DE TABELAS

Artigo 1 - Efeito da aplicação de compostos orgânicos hidrofóbico e hidrofílico na estruturação e capacidade de suporte de carga de Tecnossolos

Tabela 1. Caracterização química e física do Tecnossolo de Mariana (MG), cinco anos após o rompimento da barragem de Fundão..... 49

Tabela 2. Comparação dos modelos de capacidade de suporte de carga ($\sigma_p = a + b\psi$) do Tecnossolo de Mariana (MG), para diferentes doses dos compostos orgânicos e diferentes períodos de incubação, pelo procedimento Snedecor e Cochran (1989)..... 53

Artigo 2 - Efeitos de compostos orgânicos associados a ciclos de umedecimento e secagem na estruturação e capacidade de suporte de carga de Tecnossolos

Tabela 1. Comparação dos modelos de capacidade de suporte de carga ($\sigma_p = a + b\psi$) pelo procedimento Snedecor e Cochran (1989) do Tecnossolo de Mariana (MG), tratado com compostos orgânicos (amido e ácido esteárico) com diferentes graus de hidrofobicidade e doses, submetidos a 26, 52 e 78 ciclos de US. 71

SUMÁRIO

PRIMEIRA PARTE	15
1. INTRODUÇÃO	15
2. REFERENCIAL TEÓRICO	16
2.1. A cidade de Mariana.....	16
2.2. Mineração de Ferro.....	18
2.2.1. Extração do minério de ferro	19
2.2.2. Barragem de rejeito	21
2.2.3. O desastre de Mariana	22
2.3. Tecnossolos	24
2.4. Propriedades físicas do solo, matéria orgânica no solo e compostos orgânicos	27
2.5. Ensaio de compressão uniaxial, pressão de pré-consolidação e a capacidade de suporte de carga do solo	31
REFERÊNCIAS	37
SEGUNDA PARTE – ARTIGOS.....	46
Artigo 1.....	46
1. INTRODUÇÃO	47
2. MATERIAL E MÉTODOS	49
3. RESULTADOS	51
4. DISCUSSÃO	55
5. CONCLUSÕES.....	58
REFERÊNCIAS	59
Artigo 2.....	64
1. INTRODUÇÃO	65
2. MATERIAL E MÉTODOS	67
3. RESULTADOS	69
4. DISCUSSÃO	74
5. CONCLUSÕES.....	76
REFERÊNCIAS	78
ANEXOS	82
1 - Formação da amostra de Tecnossolo de Mariana (MG), em laboratório.....	82
2 - Instalação dos experimentos de incubação e ciclos de umedecimentos e secagem (a); umedecimento das amostras por capilaridade (b).....	82
3- Amostras de Tecnossolo umedecidas, após 72 ciclos de umedecimento e secagem, evidenciando a barreira de proteção do composto hidrofóbico (manchas) à água.....	83
4 - Tabela 1: comparação todos modelos de capacidade de suporte de carga ($\sigma_p = a + b\psi$) (DIAS JUNIOR, 1994) do Tecnossolo de Mariana (MG), para diferentes doses dos compostos orgânicos (amido e ácido esteárico) e diferentes períodos de incubação (180, 365 e 547 dias), pelo procedimento Snedecor e Cochran (1989).....	84

5 – Tabela 2: comparação todos modelos de capacidade de suporte de carga ($\sigma_p = a + b\psi$) (DIAS JUNIOR, 1994) pelo procedimento Snedecor e Cochran (1989) do Tecnossolo de Mariana (MG), tratado com compostos orgânicos (amido e ácido esteárico) com diferentes graus de hidrofobicidade e doses, submetidos a 26, 52 e 78 ciclos de umedecimento e secagem.	85
6 – Tabela 3 : médias dos valores de pressões de pré-consolidação (kPa) obtidas pelo método de Dias Junior e Pierce (1995) e suas respectivas tensões (kPa) do Tecnossolo de Mariana (MG), para diferentes doses dos compostos orgânicos (amido e ácido esteárico) e diferentes períodos de incubação (180, 365 e 547 dias).	86
7 - Tabela 4: Médias dos valores de pressões de pré-consolidação (kPa) obtidas pelo método de Dias Junior e Pierce (1995) e suas respectivas tensões (kPa) do Tecnossolo de Mariana (MG), para diferentes doses dos compostos orgânicos (amido e ácido esteárico) e ciclos de umedecimento e secagem (26, 52 e 78).	87
8 - Planilha de controle de dados iniciais dos experimentos	88
9 - Planilha para cálculo da pressão de pré-consolidação, com os valores obtidos na compressibilidade, seguindo o método de Dias Junior e Pierce (1995).	88
10- Planilha para cálculo da pressão de pré-consolidação com os valores de leitura. ...	89
11- Planilha para cálculo da pressão de pré-consolidação seguindo o método de Dias Junior e Pierce (1995).	89
12 - Planilha para avaliação de contrastes de covariância, de acordo com o procedimento Snedecor e Cochran (1989).	90
13- Planilha para avaliação de contrastes de covariância, de acordo com o procedimento Snedecor e Cochran (1989) – continuação.	90
14 - Planilha para criação dos modelos de capacidade de suporte de carga proposto por Dias Junior (1994), utilizando software Sigma Plot 14.	91
15- Gráfico do modelos de capacidade de suporte de carga proposto por Dias Junior (1994), utilizando software Sigma Plot 14	91

PRIMEIRA PARTE

1. INTRODUÇÃO

A mineração de ferro desempenha um papel significativo na economia brasileira. Segundo a Agência Nacional de Mineração (ANM, 2022), a produção nacional das principais substâncias metálicas, como alumínio, cobre, cromo, estanho, ferro, manganês, ouro, nióbio, níquel, vanádio e zinco, atingiu aproximadamente R\$ 312,9 bilhões. Dentre essas, o ferro se destaca, representando 80,1% do total. Minas Gerais, por sua vez, ocupa a posição de segundo maior estado produtor.

Apesar de ser uma atividade com grande contribuição para a economia, a mineração também causa degradação ambiental. Inicialmente ela é pontual, pois há a remoção da vegetação nativa e da camada superficial do solo (TRINDADE; GRAZZIOTTI; TÓTOLA, 2000), geração de rejeitos (HATJE et al., 2017; TRINDADE; GRAZZIOTTI; TÓTOLA, 2000), além do uso de grande quantidade de água e energia no processo produtivo (HATJE et al., 2017).

Minas Gerais sofreu com dois desastres ambientais envolvendo o rompimento de barragem de mineração de ferro no últimos anos. O primeiro aconteceu em 2015, na cidade de Mariana, com o rompimento da barragem de Fundão, e o segundo em ocorreu em 2019 na cidade de Brumadinho, com o rompimento da barragem do Córrego do Feijão. Ambos causaram danos ao meio ambiente e levaram a morte de pessoas.

A lama de rejeito depositada sobre os solos deu origem a um solo classificado pela World Reference Base for Soil Resources (WRB-FAO) como Tecnossolo (IUSS Working Group WRB, 2006). Este tipo de Tecnossolo é rico em areia e silte (SILVA et al., 2016; ALMEIDA et al., 2018; BATISTA et al., 2020; PÁEZ et al., 2024; SILVA et al., 2017) e pobre em nutrientes (SANTINI; FEI, 2016; BORGES et al., 2023). Destaca-se também a baixa estruturação, que aliada a outros aspectos físicos e químicos, dificultam a recuperação de áreas com esse tipo de solo, uma vez que há limitação no desenvolvimento de plantas. Os solos quando bem estruturados normalmente possuem menor densidade, devido a presença de espaços porosos que favorecem o desenvolvimento radicular.

De acordo com Pronk et al. (2012), a formação de agregados é influenciada pela flora e fauna do solo, interações físicas entre as partículas do solo, pelos ciclos de secagem e umedecimento, além dos processos de congelamento e descongelamento. A matéria orgânica por ser um agente cimentante (BASTOS et al., 2005a) melhora as propriedades químicas, físicas

e biológicas dos solos (FAGERIA, 2012), além de contribuir com a formação e estabilidade de agregados do solo (BRADY; WEIL, 2013).

Severiano et al. (2008) destacam que o crescimento de plantas está ligado à preservação da estrutura do solo, e para isto, é importante o conhecimento sobre o comportamento compressivo do solo. Uma forma de medir a máxima pressão que um solo consegue suportar antes do rompimento da estrutura é pela determinação da pressão de pré-consolidação (DIAS JUNIOR, 1994; DIAS JUNIOR et al., 2002). A partir dos valores de pressão de pré-consolidação e de umidade Dias Junior (1994) desenvolveu o modelo de capacidade de suporte de carga (DIAS JUNIOR et al., 2019).

Os desastres envolvendo o rompimento de barragens ainda demandam extensas investigações sobre o comportamento físico dos solos afetados. A utilização de compostos orgânicos pode contribuir para a formação de agregados no solo, assim como os ciclos de umedecimento e secagem. Considerando que os Tecnossolos formados após o rompimentos de barragens de mineração apresentam baixa estruturação, acredita-se que a aplicação de compostos orgânicos com diferentes graus de hidrofobicidade, aliados a ciclos de umedecimento e secagem, possam favorecer sua estruturação. Nesse contexto, a capacidade de suporte de carga pode nos indicar a possível estruturação destes Tecnossolos.

O objetivo do presente estudo foi analisar o efeito de compostos orgânicos com distintos graus de hidrofobicidades, e os ciclos de umedecimento e secagem sobre a estruturação de Tecnossolo oriundo do rompimento da barragem de rejeito de mineração de ferro de Fundão, em Mariana (MG), através da determinação da capacidade de suporte de carga.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1. A cidade de Mariana

A cidade de Mariana, em Minas Gerais, está localizada à 110 km da capital Belo Horizonte e 12 km de Ouro Preto (PREFEITURA DE MARIANA, 2021) e faz parte do Quadrilátero Ferrífero (SEGURA et al, 2016). A altitude máxima da cidade é de 1.772 m, correspondendo ao Pico do Itacolomi (PREFEITURA DE MARIANA, 2021). Mariana foi a primeira cidade projetada no estado, em 1745, e possui características que remetem ao tempo

do Brasil Colônia, com um cenário marcado pela religiosidade, artes e busca pelo ouro (PREFEITURA DE MARIANA, 2021).

De acordo com a classificação de Koppen, ocorrem os tipos climáticos em Mariana: Cwa e Cwb (STRAHLER, 1963; SÁ JÚNIOR, 2009). O tipo Cwa, predomina em locais menos elevados e é caracterizado como clima úmido com verões quentes, estação seca curta, sendo a temperatura média anual variando entre 19,5 e 21,8° C (LIMA; BALTAZAR, 1993). O tipo Cwb, predomina nas partes mais elevadas, é caracterizado pelas temperaturas médias anual mais baixa (variando de 17,4 a 19,8°C) e verões mais brandos (LIMA; BALTAZAR, 1993). O município possui o índice médio pluviométrico anual de 1.800 mm (LIMA; BALTAZAR, 1993).

O relevo é caracterizado como ondulado, suave-ondulado, escarpado e montanhoso (SOUZA et al., 2005). O município faz parte da Bacia Hidrográfica do Rio Doce, que é banhada pelo Rio do Carmo, o qual tem os afluentes Gualaxo do Sul e Gualaxo do Norte (SOUZA et al., 2005; PREFEITURA DE MARIANA, 2021). A área total dessa bacia é em torno de 82.646 km², equivalente a aproximadamente duas vezes o estado do Rio de Janeiro (IBAMA, 2015). Cerca de 98% da área da bacia se está inserida no Bioma Mata Atlântica e o restante no Bioma Cerrado (IBAMA, 2015).

A bacia hidrográfica do Rio Doce possui ao longo de muitos anos o solo degradado e o não planejamento do uso da água (PIRES et al., 2017). Segundo os autores, em toda a bacia a capacidade de abastecimento de água é desigual. A supressão da vegetação nativa deixa a superfície do solo suscetível à erosão (PIRES et al., 2017). Além disso, há o lançamento de esgoto urbano, que ao longo das décadas vêm causando impactos à Bacia do Rio Doce (DUARTE et al., 2021).

O solo predominante era o Latossolo vermelho-amarelo distrófico, e o restante da região era composta por afloramentos rochosos (LIMA; BALTAZAR, 1993). A cobertura vegetal de Mariana se divide em áreas de campos e pastagens; silvicultura; campos rupestres de altitude; matas de topo, galeria e de encosta (SOUZA et al., 2005). Embora não apresente perfil agropecuário bem desenvolvido, os campos e pastagens possuem maior distribuição em área (SOUZA et al., 2005).

Em relação à economia, nos distritos encontram-se atividades agropecuárias, diversos tipos de artesanatos o que mostra a diversidade cultural de Minas Gerais (PREFEITURA DE MARIANA, 2021). A principal atividade econômica de Mariana é a mineração de ferro (SOUZA et al., 2005).

2.2. Mineração de Ferro

A mineração está relacionada ao aproveitamento dos recursos que a natureza oferece e que estão disponíveis na crosta terrestre (gás natural, petróleo, minerais e outros) (SILVA, 2014). É considerada uma das principais atividades realizada pelo homem que contribui para a poluição de bacias hidrográficas no mundo, afetando a saúde humana e a longo prazo, as águas e à biodiversidade (HATJE et al., 2017). Essa atividade causa modificações ambientais, alterando o relevo, em função das escavações, retirada da vegetação, assoreamentos dos mananciais que podem ocorrer ao longo do tempo ou até o rompimento de barragens de rejeitos (SILVA, 2014).

Estima-se que há 40 mil anos, iniciou-se a exploração mineral no planeta, quando a hematita era minerada na África e utilizada como tinta em decoração (TAIOLI, 2000). Existem também registros em que a exploração e o uso artificial da terra iniciaram há 8.000 a.C. (TAIOLI, 2000).

Os minerais são elementos ou compostos químicos, cristalizados, com composição definida e são formados naturalmente através de processos geológicos (MADUREIRA FILHO; ATENCIO; McREAT FILHO, 2000). Já o minério é um termo que se utiliza para a rocha da qual se pode extrair uma ou mais substâncias com valor econômico (BETTENCOURT; MORESCHI, 2000). Podem estar associados ao minério dois tipos de minerais, sendo um com valor econômico (mineral de minério) e outro sem valor econômico (ganga) (BETTENCOURT; MORESCHI, 2000). De acordo com os autores, os minérios podem ser metálicos ou não-metálicos. Isso se deve ao fato de serem ou não fontes de substâncias metálicas, ou terem ou não em sua composição minerais com brilho metálico e com utilidade (BETTENCOURT; MORESCHI, 2000). O minério metálico para ser utilizado passa por transformações na forma de metais ou ligas metálicas, enquanto o não metálico pode ser utilizado sem alterações (BETTENCOURT; MORESCHI, 2000).

O minério de ferro é considerado uma substância metálica e tem grande importância econômica (ANM, 2022). Seu principal uso mundial é na produção de aço (cerca de 97%) (MAIA, 2011).

Em Minas Gerais, o Quadrilátero Ferrífero é uma importante região de produção mineral. Essa nomenclatura pelas vastas áreas de minério de ferro que ocorrem em uma área delimitada pelas linhas que ligam os municípios de Itabira, Rio Piracicaba, Mariana, Congonhas

do Campo, Casa Branca e Itaúna (DORR II, 1959) e possui uma área aproximada de 7.000 km² (SANTANA, 2012).

A hematita é faz parte da maioria dos minérios do Brasil, destacando-se pelo alto teor de ferro (MAIA, 2011; NASCIMENTO, 2014), podendo até ser a única fase mineral presente (BETTENCOURT; MORESCHI, 2000). Composta por cerca de 69,94% de ferro e 30,06% de oxigênio, a hematita é considerada como Fe₂O₃ puro (NASCIMENTO, 2014) e é frequentemente encontrada na rocha itabirito, a qual chega a concentrações de 69% de ferro (MAIA, 2011).

2.2.1. Extração do minério de ferro

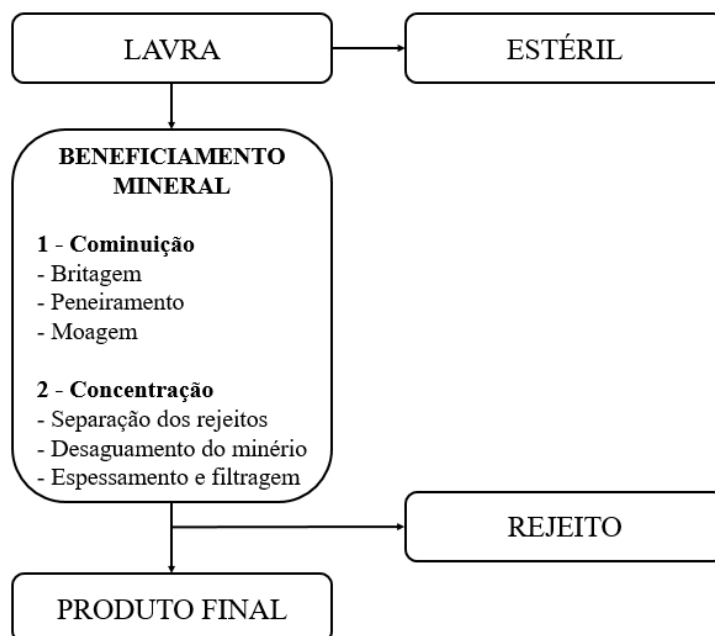
A exploração mineral se refere ao conjunto de atividades por meio das quais se extraem os bens minerais da natureza (SILVA, 2014). Esse aproveitamento econômico do minério da jazida é realizado por meio da lavra (MAIA, 2011). Esta se refere ao conjunto de operações em que se faz a retirada do minério a partir do depósito mineral (BETTENCOURT; MORESCHI, 2000; GOMES, 2016), podendo ser executada manualmente ou por operações mecanizadas em larga escala (BETTENCOURT; MORESCHI, 2000). A mineração de ferro geralmente é feita em lavra a céu aberto (MAIA, 2011). O minério bruto denominado ROM (*run-of-mine*), que é a forma como ele ocorre na natureza, após ter sido deslocado por alguma operação de lavra, não é puro o suficiente ou adequado para sua utilização nas indústrias (TEIXEIRA et al., 2000). Assim, após a lavra, é encaminhado para o beneficiamento, a fim de adequá-lo física, química e metalurgicamente para as exigências da siderurgia (TEIXEIRA et al., 2000; MAIA, 2011).

Na mineração são produzidos os estéreis e os rejeitos. O primeiros, são obtidos durante a lavra, não possuem valor econômico e são dispostos em pilhas e muitas vezes são utilizados no próprio barramento (SILVA, 2006; SILVA, 2014; CAITANO et al., 2021). Os segundos, são oriundos do processo de beneficiamento, os quais padronizam o tamanho do minério, removem os minerais sem valor econômico, logo, melhoram a pureza, qualidade ou o teor do produto (CAITANO et al., 2021). Os rejeitos podem ser finos como a lama ou grossos (> 50 µm) e são dispostos em barragens (SILVA, 2006; SILVA, 2014; CAITANO et al., 2021). Ambos possuem alto volume e potencial contaminante, assim, a disposição destes é importante, desde o projeto até a operação da mina (SILVA, 2014). Dependendo do interesse da mineradora, o grande volume de rejeito gerado durante o beneficiamento pode ser disposto em

superfície, ou durante a extração do minério, seja a céu aberto ou subterrâneo (LOZANO, 2006).

Os principais processos da extração e beneficiamento mineral, estão representados de forma generalista na figura 1 (SILVA, 2014).

Figura 1 - Fluxograma básico do processo de exploração mineral



Fonte: Adaptado de SILVA (2014).

Em Mariana, no Complexo de Germano, pertencente à mineradora Samarco Mineração, o minério com baixo teor de ferro (40%), antes considerado rejeito é enriquecido no beneficiamento chegando a um teor de ferro de 67% (SAMARCO, 2022). O itabirito é concentrado pelo processo denominado como flotação catiônica reversa (MAPA, 2006). Neste processo, parte do minério fica suspensa e a outra parte decanta, sendo utilizado o hidróxido de sódio, que eleva o pH e facilita a separação da hematita (PIRES et al., 2003).

Após a flotação, a polpa de minério passa pelo espessamento para aumentar sua densidade e fica armazenada em tanques até ser transportada pelos minerodutos (SAMARCO, 2022). O rejeito arenoso é filtrado e empilhado (SAMARCO, 2022). A polpa é bombeada até os minerodutos, indo de Minas Gerais ao Espírito Santo, onde segue o processo produtivo até o porto (SAMARCO, 2022; REZENDE, 2013).

2.2.2. Barragem de rejeito

A Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), considera barragem de rejeitos como um reservatório, cuja função é reter água e resíduos sólidos oriundos da mineração. As empresas mineradoras utilizam as barragens como uma forma de dispor o rejeito de forma mais econômica, uma vez que é alto o custo com transportes (ESPÓSITO, 2000; REZENDE, 2013).

As barragens de rejeito são geralmente construídas com um dique de partida que pode ser constituído de blocos de rocha compactados ou solo (GOMES, 2016). Na disposição de rejeitos, tem-se adotado a técnica de construção de barragens com alteamentos sucessivos (REZENDE, 2013; SILVA, 2014). Essas técnicas envolvem um sólido conhecimento em Engenharia Geotécnica, uma vez que uma possível ruptura traz consequências econômicas, sociais, políticas e impactos ambientais (SILVA, 2014).

O método à montante além de ser o mais antigo, é o mais econômico e simples (ESPÓSITO, 2000; ESPÓSITO, 2007; RUSSO, 2007; DUARTE, 2008; REZENDE, 2013; CARMO et al., 2017). Entretanto, é um método que envolve um desafio significativo ao engenheiro responsável, pois a água é o principal agente de instabilidade (CARMO et al., 2017), logo, o alteamento à montante é considerado o menos seguro, consequentemente o que mais causa incidentes (REZENDE, 2013). Neste método, inicia-se a construção com um dique de partida, posteriormente, o rejeito é lançado através de canhões, formando então uma praia de disposição dos rejeitos, a qual funciona como fundação, além de fornecer material para a construção do próximo alteamento (ESPÓSITO, 2000; RUSSO, 2007; DUARTE, 2008; REZENDE, 2013). A barragem vai passando por esse processo até alcançar a altura máxima especificada pelo projeto (ESPÓSITO, 2000; 2007; RUSSO, 2007). Os demais alteamentos que vão surgindo são feitos com o rejeito, e estes, devido ao tempo curto de deposição, podem estar susceptíveis à liquefação quando passam por carregamentos (ESPÓSITO, 2007; RUSSO, 2007). Além disso, neste método, a implantação de um sistema interno eficiente de drenagem é complicada e pode refletir na estabilidade da estrutura (ESPÓSITO, 2007; DUARTE, 2008).

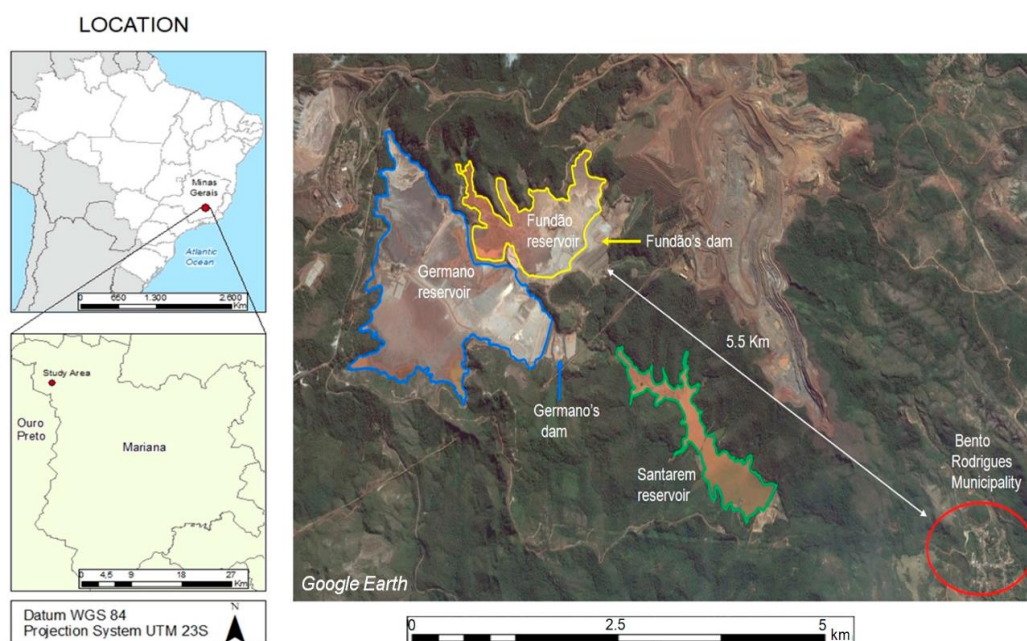
Em um Parecer Técnico da Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável (SEMAD) em 2013 e o Relatório sobre as Causas Imediatas da Ruptura da Barragem de Fundão (Samarco, 2016), é relatado que o método que foi utilizado na construção da barragem de rejeito de Fundão, foi o alteamento à montante.

2.2.3. O desastre de Mariana

Localizada na cidade de Mariana (MG), a barragem de Fundão fazia parte do Complexo Minerário de Germano, operado pela empresa Samarco Mineração S.A, (EMBRAPA, 2015; IBAMA, 2015; LABONNE, 2015; AGURTO-DETZEL, 2016; PORTO, 2016; QUADRA et al., 2018). Instalada em 2008, era uma megaestrutura (CARMO et al., 2017; MURA et al., 2018), com paredes principais com 110 m de altura e dimensões de aproximadamente 500 m de comprimento (MURA et al., 2018).

As barragens integrantes do Complexo de Germano incluíam as barragens de rejeitos Germano e Fundão, além da barragem de Santarém, utilizada como um reservatório de água para o reaproveitamento industrial (MURA et al., 2018). Na figura 2, é possível observar a localização dessas barragens e o município de Bento Rodrigues, localizado há aproximadamente 5,5 km da barragem de Fundão, o qual foi atingido após o seu rompimento.

Figura 2 - Localização do complexo de mineração de Germano



Fonte: MURA et al. (2018).

De acordo com o Relatório sobre as Causas Imediatas da Ruptura da Barragem de Fundão da Samarco (2016), a barragem de Germano foi utilizada como um protótipo para a barragem de Fundão, sendo esta construída quando a barragem de Germano atingiu sua capacidade máxima (SAMARCO, 2016).

Há relatos que desde o ano de sua construção (2008) a barragem de Fundão apresentava anomalias em relação a drenagem (SAMARCO, 2016; CARMO et al., 2017). No dia cinco de novembro de 2015 a barragem de Fundão rompeu (EMBRAPA, 2015; IBAMA, 2015; LABONNE, 2015; AGURTO-DETZEL, 2016; PORTO, 2016; QUADRA et al., 2019) e a lama de rejeitos percorreu mais de 600 km até atingir o mar, afetando o Rio Doce na sua extensão de Minas Gerais ao Espírito Santo (IBAMA, 2015; CARMO et al., 2017; HATJE et al., 2017; ARMSTRONG et al., 2019; QUADRA et al., 2019), causando elevada turbidez da água (EMBRAPA, 2015). Com o rompimento, foram derramados aproximadamente 50 milhões de metros cúbicos de lama e as águas das regiões atingidas ficaram impróprias para o consumo humano (IBAMA, 2015; SEGURA et al., 2016; CARMO et al., 2017; OMACHI et al., 2018; 2024; OLIVEIRA; OLIVEIRA, 2019; TOGNELLA et al., 2022; BORGES et al. 2024; PAULY et al., 2024).

O rompimento da barragem destruiu a comunidade de Bento Rodrigues com seiscentos habitantes e dezenove pessoas morreram (EMBRAPA, 2015; PORTO, 2016; QUADRA et al., 2019; VALERIANO et al., 2019). A lama destruiu pontes, edificações, vias, sendo quanto mais próximo à barragem, maior foi a destruição (QUADRA et al., 2019). Espécies endêmicas e ameaçadas de extinção que habitavam o Rio Doce foram exterminadas (QUADRA et al., 2019). A lama atingiu diversos municípios em Minas Gerais e no Espírito Santo (PORTO, 2016). Este foi considerado o maior desastre da história da mineração brasileira (EMBRAPA, 2015; PORTO, 2016; HATJE et al., 2017; QUEIROZ et al., 2018; VALERIANO et al., 2019; DUARTE et al., 2021) e do mundo envolvendo barragem de rejeitos (VERGÍLIO et al., 2020). Os acidentes envolvendo barragens se diferem de outras fontes antrópicas de metais pela velocidade e quantidade de lama que podem percorrer, cobrindo solos, margens e sedimentos de rios, destruindo a biota e prejudicando a qualidade da água (HATJE et al., 2017).

Todos esses fatores tornaram a legislação ambiental mais rigorosa para o exercício das atividades de mineração (SILVA, 2014). A construção ou alteamento de barragem de rejeito pelo método à montante, foi proibido por lei, em 2020 (BRASIL, 2020), após o desastre de Mariana em 2015 e da cidade de Brumadinho, em 2019. Esses acontecimentos trouxeram a necessidade de investigar formas de recuperar essas áreas e a preocupação com o descarte de materiais (BORGES et al., 2023).

2.3. Tecnossolos

A formação do solo é um processo bem lento e pode exigir milhares de anos (SCALENGHE; FERRARIS, 2008). Entretanto, a influência humana aliada ao clima ou forças geológicas, podem contribuir com a aceleração desse processo (SCALENGHE; FERRARIS, 2008).

De acordo com a World Reference Base for Soil Resources (WRB-FAO), aos solos antropogênicos dá-se o nome de Tecnossolos (IUSS Working Group WRB, 2006). Em alguns locais essa classe de solo pode ser reconhecida como Antrossolos (SCALENGHE; FERRARIS, 2008). Segundo essa classificação, os Tecnossolos podem ser conhecidos como solos urbanos ou de mina e tem a influência de materiais fabricados pelo homem, podendo ter uma quantidade significativa desses. Frequentemente servem de suporte para a vegetação, parques, engenharia civil e florestas urbanas (HOUT et al., 2013). Entram nessa classe os solos de resíduos, dentre eles, aterros, cinzas, lama, resíduos de mina e os solos construídos (HOUT et al., 2013; HOUT et al., 2014; IUSS WORKING GROUP WRB, 2006).

Em casos de rompimento de barragem de mineração, como os ocorridos nas cidades de Mariana, em 2015, e Brumadinho, em 2019, a deposição da lama de rejeitos resultou na formação de Tecnossolos (figura 3). Estes, possuem diversas limitações, dentre elas a falta de estruturação (figura 4). Geralmente possuem valores de pH extremos e as partículas podem ser finas ou muito grossas, além de poderem apresentarem alta salinidade e baixa disponibilidade de nutrientes (SANTINI; FEI, 2016). As características físicas desse solo interferem na disponibilidade de água para as plantas e desenvolvimento radicular (CRUZ et al., 2020; MATOS et al., 2020).

Figura 3 - Tecnossolo formado após o rompimento da barragem de Fundão (Mariana- MG).



Fonte: Renato Saldanha Bastos

Figura 4 - Tecnossolo formado após o rompimento da barragem de Fundão (Mariana- MG) evidenciando a falta de estruturação.



Fonte: do autor.

Alguns trabalhos, caracterizaram o rejeito antes do rompimento da barragem de Fundão e os Tecnosolos formados após o rompimento da barragem. Silva et al. (2007) realizaram uma análise do rejeito de mineração de ferro da mina de Alegria, que fazia parte do Complexo Germano. Eles constataram que o rejeito possuía limitações químicas e físicas, apresentando baixos teores de nutrientes, baixa retenção de água, elevada densidade do solo e de partículas. A composição mineralógica nas frações areia, silte e argila era constituída predominantemente por hematita, goethita e quartzo (SILVA et al., 2007).

Logo após o rompimento da barragem de Fundão, Schaefer et al. (2016) avaliaram todo trecho ribeirinho e encontraram valores de Densidade do solo (D_s) na faixa de 0,94 a 2,38 g cm⁻³. Após quatro meses, constataram o assentamento e selamento do solo, o que acarretou a formação de um material duro à penetração. Relataram que D_s da lama variou bastante após esse tempo, com média de 1,54 g cm⁻³ na lama enterrada e de 1,41 g cm⁻³ na superfície. A Densidade de partículas (D_p) encontrada por esses autores foi 2,80 g cm⁻³ na camada “enterrada” e 2,75 g cm⁻³ na superfície.

Quinze dias após o rompimento da barragem de Fundão, Silva et al. (2016) coletaram o material depositado as beiras do Rio Carmo em Barra Longa (MG) e observaram que o material possuiu baixo teor de argila e altos teores de areia e silte. Havia predominância de quartzo e hematita. A D_s foi de 2,12 g cm⁻³ e a D_p de 2,85 g cm⁻³, enquanto a porosidade foi apenas 25,6%. O material era alcalino e possuía baixos teores de matéria orgânica, CTC e nutrientes. Os teores de metais pesados (Cd, Cu, Pb e Ni) foram encontrados em quantidades muito baixas ou não detectáveis, em contrapartida, apresentou altos teores de Fe e Mn (SILVA et al., 2016).

A alcalinidade da lama, com pH em torno de 10,5, é explicada não pela presença de bases como Ca e Mg que é baixa, mas pela aproximação do PCZ (Ponto de Carga Zero) dos óxidos de Ferro, que é próximo da neutralidade (SCHAEFER et al., 2016). Além disso, a adição de hidróxido de sódio no processo de separação do minério eleva o pH (PIRES et al., 2003; SCHAEFER et al., 2016).

Em áreas ribeirinhas e ao longo das margens do Rio Gualaxo do Norte foi observado aumento no teor de silte, densidade do solo e redução da macroporosidade (SILVA et al., 2021). Os mesmos autores constataram que o rejeito diminuiu a biomassa microbiana e atividade microbiana no solo. Estas são indicadores essenciais da funcionalidade do ecossistema e quando a funcionalidade é inferior, significa que há desequilíbrio no meio ambiente (SILVA et al., 2021). Diante disso, os Tecnosolos oriundos de mineração de ferro possuem restrições, as quais devem ser trabalhadas para a recuperação de áreas em que esse solo se faz presente.

2.4. Propriedades físicas do solo, matéria orgânica no solo e compostos orgânicos

A estrutura do solo é considerada o arranjo das partículas do solo, ou seja, a forma em que se organizam (FERREIRA et al., 2010). Ela está relacionada ao seu desenvolvimento e os fatores de formação do solo tem influência nesse processo (FERREIRA; FERNANDES; CURI, 1999). Uma boa estrutura do solo é fundamental para a sustentação da agricultura a longo prazo (DEXTER, 1988; FERREIRA et al., 1999; PICCOLO; MBAGWU, 1999), pois ela está associada importantes propriedades nas relações solo-planta (FERREIRA et al., 1999). Ela influencia o crescimento das plantas, água no solo e sua trabalhabilidade (DEXTER, 1988; PICCOLO; MBAGWU, 1999).

De acordo com Kemper e Chepilet (1965), o agregado se refere a união de duas ou mais partículas primárias, aderidas umas às outras com mais força do que com as partículas circundantes. Para Bochner et al. (2008), os agregados são um agrupamento de partículas do solo, que possuem formas e tamanhos específicos, atuando como uma unidade estrutural e é formando em duas etapas. Primeiro ocorre a aproximação de partículas unitária, que pode decorrer da variação do conteúdo de água do solo (BOCHNER et al., 2008). Essa aproximação pode ser favorecida por ciclos de umedecimento e secagem, atração eletrostática entre as partículas do solo ou pela da ação das raízes vegetais, de hifas de fungos (BOCHNER et al., 2008). Segundo o autor, a outra etapa é a manutenção ou estabilização da aproximação da partícula unitária.

Desde o início do século XX, se reconhece cinco fatores fundamentais envolvidos na formação e estabilidade de agregados: presença de fauna e microrganismos do solo, raízes, agentes de ligação inorgânicos e variáveis ambientais (SIX et al., 2004). BASTOS et al. (2005a) ressaltam que dentre os diversos fatores que interferem na agregação do solo, estão o teor e o tipo de argila, óxidos e hidróxidos de ferro, exsudatos orgânicos oriundos de plantas, presença de substâncias orgânicas resultantes da atividade microbiana e outros compostos orgânicos.

Os agregados do solo podem se dividir em macroagregados e microagregados. Os macroagregados são partículas maiores que 250 µm de diâmetro e os microagregados são menores que este valor (TISDALL; OADES, 1982). Sua formação é influenciada pelo manejo do solo, tendo grande participação de raízes e hifas na estabilidade dos mesmos (TISDALL; OADES, 1982). Quando há redução no conteúdo de matéria orgânica, pode haver uma redução

dos agregados estáveis em água (TISDALL; OADES, 1982). Já os microagregados, parece não ser afetado pelo conteúdo de matéria orgânica no solo (TISDALL; OADES, 1982).

A matéria orgânica é uma mistura variada e complexa de substâncias orgânicas, que contém o elemento carbono, o qual compreende praticamente metade da massa das substâncias orgânicas presentes no solo (BRADY; WEIL, 2013). De acordo com os autores, além de uma variedade de substâncias húmicas, a matéria orgânica inclui a biomassa do solo, restos de organismos e compostos orgânicos. Ela se destaca como um importante agente cimentante (BASTOS et al., 2005a), melhorando as propriedades físicas, químicas e biológicas do solo (FAGERIA, 2012), principalmente nos horizontes superficiais (BRADY; WEIL, 2013), contribuindo para a sustentabilidade nos sistemas de cultivo (FAGERIA, 2012).

Nos solos bem estruturados, a matéria orgânica encontra-se protegida dentro dos agregados (PREVEDELLO et al., 2014) e pode auxiliar na estabilização dos mesmos (GUERRA 1990; CHENU; BISSONNAIS; ARROUAYS, 2000) ao atribuir-lhes repelência parcial (CHENU; BISSONNAIS; ARROUAYS, 2000). A presença de frações orgânicas confere hidrofobicidade aos solos (CHENU; BISSONNAIS; ARROUAYS, 2000). Os compostos da matéria orgânica ao passar pela humificação formam substâncias com estruturas químicas mais complexas e estáveis comparadas aos materiais que as originaram (FONTANA, 2009). Essas substâncias conhecidas como substâncias húmicas, frações húmicas ou frações orgânicas (humina, ácido húmico e ácidos fúlvicos) estão presentes em diversos processos que ocorrem no solo (FONTANA, 2009). Segundo Piccolo (2001), as substâncias húmicas são moléculas heterogêneas de diversas origens, bem pequenas, que se auto-organizam em conformações supramoleculares. Essas substâncias, originadas do metabolismo/catabolismo microbiano, decomposição de restos vegetais ou de ambas as atividades podem, como os ácidos húmicos, contribuir com a estabilidade de agregados (PICCOLO; MBAGWU, 1990).

Bastos et al. (2005b) destacam que as substâncias orgânicas, quando adicionadas a certos solos, podem conferir repelência à água. Elas reduzem a velocidade de infiltração da água nos agregados, de acordo com seu grau de hidrofobicidade (BASTOS et al., 2005b). Através da ligação que se tem de argila-metal-substância húmica, a porção hidrofóbica da matéria orgânica se orienta para a face externa criando uma camada que repele a água, enquanto a porção hidrofílica se orienta para o interior dos agregados do solo (PICCOLO; MBAGWU, 1999).

A hidrofobicidade de uma partícula está relacionada à sua molhabilidade pela água (MAPA, 2006; NEVES et al., 2021). A molhabilidade é a tendência de um fluido se aderir ou

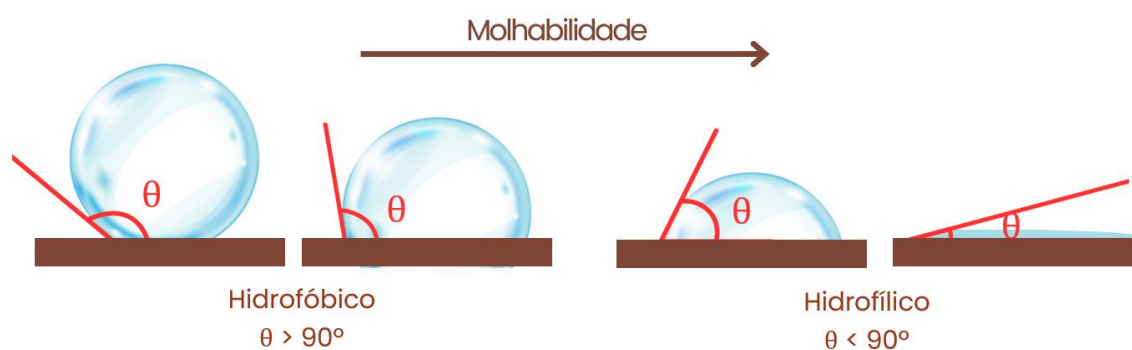
espalhar em uma superfície sólida, podendo ser mais ou menos intensa (WOCHE et al., 2005; NEVES et al., 2021). A maior ou menor afinidade pela água, define se as partículas são hidrofílicas ou hidrofóbicas, respectivamente (WOCHE et al., 2005; MAPA, 2006).

Os compostos químicos podem ser polares ou não-polares, dependendo da presença ou ausência de um dipolo permanente (MAPA, 2006). A polaridade está ligada à afinidade entre as substâncias, dessa forma, uma substância polar só terá afinidade com outra substância polar, o mesmo acontece com as não-polares (MAPA, 2006). Uma substância hidrofóbica, apresenta a superfície não-polar, assim, tem-se maior afinidade com o ar do que com a água. Já a hidrofílica possui superfície polar e tem maior afinidade com a água do que com o ar (MAPA, 2006).

O ângulo de contato entre a superfície e a gota, define a maior ou menor hidrofobicidade/hidrofiliicidade (WOCHE et al., 2005; GOMES, 2016; MAPA, 2006). De acordo com esses autores, quanto mais próximo de 0° mais hidrofílico é a gota, quanto mais próximo a 180° , mais hidrofóbica é a gota (figura 5). As forças envolvidas nesse processo são tensão superficial, adesão e coesão (NEVES et al., 2021).

Solos que contêm materiais orgânicos tendem a não molhar facilmente (WOCHE et al., 2005), devido à tensão superficial que pode ocorrer nos compostos orgânicos (ZISMAN, 1964; WOCHE et al., 2005). Quando a coesão é mais intensa que a adesão, a molhabilidade da superfície pelo líquido é menor e a gota assume um formato esférico (NEVES et al., 2021). Entretanto, quando a adesão é maior e a coesão é menor, a gota tende a se espalhar na superfície, reduzindo sua esfericidade (NEVES et al., 2021).

Figura 5 - Representação da molhabilidade de um líquido na superfície, evidenciando o ângulo de contato.



Fonte: Adaptado de Neves et al. (2021).

Dentre os compostos orgânicos, podemos citar o amido e o ácido esteárico. O primeiro possui caráter hidrofílico e o segundo caráter hidrofóbico. O amido tem sua principal fonte no trigo, milho, arroz, batata, mandioca e ervilha (AVÉROUS; HALLEY, 2009). Sua alta hidrofílicidade se deve à presença de grupos hidroxila em sua estrutura (GOMES, 2016). É composto por amilose e amilopectina (AVÉROUS; HALLEY, 2009). Já os ácidos graxos naturais em sua maioria se encontram na formando triacilgliceróis e triglicerídeos, os quais fazem parte de gorduras e óleos comestíveis (VIANNI; BRAZ-FILHO; 1996). Os lipídeos (gorduras e óleos) podem ser originados de vegetais, animais ou até mesmo de microrganismos (OLIVEIRA, 2018). Essas substâncias não se dissolvem na água, sendo consideradas substâncias hidrofóbicas (OLIVEIRA, 2018).

Na natureza, os ácidos graxos mais abundantes possuem em torno de 16 ou 18 átomos de carbonos (VIANNI; BRAZ-FILHO; 1996). Os ácidos graxos saturados possuem os átomos de carbono ligados entre si através de ligações simples (VIANNI; BRAZ-FILHO, 1996). Dentre eles, está o esteárico, com 18 cadeias de carbono (VIANNI; BRAZ-FILHO, 1996; SAGIRI et al., 2015; OLIVEIRA, 2018; AGUIAR, 2019). Os ácidos graxos que possuem a cadeia com menos de 10 átomos de carbono, em temperatura ambiente se encontram na forma líquida, enquanto os que possuem mais de 10 átomos de carbono, se encontram na forma sólida (VIANNI; BRAZ-FILHO; 1996). O ponto de fusão aumenta de acordo com o comprimento da cadeia e o ácido esteárico tem o ponto de fusão em 70°C (VIANNI; BRAZ-FILHO; 1996). É constituinte dos lipídeos (OLIVEIRA, 2018) e possui caráter hidrofóbico (BASTOS et al., 2005a; 2005b). Encontrado principalmente na manteiga de cacau (35%), sebo (20%), na banha (10%) (VIANNI; BRAZ-FILHO; 1996) e gordura do leite (12%) (VIANNI; BRAZ-FILHO, 1996; HORSTMANN, 2019). Na maioria dos óleos vegetais, o ácido esteárico se encontra em proporções de 1 a 5% (VIANNI; BRAZ-FILHO; 1996).

O amido e o ácido esteárico foram utilizados no trabalho de BASTOS et al. (2005a; 2005b), como compostos orgânicos visando aumentar a estabilidade de agregados em água. BASTOS et al. (2005a) obtiveram resultados positivos com a aplicação de ácido esteárico em Latossolo. Mesmo em períodos longos de incubação, observaram melhoria na estabilidade de agregados em água, sendo a dose 5,5 g kg⁻¹ utilizada por esses autores, foi a que apresentou melhor resposta. Para este mesmo trabalho, a aplicação do amido apresentou efeito positivo na agregação do solo somente para aplicação contínua e em período curto. Em outro trabalho,

BASTOS et al. (2005b) observaram que a adição de amido, não influenciou a estabilização de agregados do solo, mesmo na maior dose utilizada por eles (9,9 g kg⁻¹).

2.5. Ensaio de compressão uniaxial, pressão de pré-consolidação e a capacidade de suporte de carga do solo

O aumento da massa de solo por unidade de volume, ou seja, aumento na densidade, por uma carga aplicada externamente ou por alterações da poro-pressão interna é denominado compressão do solo (REICHERT et al., 2010). Segundo os autores, em solos não saturados, o processo de compressão é denominado compactação e em solos saturados é denominado consolidação. A consolidação irá depender da drenagem da água que estiver em excesso no solo, determinada pelo gradiente e pela condutividade hidráulica (REICHERT et al., 2010).

Uma das formas de avaliar a compressão do solo é pelo ensaio de compressão uniaxial (REICHERT et al., 2010) que é considerado o método mais comum (DIAS JUNIOR; TASSINARI; MARTINS, 2019). De acordo com os autores, pelo ensaio de compressão uniaxial é possível analisar o efeito do manejo sobre a estrutura do solo ou obter modelos de capacidade de suporte de carga do solo, determinar propriedades de compressão do solo como índices de compressão, recompressão, pressão de pré-consolidação (σ_p), bem como a densidade do solo na pressão de pré-consolidação.

No ensaio de compressão uniaxial utiliza-se um aparelho denominado consolidômetro (Figura 6) (REICHERT et al., 2010; DIAS JUNIOR; MARTINS, 2017). Ele é composto por uma base rígida e um anel, o qual comporta a amostra do solo. Há uma pedra porosa acima e abaixo da amostra, permitindo a drenagem da água que sai dos espaços vazios da amostra ao se aplicar uma carga vertical (REICHERT et al., 2010). Por meio de um cabeçote é aplicada uma pressão axial vertical. A pressão é transmitida do cabeçote para a esfera de aço, ou seja, centralmente, se distribui em uma placa circular (REICHERT et al., 2010). Assim, há uma distribuição uniforme na amostra de solo, a qual é submetida a pressões pré-determinadas (REICHERT et al., 2010).

Figura 6 – Consolidômetro de ar comprimido



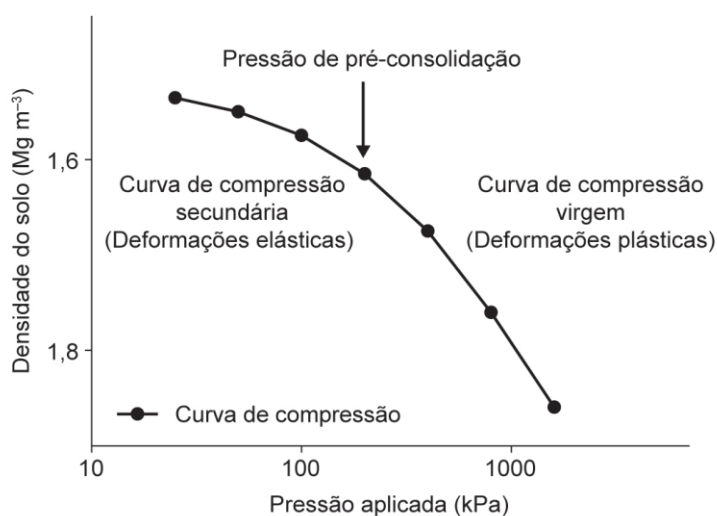
Fonte: do autor. Modelo: Terraload S-450, Durham GeoSlope®

A aplicação da pressão externa a amostra comprime o solo, expulsando o ar e a água do espaço vazio e reduzindo, assim, seu espaço poroso e a altura da amostra (REICHERT et al., 2010). A deformação é indicada por um ponteiro, e as leituras dessas deformações são feitas em intervalos de tempo já definidos para cada pressão (REICHERT et al., 2010).

O ensaio de compressão uniaxial é realizado em amostra de solo não saturada, aplicando de forma sucessiva e contínua, pressões crescentes e já estabelecidas de 25, 50, 100, 200, 400, 800 e 1.600 kPa (DIAS JUNIOR; MARTINS, 2017). Através desse ensaio, obtêm-se curvas de compressão do solo, possibilitando a quantificação das reduções de volume do solo, e assim, estimar susceptibilidade à compactação do mesmo (DIAS JUNIOR; MARTINS, 2017; DIAS JUNIOR; TASSINARI; MARTINS, 2019). A curva obtida relaciona o logaritmo da pressão aplicada e o índice de vazios ou densidade do solo (REICHERT et al., 2010; DIAS JUNIOR; MARTINS, 2017; DIAS JUNIOR; TASSINARI; MARTINS, 2019).

A relação é linear quando o solo não foi submetido a nenhuma pressão prévia, e qualquer pressão aplicada resultará em deformações não-recuperáveis e consequentemente, a compactação (REICHERT et al., 2010; DIAS JUNIOR; MARTINS, 2017; DIAS JUNIOR; TASSINARI; MARTINS, 2019). No entanto, se no solo já ocorreu ciclos de secagem e umedecimento ou pressões prévias, haverá a formação de duas regiões diferentes na curva de compressão do solo, ocorrida pela variação das pressões atuantes sobre o solo (DIAS JUNIOR; MARTINS, 2017). Haverá, portanto, uma curva de compressão secundária, representando a região de deformações elásticas, pequenas e recuperáveis; e outra curva de compressão virgem, representando uma região em que as deformações são plásticas e não recuperáveis (Figura 4) (HOLTZ; KOVACS, 1981; DIAS JUNIOR, 1994; DIAS JUNIOR; PIERCE, 1996; DIAS JUNIOR; MARTINS, 2017). A curva de compressão do solo é dividida nessas duas regiões pela chamada pressão de pré-consolidação (figura 7) (DIAS JUNIOR; MARTINS, 2017; DIAS JUNIOR; TASSINARI; MARTINS, 2019), que é considerada um indicativo da capacidade de suporte de carga do solo (REICHERT et al., 2010).

Figura 7 - Curva de compressão do solo



Legenda: curva de compressão do solo na qual evidencia a pressão de pré-consolidação (σ_p), as regiões em que se encontram a curva de compressão secundária e a curva de compressão virgem, de acordo com Dias Junior (1994).

Fonte: Dias Junior; Tassinari e Martins (2019)

Revisando diversos trabalhos Dias Junior, Tassinari e Martins (2019) constataram que a pressão de pressão de pré-consolidação depende de diversos fatores: textura e mineralogia; densidade do solo e estrutura; ciclos de umedecimento e secagem; teor de matéria orgânica e sua característica; uso e manejo do solo; agentes cimentantes; alterações químicas do solo

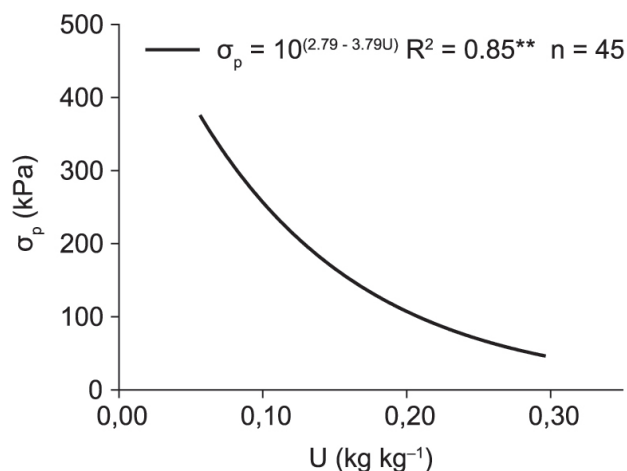
ocasionadas pelo processo de intemperismo; troca de íons; pH; precipitações pluviométricas, entre outras. Segundo os autores, a curva de compressão virgem está relacionada às primeiras pressões aplicadas ao solo, já as pressões que o solo sofreu no passado são representadas pela curva de compressão secundária, portanto é em função do manejo. É na região da curva de compressão secundária que o solo deve ser trafegado ou cultivado, a fim de evitar sua compactação (DIAS JUNIOR; MARTINS, 2017; DIAS JUNIOR; TASSINARI; MARTINS, 2019). O histórico de manejo do solo pode ser representado por esse componente da curva de compressão e sua quantificação é feita pela determinação da pressão de pré-consolidação do solo (DIAS JUNIOR; PIERCE, 1996; DIAS JUNIOR; MARTINS, 2017).

Para determinar a pressão de pré-consolidação de forma mais rápida em relação a outro método, como o de Casagrande (1936), Dias Júnior e Pierce (1995) propuseram um método em que uma planilha simples traça automaticamente as curvas de compressão do solo, realizando tanto o cálculo da pressão de pré-consolidação como a densidade do solo na pressão de pré-consolidação (DIAS JUNIOR; MARTINS, 2017). A planilha utiliza uma combinação de métodos e dependem do teor de água no solo (DIAS JUNIOR; MARTINS, 2017). Por este procedimento é possível ter uma estimativa confiável e rápida para condições de solos não saturados ou saturados, além de eliminar o julgamento subjetivo que podem ocorrer ao utilizar os procedimentos de gráficos clássicos (DIAS JÚNIOR; PIERCE, 1995).

O estudo sobre a compressibilidade do solo pode auxiliar na tomada de decisão sobre o tráfego em uma determinada área, assim como execução ou não de operação mecanizada (DIAS JUNIOR; TASSINARI; MARTINS, 2019). Para Severiano et al. (2011), quando se trata da prevenção da degradação em áreas agrícola, é fundamental caracterizar o comportamento compressivo do solo. De acordo com Iori et al. (2012), a pressão de pré-consolidação permite identificar a degradação física do solo. Também é importante conhecer a capacidade de suporte de carga do solo, pois, auxilia no planejamento de operações mecanizadas a serem realizadas na área evitando que ocorra a compactação (DIAS JUNIOR et al., 1999).

O modelo de capacidade de suporte de carga do solo, proposto por Dias Junior (1994) para solos de clima temperado, prediz quanto o solo pode suportar mediante a aplicação de uma pressão máxima, sem compactar, em função da umidade do solo e da pressão de pré-consolidação. Na figura 8, o modelo de capacidade de suporte de carga do solo representado graficamente:

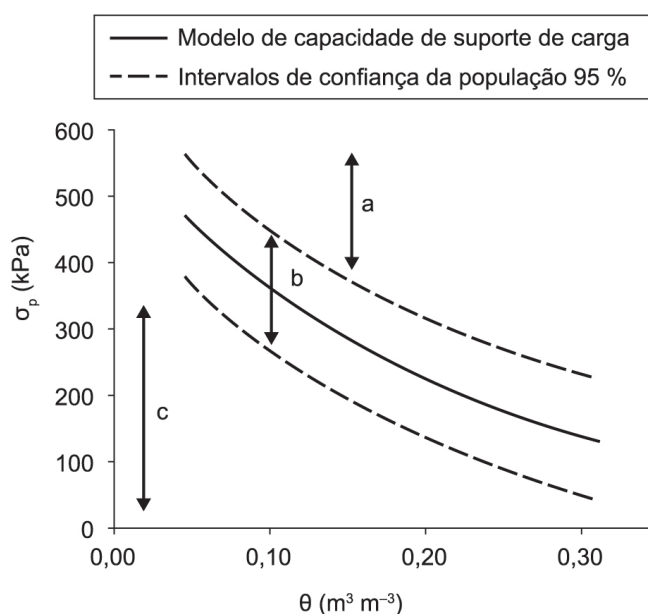
Figura 8 - Modelo da capacidade de suporte de carga



Legenda: Modelo de capacidade de suporte de carga representado graficamente, mostrando o decaimento exponencial da pressão de pré-consolidação (σ_p) de acordo com o aumento a umidade do solo. Fonte: Adaptada de Dias Junior et al. (2005) por Dias Junior e Martins (2017).

Quando se deseja analisar o efeito do manejo sobre a estrutura do solo, nos modelos de capacidade de suporte de carga são adicionados intervalos de confiança da população a 95% (Figura 9) (Dias Junior; Martins, 2017).

Figura 9 - Modelo de capacidade de suporte de carga, acrescido de intervalo de confiança e os critérios para analisar o efeito do manejo sobre a estrutura do solo.



Legenda: a – região em que a compactação já ocorreu. As pressões de pré-consolidação depois do tráfego se encontram maiores que o limite superior do intervalo de confiança; b – região em que as pressões de pré-consolidação determinadas após o tráfego se encontram entre os limites inferior e

superior dos intervalos de confiança. Ainda que as amostras de solo nesta região não tenham sofrido a compactação, a região indica que a compactação do solo pode acontecer nas próximas operações, caso as pressões aplicadas ultrapassem o limite superior do intervalo de confiança; c – região em que as pressões de pré-consolidação após o tráfego estão abaixo do limite inferior do intervalo de confiança, portanto, não ocorreu a compactação. Fonte: Adaptada de Dias Junior et al. (2005) por Dias Junior; Tassinari; Martins (2019).

O modelo de capacidade de suporte de carga também é empregado em diversos estudos como: pastagens (TASSINARI et al., 2015; BENEVENUTE et al., 2020); solos do Cerrado (SEVERIANO et al., 2011); plantios de eucalipto (DIAS JUNIOR et al., 2005, 2007, 2008; ANDRADE et al., 2017; TASSINARI et al., 2019); plantio de laranja (FIDALSKI et al., 2015) e muitos outros. Recentemente tem sido utilizado em Tecnossolos oriundo de mineração de ferro (PAÉZ et al., 2024).

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO - SISNIB. Disponível em: <https://www.snisb.gov.br/Entenda_Mais/outros>. Acesso em: 5 mar. 2024.

AGUIAR, G. C. Uso do ácido esteárico (C18: 0) na mitigação da depressão de gordura do leite induzida por ácido linoleico conjugado (CLA) trans-10, cis-12 em ovelhas leiteiras. 70 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Ciência Animal, Produção Animal, Universidade do Estado de Santa Catarina, Lages, 2019.

AGURTO-DETZEL, H.; BIANCHI, M.; ASSUMPÇÃO, M.; SCHIMMEL, M.; COLLAÇO, B.; CIARDELLI, C.; BARBOSA, J.R.; CALHAU, J. The tailings dam failure of 5 november 2015 in SE Brazil and its preceding seismic sequence. **Geophysical Research Letters**, v. 43, n. 10, p. 4929-4936, 2016.

ALBUQUERQUE FILHO, L. H. Avaliação do comportamento geotécnico de barragens de rejeitos de minério de ferro através de ensaios de piezocone. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG, 2004.

ALMEIDA, C. A., DE OLIVEIRA, A. F., PACHECO, A. A., LOPES, R. P., NEVES, A. A., QUEIROZ, M. E. L. R. Characterization and evaluation of sorption potential of the iron mine waste after Samarco dam disaster in Doce River basin–Brazil. **Chemosphere**, v. 209, p. 411-420, 2018.

ANDRADE, M. L. C.; TASSINARI, D.; DIAS JUNIOR, M. S., MARTINS, R. P., ROCHA, W. W.; SOUZA, Z. R. Soil compaction caused by harvest and logging operations in eucalyptus forests in coarse-textured soils from northeastern Brazil. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 41, p. 191-200, 2017.

AVÉROUS, L.; HALLEY, P. J. Biocomposites based on plasticized starch. **Biofuels, bioproducts and biorefining**, v. 3, n. 3, p. 329-343, 2009.

BASTOS, R. S.; MENDONÇA, E. S.; ALVAREZ V, V. H.; CORRÊA, M. T. Formação e estabilização de agregados do solo decorrentes da adição de compostos orgânicos com diferentes características hidrofóbicas. **Revista Brasileira de Ciência Solo**. Viçosa, v. 29, p. 11-20, 2005b.

BASTOS, R. S.; MENDONÇA, E. S.; ALVAREZ V, V. H.; CORRÊA, M. T.; COSTA, L. V. Formação e estabilização de agregados do solo influenciados por ciclos de umedecimento e secagem após adição de compostos orgânicos com diferentes características hidrofóbicas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 29, n. 1, p. 21-31, 2005a.

BATISTA, É. R., CARNEIRO, J. J., PINTO, F. A., DOS SANTOS, J. V., CARNEIRO, M. A. C. Environmental drivers of shifts on microbial traits in sites disturbed by a large-scale tailing dam collapse. **Science of the Total Environment**, v. 738, p. 139453, 2020.

BETTENCOURT J. S.; MORESCHI, J. B. Minerais e minérios. In: TEIXEIRA, W.; TOLEDO, M. C. M.; FAIRCHILD, T. R.; TAIOLI, F. (org.) **Decifrando a Terra**. São Paulo: Oficina de Textos, p. 445-470, 2000.

BORGES, P. H. C.; SILVA, A. O., BENEVENUTE P. A. N.; SANTOS, J. V.; BATISTA, E.R.; CARVALHO A. M. X.; CARNEIRO, M. A. C; SIQUEIRA, J. O. Pelletization and fertilization improve the root environment in soil affected by iron mining tailings. **Water, Air, & Soil Pollution**, v. 234, n. 8, p. 538, 2023.

BRADY, N. C.; WEIL, R. R. **Elementos da natureza e propriedades dos solos**. Tradução técnica: Igo Fernando Lepesch. 2. ed. Porta Alegre: Bookman, 2013. 686 p.

BRASIL. Lei nº 14.066, de 30 de setembro de 2020. Altera a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB), a lei que cria o Fundo Nacional do Meio Ambiente (FNMA), a Política Nacional de Recursos Hídricos e o Código de Mineração. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2019-2022/2020/Lei/L14066.htm#art2>. Acesso em: 02 nov. 2021.

CAITANO, T. B. S.; SILVA, E. R. P.; ALVES, C. N. Characterization and safety analysis of iron mining dams located in the state of Pará, Brazil. **Research, Society and Development**, [S. l.], v. 10, n. 3, p. e35810313384, 2021.

CARMO, F. F.; KAMINO, L. H. Y.; JUNIOR, R. T.; CAMPOS, I. C.; CARMO, F. F.; SILVINO, G.; CASTRO, K. J. S. X. C; MAURO, M. L.; RODRIGUES, N. U. A.; MIRANDA, M. P. S.; PINTO, C. E. F. Fundação tailings dam failures: the environment tragedy of the largest technological disaster of Brazilian mining in global context. **Perspectives in ecology and conservation**, v. 15, n. 3, p. 145-151, 2017.

CARVALHO M. Avaliação da disposição de moinhos em circuitos de moagem de minério de ferro. [Dissertação]. Universidade Federal de Ouro Preto, Escola de Minas, Departamento de Engenharia de Minas, Ouro Preto; 2015.

CHENU, C.; BISSONNAIS, Y.; ARROUAYS, D. Organic matter influence on clay wettability and soil aggregate stability. **Soil Science Society of America Journal**, v. 64, n. 4, p. 1479-1486, 2000.

DB City.com. Disponível em: <<https://pt.db-city.com/Brasil--Minas-Gerais--Mariana>>. Acesso: 14 set. 2021.

DIAS JUNIOR, M.S.; SILVA, S. R.; SANTOS, N.S.; ARAUJO-JUNIOR, C.F. Assessment of the soil compaction of two Ultisols caused by logging operations. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, n. 6, p. 2245-2253, 2008.

DIAS JUNIOR, M. S.; FERREIRA, M. M.; FONSECA, S.; SILVA, A. R.; FERREIRA, D. F. Avaliação quantitativa da sustentabilidade estrutural dos solos em sistemas florestais na região de Aracruz-ES. **Revista Árvore**, v. 23, n. 4, p. 371-80, 1999.

DIAS JUNIOR, M. S.; LEITE, F. P.; LASMAR JÚNIOR, E.; ARAÚJO JUNIOR, C. F. Traffic effects on the soil preconsolidation pressure due to eucalyptus harvest operations. **Scientia Agrícola**, v. 62, n. 3, p. 248-255, 2005.

DIAS JUNIOR, M. S.; MARTINS, P. C. C. Ensaio de compressão uniaxial e modelos de capacidade de suporte de carga do solo. In: TEIXEIRA, P. C. et al. (eds). **Manual de Métodos de Análise de Solo**. 3. ed., rev. e amp. Brasília: Embrapa, 2017. p. 152-171.

DIAS JUNIOR, M. S.; PIERCE, F. J. A simple procedure for estimating preconsolidation pressure from soil compression curves. **Soil Technology**. v. 8, n. 2, p. 139-151, 1995.

DIAS JUNIOR, M.; TASSINARI, D.; MARTINS, P. C. C. COMPACTAÇÃO DO SOLO – ATUALIZAÇÃO. In: SEVERIANO, E. C.; MORAES, M. F.; PAULA, A. M. **Tópicos em Ciência do Solo**. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 10:1-63, 2019.

DIAS JÚNIOR, M.S. Compression of three soils under longterm tillage and wheel traffic. East Lansing, Michigan State University, 1994. 114p. (Tese de Doutorado).

DIAS JUNIOR, M.S.; GOMES, A.N.; ANDRADE, S.C. & AZEVEDO, M.R. Avaliação da sustentabilidade da estrutura de Argissolos em sistemas florestais. **Cerne**, 8:103-114, 2002.

DORR II, J. V. N. (1959). Esboço Geológico do Quadrilátero Ferrífero de MG. In: DNPM-USGS. Publicação Especial 1.

DUARTE, E. B.; NEVES, M. A., OLIVEIRA, F. B., MARTINS, M. E., DE OLIVEIRA, C. H. R., BURAK, D. L., ORLANDO, M. T. D.; RANGEL, C. V. G. T. Trace metals in Rio Doce sediments before and after the collapse of the Fundão iron ore tailing dam, Southeastern Brazil. **Chemosphere**, v. 262, p. 127879, 2021.

EMBRAPA. **Relatório: Avaliação dos impactos causados ao solo pelo rompimento de barragem de rejeito de mineração em Mariana, MG: Apoio ao plano de recuperação agropecuária**. 2015.

ESPÓSITO, T. J. **Metodologia probabilística e observacional aplicada a barragens de rejeito construídas por aterro hidráulico**. 2000. 363 f. Tese (Doutorado em Geotecnia) – Universidade Federal de Brasília, Brasília, 2000.

FERREIRA, M. M.; FERNANDES, B.; CURI, N. Mineralogia da fração argila e estrutura de Latossolos da região sudeste do Brasil. *Revista brasileira de ciência do solo*, v. 23, p. 507-514, 1999.

FERREIRA, M. M. Caracterização física do solo. In: LIER, Q. J. van (ed.). **Física do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2010. v. 1, cap. 1, p. 1-27.

FIDALSKI J.; CAVALIERI-POLIZELI K. M. V.; TORMENA C.A.; ANGHINONI G.; AULER P. A. M. Capacidade de suporte de carga do solo em sistemas de produção de laranja conservacionistas. **Revista Brasileira de Ciência Solo**, v. 39, p. 880-885, 2015

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS - FAO. 2015. World reference base for soil resources 2014. World soil resources reports, n.106, 203p. Rome, 2015.

GOMES, A. R. Desenvolvimento de metodologia para determinação de eteraminas provenientes de barragens de rejeitos de mineradoras de ferro utilizando a microextração líquido-líquido dispersiva associada à cromatografia gasosa. 2016. Dissertação (Mestrado) - Curso de Tecnologias para o Desenvolvimento Sustentável, Universidade Federal de São João Del-Rei, 2016.

GUERRA, A. J. T. O papel da matéria orgânica e dos agregados na erodibilidade dos solos. *Anuário do instituto de geociências*, v. 13, n. 4, p. 43-52, 1990.

GUPTA, S. C.; ALLMARAS, R. R. Models to assess the susceptibility of soil to excessive compaction. **Advances in Soil Science**, New York, v. 6, p. 65-100, 1987.

HATJE, V.; PEDREIRA, R. M.; REZENDE, C.E.; SCHETTINI, C. A. F.; SOUZA, G. C.; MARIN, D. C.; HACKSPACHER, P. C. The environmental impacts of one of the largest tailing dam failures worldwide. **Scientific reports**, v. 7, n. 1, p. 1-13, 2017.

HORSTMANN, R.. Efeito do ácido esteárico (c18:0) sobre a produção, composição, perfil de ácidos graxos do leite e expressão de genes lipogênicos em ovelhas. 2019. 66 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Ciência Animal, Produção Animal, Universidade do Estado de Santa Catarina, Lages, 2019.

HOLTZ, R. D.; KOVACS, W. D. **An introduction to geotechnical engineering**. New Jersey: Prentice - Hall Englewood cliffs, 1981. 733 p.

HUOT H., M. O. SIMONNOT, P. MARION, J. YVON, P. DE DONATO, J. L. MOREL. Characteristics and potential pedogenetic processes of a Technosol developing on iron industry deposits. **Journal of Soils and Sediments**, v. 13, n. 3, p. 555-568, 2013.

HUOT, H.; SIMONNOT, M. O.; WATTEAU, F.; MARION, P.; YVON, J.; DE

DONATO, P.; MOREL, J. L. Early transformation and transfer processes in a Technosol developing on iron industry deposits. **European journal of soil science**, v. 65, n. 4, p. 470-484, 2014.

KEMPER, W. D.; CHEPIL, W. S. Size distribution of aggregates. **Methods of soil analysis: Part 1 physical and mineralogical properties, including statistics of measurement and sampling**, v. 9, p. 499-510, 1965.

LABONNE, B., 2016. Mining dam failure: business as usual? *Extr. Ind. Soc.* 3, 651–652.

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

LIMA, J. E. S.; BALTAZAR, O. F. In: BALTAZAR, O. F.; RAPOSO F.O. Folha SF.23-X-B-I. - Mariana. Rio de Janeiro, DNPM/SNMM. 1993; 190p. p.7-8. (Texto Explicativo)

LOZANO, F. A. E. **Seleção de locais para barragens de rejeitos usando o método de análise hierárquica**. 2006. 128f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Geotécnica) - Universidade de São Paulo, 2006.

MADUREIRA FILHO, J. B.; ATENCIO, D.; McREATH, I. Minerais e rochas: constituintes da terra sólida. In: TEIXEIRA, W.; TOLEDO, M. C. M.; FAIRCHILD, T. R.; TAIOLI, F. (org.) **Decifrando a Terra**. São Paulo: Oficina de Textos, p. 27-42, 2000.

MAIA, S. E. **Pelotização e redução de concentrado magnetítico**. 2011. 140f. Tese (Doutorado em Engenharia de Materiais e de Processos Químicos e Metalúrgicos) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2011.

MORAIS, C. A.; ALBUQUERQUE, R. O.; LADEIRA, A. C. Q. Processos Físicos e Químicos Utilizados na Indústria Mineral. **Cad Temáticos Química Nov na Esc**, v. 8, p. 9-17, 2014.

MURA, J.; GAMA, F.; PARADELLA, W.; NEGRÃO, P.; CARNEIRO, S.; OLIVEIRA, C.; BRANDÃO, W. Monitoring the vulnerability of the dam and dikes in Germano iron mining area after the collapse of the tailings dam of Fundão (Mariana-MG, Brazil) using DInSAR techniques with TerraSAR-X data. **Remote Sensing**, v. 10, n. 10, p. 1507, 2018.

NASCIMENTO, H. N. (2014). Caracterização tecnológica de materiais estéreis com elevado teor de PPC e P da Mina de Alegria da SAMARCO MINERAÇÃO S.A. 106 f. Universidade Federal de Minas Gerais, Minas Gerais.

NEVES, J. C.; MOHALLEM, N. D. S.; VIANA, M. M. Materiais autolimpantes: conceitos, propriedades e aplicações. **Rev. Virtual de Química**, v. 13, n. 2, 2021.

OLIVEIRA, G. Determinação experimental e modelagem termodinâmica da solubilidade do ácido esteárico e cloreto de colina em álcoois anidros e hidratados. 2018. 89f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Alimentos) - Universidade Federal do Paraná, 2018.

OLIVEIRA, V. C.; OLIVEIRA, D. C. A semântica do eufemismo: mineração e tragédia em Brumadinho. **Revista Eletrônica de Comunicação, Informação e Inovação em Saúde**, v. 13, n. 1, 2019.

PÁEZ, B. C. M. D., DIAS, M. D. S., SEVERIANO, E. D. C., CARNEIRO, M. A. C., MARTINS, P. C. C. Limiting physical properties of Technosols formed by the Fundão dam failure, Minas Gerais, Brazil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 48, p. e0230021, 2024.

PICCOLO, A.; MBAGWU, J. S. C. Effects of different organic waste amendments on soil microaggregates stability and molecular sizes of humic substances. **Plant and soil**, v. 123, n. 1, p. 27-37, 1990.

PICCOLO, A.; MBAGWU, J. S. C. Role of hydrophobic components of soil organic matter in soil aggregate stability. **Soil Science Society of America Journal**, v. 63, n. 6, p. 1801-1810, 1999.

PIRES A. P.; REZENDE, C. L.; ASSAD, E. D.; LOYOLA, R.; SCARANO, F. R. 2017. Forest restoration can increase the Rio Doce watershed resilience. **Perspectives in ecology and conservation**, v. 15, n. 3, p. 187-193, 2017.

PIRES, J. M. M.; LENA, J. C.; MACHADO, C. C.; PEREIRA, R. S. Potencial poluidor de resíduo sólido da Samarco Mineração: estudo de caso da barragem de Germano. **Revista Árvore**, v. 27, p. 393-397, 2003.

PREVEDELLO J.; VOGELMANN, E.S.; KAISER, D. R.; FONTANELA, E.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M. Agregação e matéria orgânica de um Argissolo sob diferentes preparos do solo para plantio de Eucalipto. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 34, p. 149-58, 2014.

PRONK, G. J.; Heister, K.; Ding, G. C.; Smalla, K.; Kögel-Knabner, I. Development of biogeochemical interfaces in an artificial soil incubation experiment; aggregation and formation of organo-mineral associations. **Geoderma**, v. 189, p. 585-594, 2012.

QUADRA, G. R.; ROLAND, F.; BARROS, N.; MALM, O.; LINO, A. S.; AZEVEDO, G. M.; THOMAZ, J. R.; ANDRADE-VIEIRA, L. F.; PRAÇA-FONTES, M. M.; ALMEIDA, R. M.; MENDONÇA, R. F.; CARDOSO, S. J.; GUIDA, Y. S.; CAMPOS, J. M. S. Far-reaching cytogenotoxic effects of mine waste from the Fundão dam disaster in Brazil. **Chemosphere**, v. 215, p. 753-757, 2019.

REICHERT, J. M.; REINERT, D. J.; SUZUKI, L. E. A. S.; HORN, R. Mecânica do solo. In: QUIRIJN DE JONG VAN LIER (Ed.). **Física do solo**. 1ª Edição ed., Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, p. 30-102, 2010.

REZENDE, V.A. **Estudo do comportamento de barragem de rejeito arenoso alteada por montante**. Ouro Preto, 2013. 181 F. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto.

RUSSO, F. M. Comportamento de barragens de rejeito construídas por aterro hidráulico: caracterização laboratorial e simulação numérica do processo construtivo. 2007. 295p. Tese (Doutorado em Geotecnia) – Universidade de Federal de Brasília, Brasília,

SÁ JÚNIOR, A. Aplicação da classificação de Köppen para o zoneamento climático do estado de Minas Gerais. 2009. 101 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola/Engenharia de Água e Solo)–Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2009.

SAGIRI, S. S.; SINGH, V. K.; PAL, K.; BANERJEE, I.; BASAKP. Stearic acid based oleogels: A study on the molecular, thermal and mechanical properties. *Materials Science and Engineering*, v. 48, p. 688-699, 2015.

SAMARCO. Atualização do Plano de Recuperação Ambiental Integrado, 2016.
SAMARCO. Da mina ao porto. Disponível em: <<https://www.samarco.com/da-mina-ao-porto/>>. Acesso em: 10 jan. 2022.

SANTANA, P. P., 2012, Flotação direta de minério de ferro itabirítico. Dissertação de M.Sc., UFMG, Belo Horizonte, MG, Brasil.

SANTINI, T., FEY, M. Assessment of Technosol formation and in situ remediation in capped alkaline tailings. **Catena**, v. 136, p. 17-29, 2016.

SCALENGHE R., FERRARIS, S. The first forty years of a Technosol. **Pedosphere**, v. 19, n. 1, p. 40-52, 2009.

SCHAFER, C. E. G. R.; SANTOS, E. E.; FERNANDES FILHO, E. I.; ASSIS, I. R. *Paisagens de lama: os tecnossolos para recuperação ambiental de áreas afetadas pelo desastre da barragem ambiental, em Mariana*. Boletim Informativo da SBCS, 42(1):18-23, 2016.

SECRETARIA DE ESTADO DE MEIO AMBIENTE E DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL. **PARECER ÚNICO Nº. PROTOCOLO (SIAM)**. 2013. Disponível em: <http://www.meioambiente.mg.gov.br/images/stories/URCS_SupramCentral/RioVelhas/83/6.1samarcomineracao.pdf>. Acesso: 03 mar. 2022.

SEVERIANO, E. D. C.; OLIVEIRA, G. C. D.; DIAS JÚNIOR, M. D. S.; COSTA, K. A. D. P.; BENITES, V. D. M.; FERREIRA FILHO, S. M. Structural changes in Latosols of the cerrado region: II-soil compressive behavior and modeling of additional compaction. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, p. 783-791, 2011.

SILVA, R. K. A. Co-disposição e disposição compartilhada de rejeitos e estéreis em cava. Dissertação de Mestrado em Engenharia Geotécnica, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG, 2014.

SILVA, A. C.; CAVALCANTI, L. C. D.; FABRIS, J. D.; FRANCO JUNIOR, R. BARRAL, U. M.; FARNEZI, M. M. M.; VIANA, A. J. S; FERNANDEZ-OUTON, L. E.; LARA, L. R. S.; STUMPF, H. O.; BARBOSA, J. B. S; SILVA, L. C. Chemical, mineralogical and physical characteristics of a material accumulated on the river margin from mud flowing from the collapse of the iron ore tailings dam in Bento Rodrigues, Minas Gerais, Brazil. **Revista Espinhaço| UFVJM**, p. 44-53, 2017.

SILVA, A. O.; GUIMARÃES, A. A.; LOPEZ, B. D. O.; ZANCHI, C. S.; VEGA, C. F. P.; BATISTA, É. R.; MOREIRA, F. M.; SOUZA, R. F. C.; PINTO, F. A.; SANTOS, J. V.; CARNEIRO, J. J.; SIQUEIRA, J. O.; KEMMELMEIER, K.; GUILHERME, L. R. G.; RUFINI, M.; DIAS JUNIOR, M. S.; ARAGÃO, O. O. S. BORGES, P. H. C.; OLIVEIRA-LONGATTI, S. M.; CARNEIRO, M. A. C. Chemical, physical, and biological attributes in soils affected by deposition of iron ore tailings from the Fundão Dam failure. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 193, n. 8, p. 1-18, 2021.

SILVA, G. P; FONTES, M. P. F.; COSTA, L. M.; BARROS, N. F. Caracterização química, física e mineralógica de estéreis e rejeito da mineração de ferro da Mina de Alegria, Mariana-MG. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 36, n. 1, 2006.

SILVA, R. K. A. **Co-disposição e disposição compartilhada de rejeitos e estéreis em cava exaurida**. 2014. 158f. Dissertação (Mestrado Profissional em Engenharia Geotécnica) - Universidade Federal de Ouro Preto, 2014.

SIX, J.; BOSSUYT, H.; DEGRYZE, S.; DENEFF, K. A history of research on the link between (micro) aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics. **Soil and tillage research**, v. 79, n. 1, p. 7-31, 2004.

SNEDECOR, G.W.; COCHRAN, W.G. **Statistical Methods**. 8. ed. Ames: Iowa State University Press, 1989. 503p.

STRAHLER AN. The Koppen climate classification system. In: (Ed.). *Physical geography*. 2nd ed. New York: John Wiley. 1963. p.185-188.

TAIOLI, F.A Terra, a humanidade e o desenvolvimento sustentável. In: TEIXEIRA, W.;

TOLEDO, M. C. M.; FAIRCHILD, T. R.; TAIOLI, F. (org.) **Decifrando a Terra**. São Paulo: Oficina de Textos, p. 517-528, 2000.

TASSINARI, D.; ANDRADE, M. L. C.; DIAS JUNIOR, M. S.; MARTINS, R. P.; ROCHA, W. W.; PAIS, P. S. A. M.; SOUZA, Z. R. Soil compaction caused by harvesting, skidding and wood processing in eucalyptus forests on coarse-textured tropical soils. **Soil Use and Management**, v. 35, n. 3, p. 400-411, 2019.

TASSINARI, D.; DIAS JUNIOR, M. S. D., CASAGRANDE, D. R.; PAIS, P. S. A. M.; SOUZA, Z. R. Short term changes on soil physical quality after different pasture renovation methods on a clayey oxidic Red Latosol. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 10, n. 4, p. 485-491, 2015.

TAYLOR, D.W. **Fundamentals of soil mechanics**. New York: John Wiley & Sons, 1948. 700p.

TEIXEIRA, P. C. et al. (eds). **Manual de Métodos de Análise de Solo**. 3. ed., rev. e amp. Brasília: Embrapa, 2017.

TEIXEIRA, W.; FAIRCHILD, T. R.; TOLEDO, M. C. M. D.; TAIOLI, F. **Decifrando a terra**. São Paulo: Oficina de Textos, 2000. 568 p.

TISDALL, J. M.; OADES, J. M. Organic matter and water-stable aggregates in soils. *Journal of soil science*, v. 33, n. 2, p. 141-163, 1982.

TOLEDO, M. C.M.; OLIVEIRA, S. M.; MELFI, A. J. Intemperismo e formação do solo. In: TEIXEIRA, W.; TOLEDO, M. C. M.; FAIRCHILD, T. R.; TAIOLI, F. (org.) **Decifrando a Terra**. São Paulo: Oficina de Textos, p. 139-166, 2000.

TRINDADE, A. V.; GRAZZIOTTI, P. H.; TÓTOLA, M. R. Utilização de características microbiológicas na avaliação da degradação ou recuperação de uma área sob mineração de ferro. **Revista brasileira de ciência do solo**, v. 24, n. 3, p. 683-688, 2000.

VALERIANO, C.M., NEUMANN, R., ALKMIM, A.R., EVANGELISTA, H., HEILBRON, M., AGUIAR NETO, C.C., DE SOUZA, G.P. Sm–Nd and Sr isotope fingerprinting of iron mining tailing deposits spilled from the failed SAMARCO Fundão dam 2015 accident at Mariana, SE-Brazil. **Applied Geochemistry**, v. 106, p. 34-44, 2019.

VIANNI, R.; BRAZ-FILHO, R. Acmos GRAXOS NATURAIS: IMPORTANCIA E OCORRENCIA EM ALIMENTOS. **Química nova**, v. 19, p. 4, 1996.

ZISMAN, W.A. 1964. Relation of equilibrium contact angle to liquid and solid constitution. In: Contact Angle, Wettability, and Adhesion (ed. R.F. Gould), pp. 1–51. Advances in Chemistry Series 34, American Chemical Society, Washington, DC.

SEGUNDA PARTE – ARTIGOS

Artigo 1

Elaborado de acordo com as normas da Revista Brasileira de Ciência do Solo.

Efeito da aplicação de compostos orgânicos hidrofóbico e hidrofílico na estruturação e capacidade de suporte de carga de Tecnossolos

Josiane da Conceição Almeida^{(1)*}, Moacir de Souza Dias Júnior⁽¹⁾, Renato Saldanha Bastos⁽²⁾

⁽¹⁾ Universidade Federal de Lavras, Departamento de Ciência do Solo, Lavras, Minas Gerais, Brasil.

⁽²⁾ Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Sul de Minas, Campus Três Corações, Três Corações, Minas Gerais, Brasil.

***Autor correspondente**

E-mail: josianealmeidaufv@gmail.com tel:

Agradecimentos: Departamento de Ciência do Solo; Universidade Federal de Lavras; CAPES

DESTAQUES

Compostos orgânicos auxiliam na estruturação de Tecnossolos.

Compostos orgânicos perdem sua ação de estruturação com o passar do tempo em Tecnossolos.

O composto orgânico hidrofóbico tem efeito semelhante ao hidrofílico em menor tempo e dose.

O composto orgânico hidrofílico pode atuar como um modulador da capacidade de suporte de carga em Tecnossolos.

RESUMO: Após o rompimento da barragem de mineração de ferro de Fundão, Mariana, Minas Gerais, Brasil, formou-se um Tecnossolo, que possui diversas restrições de uso, dentre elas a falta de estruturação. Compostos orgânicos da matéria orgânica contribuem para a estruturação de solos e estes compostos podem apresentar diferentes graus de hidrofobicidade. Através da medida da pressão de pré-consolidação, se obtém a máxima pressão que o solo consegue suportar sem a perda de suas propriedades estruturais. O objetivo do nosso trabalho foi avaliar o efeito da aplicação de compostos orgânicos, com diferentes hidrofobicidades, na estruturação do Tecnossolo de Mariana. O experimento seguiu esquema fatorial $3 \times 2 \times 4 \times 3$, sendo três tempos de incubação (180, 365 e 547 dias); dois compostos orgânicos (ácido esteárico e amido); quatro doses [0,0 (controle); 2,5; 5,0 e 10,0 g kg⁻¹] e três tensões iniciais de capacidade de suporte de carga (-10, -100 e -1.500 kPa). O delineamento adotado foi em blocos casualizados, com três repetições. O experimento foi conduzido utilizando cilindros volumétricos preenchidos com Tecnossolo incorporados com compostos orgânicos de diferentes hidrofobicidades, sendo o ácido esteárico o composto hidrofóbico, e o amido o composto hidrofílico. Esses cilindros com Tecnossolo umedecidos até atingir a capacidade de campo estimada foram alocados em bandejas vedadas e mantidos em casa de vegetação. Após os períodos de incubação, as amostras foram saturadas e submetidas a testes de compressão uniaxial em diferentes tensões hídricas iniciais (-10, -100 e -1.500 kPa). Após os testes, foram determinadas a pressão de pré-consolidação e os modelos de capacidade de suporte de carga (CSC) das amostras. Além disso, foram determinadas a porosidade total (Pt), macroporosidade (Ma) e microporosidade (Mi). Os resultados mostram que os compostos orgânicos não apresentaram influência sobre a Pt, Ma e Mi do Tecnossolo. Os compostos têm efeito na

estruturação do Tecnossolo, aos 180 dias, evidenciado pelo aumento da CSC. É possível alcançar com dose baixa ($2,5 \text{ g kg}^{-1}$) do composto hidrofóbico, o aumento da CSC do Tecnossolo, com efeito semelhante à aplicação do composto hidrofílico em uma dose mais alta (10 g kg^{-1}). Aos 365 dias, o composto hidrofílico tem efeito na estruturação do Tecnossolo, funcionando como um modulador da CSC em relação à umidade do solo. No entanto, em períodos superiores a 365 dias os compostos orgânicos não apresentam efeito no aumento da CSC do Tecnossolo. Dessa forma, conclui-se que a aplicação do composto hidrofóbico em menor dose pode auxiliar na estruturação do Tecnossolo.

Palavras-chave: pressão de pré-consolidação, hidrofobicidade, porosidade, estruturação

1. INTRODUÇÃO

A mineração de ferro corresponde a cerca de 80% das principais substâncias metálicas produzidas no Brasil, de acordo com a Agência Nacional de Mineração (ANM) (ANM, 2022). O estado de Minas Gerais é segundo maior produtor de minério de ferro do país (ANM, 2022). Apesar de sua importância econômica, essa atividade também pode causar degradação ambiental. Em 2015 e em 2019, Minas Gerais sofreu com dois desastres ambientais, o rompimento das barragens de mineração de ferro de Fundão (Mariana, MG) e a de Córrego do Feijão (Brumadinho, MG), respectivamente. Com rompimento da barragem de Fundão, a lama de rejeitos percorreu mais de 600 km até atingir o mar, afetando o Rio Doce na sua extensão de Minas Gerais até o estado do Espírito Santo (Ibama, 2015; Carmo et al., 2017; Hatje et al., 2017; Armstrong et al., 2019; Quadra et al., 2019; Borges et al., 2024) e foi considerado o maior desastre ambiental do mundo (Almeida et al., 2018).

Os rejeitos possuem composição mineralógica mais simples que a do solo existente (Borges et al., 2023), predominando quartzo (SiO_2) e hematita (Fe_2O_3) (Silva et al., 2016; Santos et al., 2019; Borges et al., 2023), comuns no minério de ferro (Borges et al., 2023). A deposição do rejeito deu origem a um novo solo, classificado pela World Reference Base for Soil Resources (WRB-FAO) como Tecnossolo (IUSS Working Group WRB, 2006). Estes, quando originados de rejeito de mineração de ferro, geralmente possuem pH alcalino, baixa disponibilidade de nutrientes, baixa CTC, altas concentrações de ferro e de sódio (Santini e Fey, 2016; Silva et al., 2016; Santos et al., 2019; Batista et al., 2020; Silva et al., 2022; Borges et al., 2023), esta última devido a adição de hidróxido de sódio no processo de flotação (separação do minério) (Pires et al., 2003). São compostos principalmente por areia e silte, e em menor quantidade, argila (Silva et al., 2016; Almeida et al., 2018; Batista et al., 2020; Páez et al., 2024). Possuem alta densidade (Batista et al., 2020; Zanchi et al., 2022; Borges et al., 2024; Páez et al., 2024),

baixa porosidade (Zanchi et al., 2021; Zanchi et al., 2022; Borges et al., 2024) e pouca estruturação. Páez et al. (2024) ressaltam que a principal limitação deste tipo de solo é sua alta resistência, sendo necessário adotar diversas práticas de manejo combinadas para melhorar as propriedades físicas e multifuncionalidade completa.

Os agregados do solo são formados ao se agrupar as partículas minerais do solo com a matéria orgânica (Bucka et al., 2019). A matéria orgânica é considerada uma mistura complexa de substâncias orgânicas, que contém o elemento carbono (Brady e Weil, 2013) e sua presença no solo melhora as propriedades químicas, biológicas e físicas (Fageria, 2012; Brady e Weil, 2013). Silva et al. (2004) observaram que a presença de matéria orgânica, combinada com o emaranhamento radicular, o modelo de agregação do solo junto, as ligações físicas e químicas entre suas partículas em ambientes nativos, desempenha um papel importante na agregação do solo, contribuindo para o aumento de sua resistência mecânica. A adoção de práticas que aumentem a matéria orgânica no solo pode contribuir para formação de agregados no Tecnossolo (Borges et al., 2023).

As substâncias orgânicas podem repelir a água quando adicionadas a determinados solos, melhorando a estabilidade de agregados (Bastos et al., 2005b). Essa repelência, é explicada pela hidrofobicidade que está relacionada à “molhabilidade” da partícula pela água, sendo que as partículas hidrofílicas possuem afinidade pela água e as hidrofóbicas não (Mapa, 2006). O amido e o ácido esteárico são exemplos de compostos orgânicos com caráter hidrofílico e hidrofóbico, respectivamente (Bastos et al., 2005a,b). Solos tratados com compostos orgânicos hidrofóbicos apresentam melhor estruturação de agregados do que os tratados com compostos hidrofílicos (Bastos et al., 2005b).

A ação cimentante da matéria orgânica no Tecnossolo, pode contribuir para sua agregação, porosidade e estabelecimento de plantas, reduzindo os processos erosivos (Borges et al., 2023). Sabendo da importância dos compostos orgânicos na estruturação de solos e levando em consideração a dificuldade de recuperação dos Tecnossolos devido a sua pouca estruturação, faz-se necessário mais investigações sobre esse assunto. A estruturação do solo tem reflexo na sua capacidade de suporte de carga (CSC) (Severiano et al., 2008). Contudo, ainda são escassas informações sobre o efeito de compostos orgânicos, estruturação e CSC em Tecnossolo. A pressão de pré-consolidação é a máxima pressão que pode ser aplicada ao solo sem que ocorra a degradação da estrutura (Dias Junior, 1994; Dias Junior et al., 2002) e é considerada uma ferramenta para identificar a degradação estrutural em solos (Iori et al, 2012). Utilizando os

valores de pressão de pré-consolidação e de umidade, Dias Junior (1994) desenvolveu um modelo de capacidade de suporte de carga (Dias Junior et al., 2019). Pela sensibilidade da pressão de pré-consolidação em relação a pressões aplicadas ao solo, o modelo de CSC pode ser uma ferramenta para indicar a possível estruturação no Tecnossolo tratado com compostos orgânicos.

O objetivo deste trabalho foi avaliar o efeito de compostos orgânicos com distintos graus de hidrofobicidades e em diferente doses, sobre estruturação do Tecnossolo de Mariana (MG), através da determinação da CSC. Nossa hipótese é que a adição dos compostos orgânicos pode auxiliar na estruturação do Tecnossolo, aumentando a sua CSC.

2. MATERIAL E MÉTODOS

O solo utilizado no estudo foi o Tecnossolo, formado cinco anos após o rompimento da barragem de Fundão, em Mariana (20° 17' 47.86" S/43° 12' 19.88" W), localizada no Quadrilátero ferrífero, em Minas Gerais, região Sudeste, Brasil. O Tecnossolo foi coletado até um metro de profundidade e transportado para o Departamento de Ciência do Solo da Universidade Federal de Lavras, Lavras (MG). Após seco ao ar, o Tecnossolo foi peneirado em malha de 2 mm. Uma amostra foi enviada ao Laboratórios de Fertilidade do solo para caracterização química e outra encaminhada ao laboratório de Física do Solo para caracterização física (tabela 1). Neste, foi obtida a densidade do solo (Almeida et al., 2017) e realizadas as análises textural pelo método de Bouyocous (Donagemma et al, 2017), densidade de partículas pelo método do Balão volumétrico (Viana et al., 2017).

Tabela 1. Caracterização química e física do Tecnossolo de Mariana (MG), cinco anos após o rompimento da barragem de Fundão.

pH	P	K	Na	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Al ³⁺	H + Al	SB	t	T	V	m
H ₂ O	-----	mg dm ⁻³ -----					cmolc dm ⁻³ -----				---%---	
7	4,89	18,07	11	1,37	0,1	0	0,8	1,52	1,52	2,32	65,4	0
P-Rem	m.o.	Zn	Fe	Mn	Cu	B	S	Areia	Silte	Argila	Dp	Ds
mg L ⁻¹	dag kg ⁻¹	-----			mg dm ⁻³ -----			-----	%-----		---g cm ⁻³ ---	
54,5	0,62	0,4	88	127,3	1,14	0,08	9,7	75	18	7	2,72	1,81

pH em água, KCl e CaCl₂ - Relação 1:2,5;. SB: soma de bases trocáveis. t: capacidade de troca catiônica efetiva. T: capacidade de troca catiônica a pH 7,0. H + Al: Extrator: SMP. m: índice de saturação de alumínio. P-Rem: fósforo remanescente. m.o.: matéria orgânica. Dp: densidade de partículas. Ds: densidade do solo.

O experimento seguiu esquema fatorial $3 \times 2 \times 4 \times 3$, sendo três tempos de incubação (180, 365 e 547 dias); dois compostos orgânicos (ácido esteárico e amido); quatro doses dos compostos orgânicos [0,0 (controle); 2,5; 5,0 e 10,0 g kg⁻¹]; três tensões iniciais (Ψ) para o teste de compressão uniaxial (-10, -100 e -1.500 kPa). O delineamento experimental utilizado foi em blocos casualizados, com três repetições, totalizando 216 unidades amostrais.

As unidades amostrais foram constituídas de cilindros volumétricos de metal (2,5 cm de altura e 6,3 cm de diâmetro) com o fundo coberto com tecido (tipo *failet*) fixado à parte externa do cilindro com elásticos. O conjunto cilindro, elástico e pano foram previamente identificados e tomadas as medidas peso, altura diâmetro interno do cilindro, peso do tecido e do elástico. Os cilindros foram preenchidos de forma a ocupar todo seu volume com o Tecnosolo incorporado com os composto orgânicos orgânicos. O amido solúvel PA ACS (C₆H₁₂O₆ com ligações α 1-4) (Am) foi utilizado como o composto orgânico de caráter hidrofílico, enquanto o ácido esteárico PA (ácido octadecanóico - CH₃(CH₂)₁₆COOH) puro (AE) foi empregado como o composto orgânico de caráter hidrofóbico, ambos nas doses 0,0 (controle), 2,5, 5,0 e 10,0 g kg⁻¹.

Realizada a incorporação, os cilindros foram preenchidos de forma a ocupar todo o seu volume e transferidos para as bandejas plásticas de dimensões 43,5 x 28,5 x 8 cm (comprimento x largura x altura, respectivamente). As amostras foram umedecidas por capilaridade com água destilada até a capacidade de campo (-10 kPa de potencial matricial), levadas à casa de vegetação e vedadas.

Após cada período de incubação (180, 365 e 547 dias), as amostras foram levadas ao laboratório de Física do Solo e saturadas com água destilada, por no mínimo 24 horas. Posteriormente, foram submetidas à três tensões -10, -100 e -1.500 kPa, utilizando-se a mesa de tensão para as amostras à -10 kPa e a câmara de Richards para as tensões -100 e -1.500 kPa. A estabilização das amostras variou entre 1 a 12 dias, e estas foram pesadas e levadas ao ensaio de compressão uniaxial.

Para os ensaios de compressão uniaxial, as amostras foram previamente pesadas. Nos consolidômetros de ar comprimido (Terraload S-450, Durham GeoSlope®), foram aplicadas às

amostras pressões de 25, 50, 100, 200, 400, 800 e 1.600 kPa em sequência e sem descompressão (Dias Júnior e Martins, 2017), até atingir 90% da deformação máxima (Taylor, 1948).

Após os testes de compressão uniaxial as amostras foram secas em estufas a 105 °C por 48 h, obtendo a massa de solo seca. Para a determinação das pressões de pré-consolidação foi utilizado o procedimento de Dias Junior e Pierce (1995). Os valores de pressão de pré-consolidação e tensão foram ajustados utilizando o software Sigma Plot 14 para obtenção do modelo de capacidade de suporte de carga.

A homogeneidade das variâncias foi testada pelo procedimento Snedecor e Cochran (1989) para modelos lineares ($\log \sigma_p = a + b\theta$). A homogeneidade e os coeficientes lineares (a) e angulares (b) foram comparados pelo teste F contido dentro deste procedimento. Quando os modelos foram homogêneos e os coeficientes lineares (a) e angulares (b) não foram significativamente diferentes pelo teste F, os valores das pressões de pré-consolidação e tensão de ambos os modelos foram combinados, uma nova equação foi ajustada a esses valores, indicando que os tratamentos possuem a mesma capacidade de suporte de carga (Dias Junior et al., 2019). Quando os coeficientes lineares e/ou angulares foram significativamente diferentes pelo teste F, os valores das pressões de pré-consolidação e tensão foram mantidos em modelos separados, indicando que os tratamentos possuem efeito sobre a capacidade de suporte de carga (Dias Junior et al., 2019).

Adicionalmente, foi determinada a porosidade total (Pt) pela equação $Pt = 1 - Ds/Dp$ (Almeida et al., 2017), sendo Ds a densidade do solo e Dp a densidade de partículas (Viana et al., 2017). A microporosidade foi obtida pela equação $Mi = (ma - ms / vt)$, sendo ma correspondente a massa de solo seco mais água a 6 kPa e vt o volume da amostra. Pela diferença entre a Pt e a Mi, foi possível encontrar a macroporosidade (Ma) (Almeida et al., 2017). Foi realizada a análise de variância e o teste de Dunnett para comparar os tratamentos com o controle.

3. RESULTADOS

Em relação à porosidade total, macroporosidade e microporosidade, o Teste de Dunnett indicou que todos os tratamentos (amido e ácido esteárico) não diferiram do controle (Figura 1). A ANOVA indicou que todas as doses não influenciaram na porosidade total, da macroporosidade e microporosidade, no entanto, a média do Tecnossolo tratado com o amido (53%, 20%, 33%,

respectivamente) foi maior que a do ácido esteárico (44%, 17%, 27%, respectivamente). A quantidade de microporos foi superior a quantidade de macroporos no Tecnossolo.

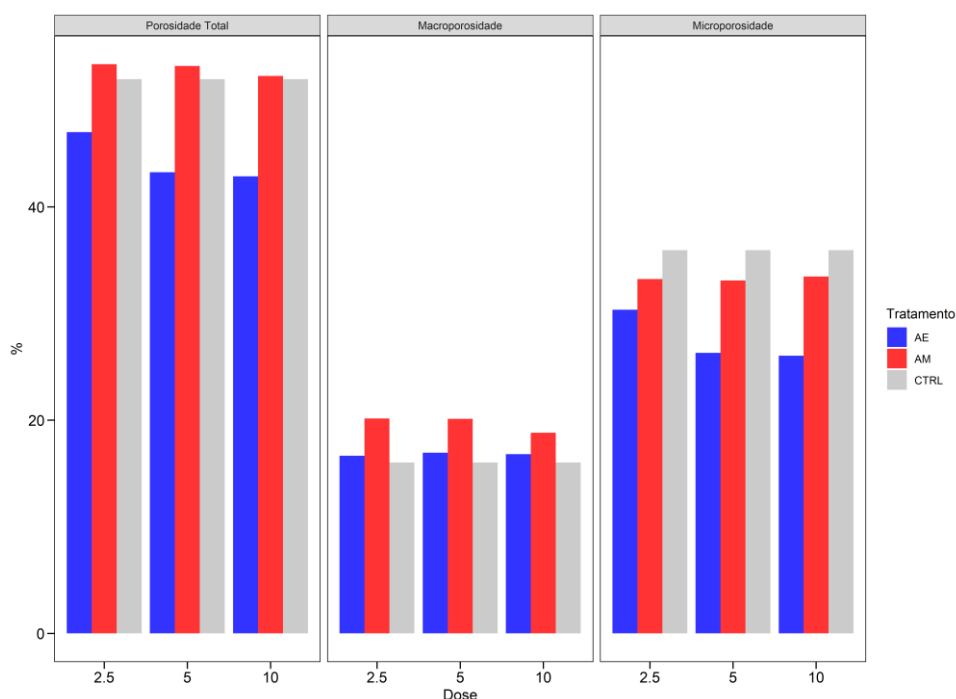


Figura - 1: Pt, Ma e Mi das amostras de Tecnossolo de Mariana (MG), tratado com os compostos orgânicos hidrofílico e hidrofóbico, nas doses [0 (controle); 2,5; 5,0; 10,0 g kg⁻¹], aos 365 dias de incubação. Ctrl (controle); AE (ácido esteárico); Am (amido).

O resumo da análise estatística dos modelos de capacidade de suporte de carga (CSC) ($\sigma_p = a + b\psi$) pelo Procedimento Snedecor e Cochran (1989), estão descritos na tabela 2.

Aos 180 dias, os contrastes CtrlxAE_2,5; CtrlxAE_5,0; CtrlxAm_10,0 tiveram efeito significativo, logo, foram mantidos em modelos separados, conforme a tabela 1, figura 2. Os demais contrastes (CtrlxAE_10,0; CtrlxAm_2,5; CtrlxAm_5,0) não tiveram efeito significativo, assim, os dados foram agrupados e um novo modelo foi ajustado.

Aos 365 dias somente o contraste CtrlxAm_10,0 teve efeito significativo, então, foram mantidos em modelos separados (tabela 1, figura 3). Os demais contrastes (CtrlxAE_2,5; CtrlxAE_5,0; CtrlxAE_10,0; CtrlxAm_2,5; CtrlxAm_5,0) não tiveram efeito significativo, portanto, os dados foram agrupados e um novo modelo foi ajustado.

Aos 547 dias somente o contraste CtrlxAm_5 apresentou efeito significativo, portanto foi mantido em modelo separado (tabela 1, figura 4). Os demais contrastes (CtrlxAE_2,5; CtrlxAE_5,0; CtrlxAE_10,0; CtrlxAm_2,5; CtrlxAm_10,0) foram não significativos, logo, agrupados em um único modelo.

Tabela 2. Comparação dos modelos de capacidade de suporte de carga ($\sigma_p = a + b\psi$) do Tecnossolo de Mariana (MG), para diferentes doses dos compostos orgânicos e diferentes períodos de incubação, pelo procedimento Snedecor e Cochran (1989).

Tempo (dias)	Contrastes dos tratamentos			F	F		Decisão
					Coeficiente linear (a)	Coeficiente angular (b)	
180	Ctrl	x	AE_2,5	H	**	ns	Não agrupar
	Ctrl	x	AE_5,0	H	ns	*	Não agrupar
	Ctrl	x	AE_10,0	H	ns	ns	Agrupar
	Ctrl	x	Am_2,5	H	ns	ns	Agrupar
	Ctrl	x	Am_5,0	H	ns	ns	Agrupar
	Ctrl	x	Am_10,0	H	*	ns	Não agrupar
	AE_2,5	x	Am_2,5	H	ns	ns	Agrupar
	AE_5,0	x	Am_5,0	H	*	ns	Não agrupar
	AE_10,0	x	Am_10,0	H	ns	ns	Agrupar
365	Ctrl	x	AE_2,5	H	ns	ns	Agrupar
	Ctrl	x	AE_5,0	H	ns	ns	Agrupar
	Ctrl	x	AE_10,0	H	ns	ns	Agrupar
	Ctrl	x	Am_2,5	H	ns	ns	Agrupar
	Ctrl	x	Am_5,0	H	ns	ns	Agrupar
	Ctrl	x	Am_10,0	H	*	ns	Não agrupar
	AE_2,5	x	Am_2,5	H	**	ns	Não agrupar
	AE_5,0	x	Am_5,0	H	ns	ns	Agrupar
	AE_10,0	x	Am_10,0	H	*	*	Não agrupar
547	Ctrl	x	AE_2,5	H	ns	ns	Agrupar
	Ctrl	x	AE_5,0	H	ns	ns	Agrupar
	Ctrl	x	AE_10,0	H	ns	ns	Agrupar
	Ctrl	x	Am_2,5	H	ns	ns	Agrupar
	Ctrl	x	Am_5,0	H	ns	*	Não agrupar
	Ctrl	x	Am_10,0	H	ns	ns	Agrupar
	AE_2,5	x	Am_2,5	H	*	ns	Não agrupar
	AE_5,0	x	Am_5,0	H	ns	ns	Agrupar
	AE_10,0	x	Am_10,0	H	ns	ns	Agrupar

Tratamentos: Ctrl (controle); AE (ácido esteárico); Am (amido); doses do composto orgânico (2,5; 5,0 ;10,0 g kg⁻¹). F: teste F para homogeneidade de variância e coeficientes ajustados; H: homogêneo; *: significativo a 5%; **: significativo a 1%; ns: não significativo.

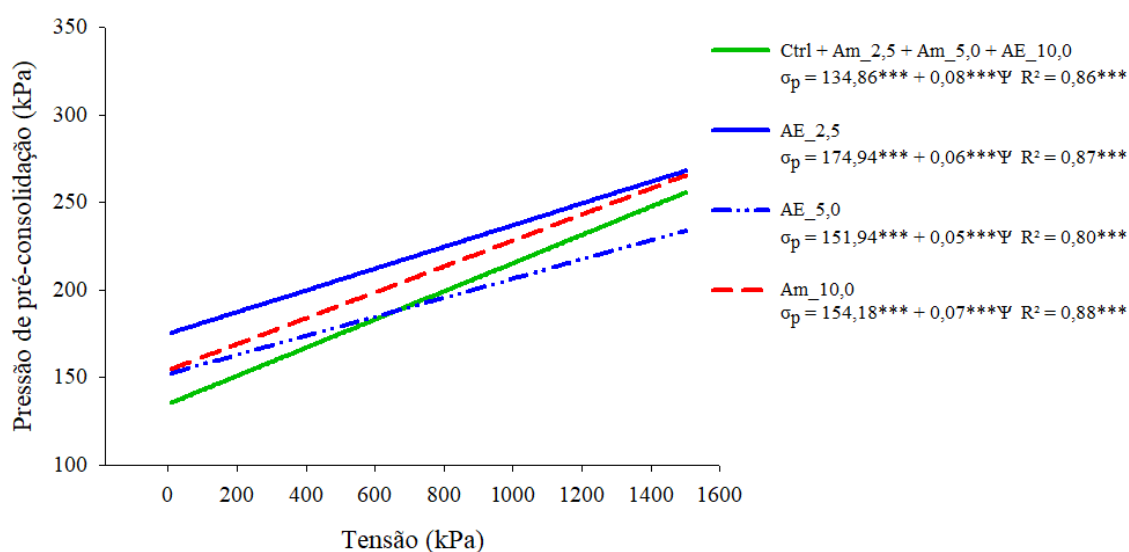


Figura - 2: Modelos de capacidade de suporte de carga do Tecnosolo formado cinco anos após rompimento da barragem de Fundão em Mariana (MG), tratado com os compostos orgânicos e 180 dias de incubação. Ctrl: controle. AE: ácido esteárico. Am: amido. 2,5; 5,0; 10,0 g kg⁻¹: doses do composto orgânico. Ψ : potencial matricial do solo. σ_p : pressão de pré-consolidação (kPa). ***: significativo ($p < 0,001$). R^2 : coeficiente de determinação

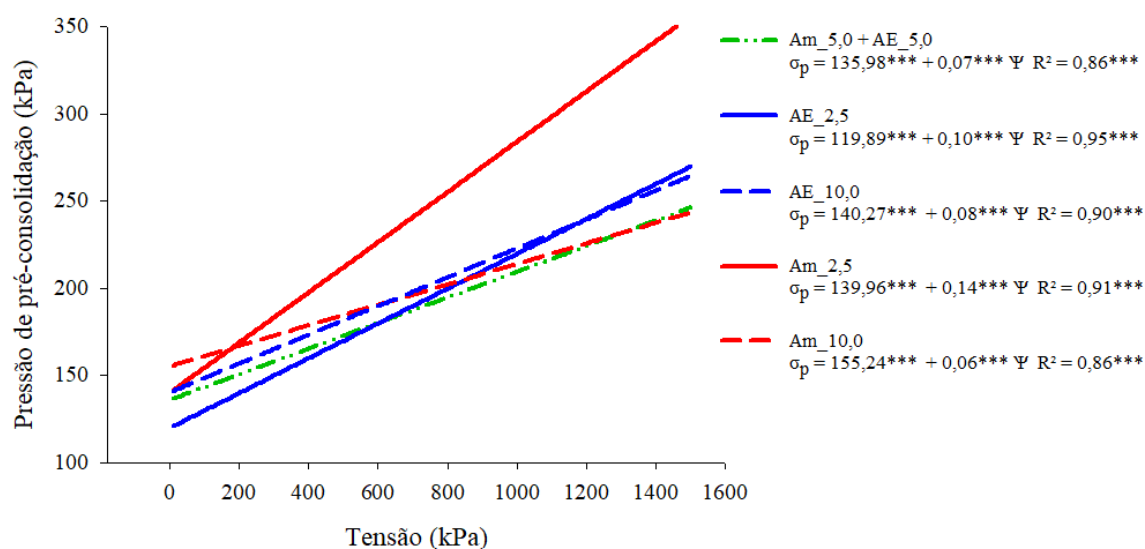


Figura - 3: Modelos de capacidade de suporte de carga do Tecnosolo formado cinco anos após rompimento da barragem de Fundão em Mariana (MG), tratado com os compostos orgânicos e 365 dias de incubação. AE: ácido esteárico. Am: amido. 2,5; 5,0; 10,0: doses do composto orgânico (g kg⁻¹). Ψ : tensão (kPa). σ_p : pressão de pré-consolidação (kPa). ***: significativo ($p < 0,001$). R^2 : coeficiente de determinação.

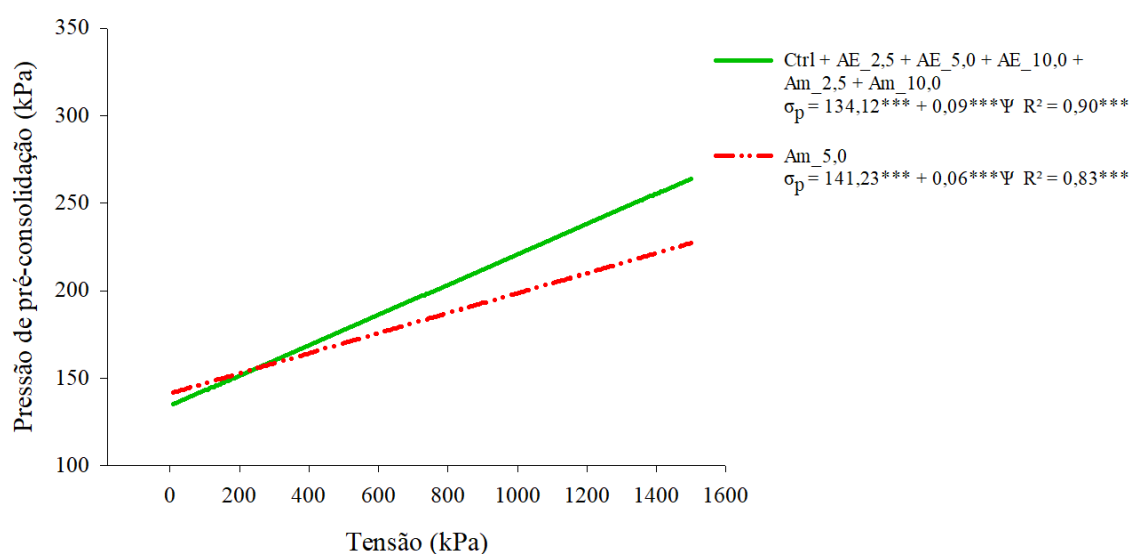


Figura - 4: Modelos de capacidade de suporte de carga do Tecnossolo formado cinco anos após rompimento da barragem de Fundão em Mariana (MG), tratado com os compostos orgânicos e 547 dias de incubação. AE: ácido esteárico. Am: amido. 2,5; 5,0; 10,0: doses do composto orgânico (g kg^{-1}). Ψ : tensão (kPa). σ_p : pressão de pré-consolidação (kPa). ***: significativo ($p < 0,001$). R^2 : coeficiente de determinação.

4. DISCUSSÃO

Em relação à porosidade total o fato de o amido apresentar maiores valores de porosidade total, macroporosidade e microporosidade, pode ser pelo seu caráter hidrofílico, que permite que a água penetre em todos os poros. Por outro lado, os valores inferiores das variáveis avaliadas para o ácido esteárico, podem ser explicadas pelo seu caráter hidrofóbico. Este composto orgânico possivelmente criou uma barreira de proteção ao agregado em formação, impedindo que a água preenchesse todos os poros do Tecnossolo. Severiano et al. (2013), ao estudarem os solos do Cerrado, constataram aumento na porosidade total do solo foi aumentada conforme houve aumento no teor de argila. Considerando a composição granulométrica do Tecnossolo (75% de areia e 18% silte e 7% de argila), pode-se inferir que há uma tendência do Tecnossolo, tenha menor porosidade total em relação a um solo nativo. Essa observação é corroborada por Paéz et al. (2024), que relataram menor porosidade total no Tecnossolo em relação aos solos originais. Esperava-se que solos com alta concentração de areia apresentassem maior quantidade de macroporos em relação à microporos (Reinert e Reichert, 2006). Contudo, essa tendência não foi observada no Tecnossolo. Uma possível explicação pode ser pela alta concentração de sódio neste tipo de solo. Este advém do processo de separação do minério de ferro, denominado flotação (Pires et al., 2023). De acordo com Zanchi et al. (2022), a alta concentração de sódio no rejeito aumenta a dispersão de partículas, reduz a porosidade,

agregação, além da capacidade de infiltração e a retenção de água. Além do mais, a alta concentração de areia e silte e baixa concentração de argila, resultaram em uma elevação na densidade solo e redução na porosidade total (Paéz et al., 2024). Silva et al. (2007), também observaram redução na macroporosidade em rejeitos, devido ao predomínio de areia fina.

Em relação à capacidade de suporte de carga (CSC), aos 180 dias, em condição de alta tensão (-1500 kPa), portanto, com menor umidade, o composto hidrofóbico em sua menor dose (2,5 g kg⁻¹) e o composto hidrofílico na sua maior dose (10,0 g kg⁻¹), tiveram efeito semelhante no aumento da CSC do Tecno solo (figura 2), com a CSC do composto hidrofóbico sendo superior. No Tecno solo submetido à menor tensão -10 kPa, e conseqüentemente com maior umidade, a CSC do Tecno solo tratado com o composto hidrofóbico foi superior àquele tratado com o composto hidrofílico. Isso sugere que o composto hidrofóbico (ácido esteárico) conferiu uma proteção aos agregados em formação.

Em solos fortemente hidrofóbicos, a matéria orgânica pode proporcionar aos agregados repelência parcial, contribuindo para sua estabilidade em água (Chenu et al., 2000). Dois mecanismos estão envolvidos neste processo: o primeiro, há um aumento da coesão dos agregados pela ligação entre partículas minerais e materiais orgânicos (Chenu et al., 2000) e o segundo, a matéria orgânica pode reduzir a entrada de água nos agregados e sua extensão de hidratação, aumentando sua resistência (Sullivan, 1990; Chenu et al., 2000).

Em solo úmido, os compostos orgânicos são fortemente hidrofílicos, entretanto, quando a umidade é reduzida, as partes hidrofílicas dos compostos se ligam fortemente para o interior do agregado, enquanto as partes hidrofóbicas ficam na face externa repelindo a água (Piccolo e Mbagwu, 1999; Hallett, 2007). De acordo com Bucka et al. (2019), ainda há muito conhecimento a ser explorado sobre a função dos diferentes tipos de matéria orgânica na agregação do solo. Estes mesmos pesquisadores, projetaram em laboratório um solo artificial de textura argilosa e observaram que a presença de matéria orgânica levou a formação de agregados em apenas 30 dias. Pronk et al. (2012) constataram em solos artificiais com pH próximo da neutralidade, formação de macroagregados em apenas três meses de incubação, tendo contribuição a presença de argila e de atividade microbiana.

Na figura 3, aos 365 dias de incubação, observa-se um aumento expressivo na CSC do Tecno solo tratado com o composto hidrofílico na dose 10,0 g kg⁻¹, apresentando valores de pressão de pré-consolidação de 141 kPa, em solo mais úmido (-10kPa) e 350 kPa, em solo com

menor umidade (-1500 kPa). Neste cenário, o composto hidrofílico na dose máxima (10,0 g kg⁻¹) funcionou como um modulador da CSC do Tecnossolo. Logo, em solos com maior umidade, o uso de compostos hidrofílicos ou hidrofóbicos resulta em uma redução da CSC do Tecnossolo. Em contraste, em solo com menor umidade, a aplicação do composto hidrofílico aumenta a CSC do Tecnossolo. Paéz et al. (2024), ao avaliar a pressão de pré-consolidação e a capacidade de suporte de carga do Tecnossolo de Mariana, utilizando amostras indeformadas, observaram valores de pressão de pré-consolidação em condições de maior e menor umidade semelhantes aos encontrados neste estudo, no qual as amostras foram construídas. Isso corrobora com nosso estudo. O fato de o solo com a estrutura preservada apresentar valores de capacidade de suporte de carga semelhantes aos observados em nosso solo (inicialmente desestruturado) indica que ele desenvolveu resistência. Logo, isto indica o início do processo de formação de estrutura.

Os resultados demonstram que em períodos de incubação superiores a 365 dias, os compostos orgânicos, tanto o hidrofóbico quanto o hidrofílico, tendem a perder seu efeito no aumento CSC do Tecnossolo. Isso pode ser observado na figura 4, em que, aos 547 dias de incubação, a aplicação do composto orgânicos hidrofóbico (em todas as doses) e do hidrofílico (2,5 e 10,0 g kg⁻¹) tiveram o mesmo efeito que o controle na CSC. Além disso, o composto hidrofílico na dose (5,0 g kg⁻¹), diminuiu a CSC do Tecnossolo quando estava com menor umidade (tensão de -1500 kPa). Logo, o composto hidrofílico diminuiu a resistência dos agregados em formação, funcionando como um modulador da CSC de acordo com a umidade.

Em um estudo feito por Pronk et al. (2012), em solo artificial (Tecnossolo), foi observado que após um ano de incubação, a macroagregação foi reduzida, possivelmente pela diminuição da matéria orgânica disponível no sistema ao passar o tempo de incubação. Segundo os autores, essa redução da macroagregação pode ser explicada pelo modelo de hierarquia de agregados. Neste modelo, os microagregados são formados dentro dos macroagregados de forma gradual e são mais estáveis, já os macroagregados sofrem declínio ao aumentar a decomposição da matéria orgânica no sistema e são menos estáveis (Pronk et al., 2012). Em nosso estudo, observamos que após 1 ano de incubação do Tecnossolo, os compostos orgânicos adicionados perderam o efeito, levando a uma menor resistência do agregado em formação, indicado pelo aumento da CSC.

Bastos et al. (2005b), em solo com grau de intemperismo avançado, incubados por 160 dias e utilizando o mesmo composto orgânico hidrofílico que utilizamos neste trabalho, constataram

que o composto hidrofílico não contribuiu para a formação e estabilização de agregados do solo, nem na dose mais alta utilizada por esses autores ($9,9 \text{ g kg}^{-1}$). O silte e argila, por serem partículas finas, contribuem melhor para o empacotamento do carbono orgânico e micronutrientes, enquanto que os sedimentos arenosos pouco contribuem para o acúmulo do carbono orgânico no solo (Gao et al., 2014). Assim, a presença de 75% de areia em nosso solo pode ter contribuído para a possível perda do composto hidrofílico, após 365 dias de incubação.

5. CONCLUSÕES

A adição de compostos orgânicos não diferiu do controle na porosidade total, macroporosidade e microporosidade. A quantidade de microporos é superior a quantidade de macroporos no Tecnossolo.

Os compostos orgânicos têm efeito na estruturação do Tecnossolo aos 180 dias, pelo aumento da capacidade de suporte de carga.

A aplicação de uma dose baixa ($2,5 \text{ g kg}^{-1}$) do composto hidrofóbico (ácido esteárico) pode aumentar a capacidade de suporte de carga do Tecnossolo, com um efeito semelhante à aplicação do composto hidrofílico (amido) em dose mais alta (10 g kg^{-1}).

Aos 365 dias, o composto hidrofílico tem efeito na estruturação do Tecnossolo, funcionando como um modulador da CSC em relação à umidade do solo. Após esse período, o amido perde esse efeito.

Em períodos superior a 365 dias, os compostos orgânicos hidrofóbico e hidrofílico não apresentam efeito no aumento da capacidade de carga do Tecnossolo.

REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO - ANM. Anuário Minerário Brasileiro. 2024. Disponível em: < <https://www.gov.br/anm/pt-br/assuntos/economia-mineral/publicacoes/anuario-mineral/anuario-mineral-brasileiro>>. Acesso em: 5 out. 2024.
- Almeida BG, Viana JHM, Teixeira WG, Donagemma GK. Densidade do solo. In: Teixeira PC, Donagemma GK, Fontana A, Teixeira WG, editors. Manual de métodos de análise de solo. 3. ed. rev e ampl. Brasília, DF: Embrapa; 2017. p. 65-75.
- Almeida CA, Oliveira AF, Pacheco AA, Lopes RP, Neves AA, Lopes Ribeiro De Queiroz ME. Characterization and evaluation of sorption potential of the iron mine waste after Samarco dam disaster in Doce River basin – Brazil. *Chemosphere*. 2018;209:411–420.
- Armstrong M, Petter R, Petter C. Why have so many tailings dams failed in recent years? *Resources Policy*. 2019;63:101412.
- Bastos RS, Mendonça ES, Alvarez VH, Corrêa MT, Costa LV. Formação e estabilização de agregados do solo influenciados por ciclos de umedecimento e secagem após adição de compostos orgânicos com diferentes características hidrofóbicas. *Rev. Bras. Cienc. Solo*. 2005a;29(1):21-31.
- Bastos RS, Mendonça ES, Alvarez VH, Corrêa MT. Formação e estabilização de agregados do solo decorrentes da adição de compostos orgânicos com diferentes características hidrofóbicas. *Rev. Bras. Cienc. Solo*. 2005b;29:11-20.
- Batista ER, Carneiro JJ, Pinto FA, Santos JV, Carneiro MAC. Environmental drivers of shifts on microbial traits in sites disturbed by a large-scale tailing dam collapse. *Sci Total Environ*. 2020;738:139453. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139453>
- Borges PHC, Silva AO, Benevenuto PAN, Santos JV, Batista ER, Carvalho AMX, Carneiro MAC, Siqueira JO. Pelletization and fertilization improve the root environment in soil affected by iron mining tailings. *Water, Air, Soil Pollut*. 2023;234:538.
- Borges PHD, Silva AOD, Santos JVD, Carvalho AMXD, Carneiro MAC, Siqueira JO. Soil conditioners improve the environment for grass growth in iron mining tailings of the Fundão dam failure. *Ciência e Agrotecnologia*. 2024;48

BRADY NC.; WEIL RR. Elementos da natureza e propriedades dos solos. Tradução técnica: Igo Fernando Lepesch. 2. ed. Porta Alegre: Bookman, 2013. 686 p.

Bucka, F. B., Kölbl, A., Uteau, D., Peth, S., & Kögel-Knabner, I. Organic matter input determines structure development and aggregate formation in artificial soils. *Geoderma*, v. 354, p. 113881, 2019.

Carmo FF, Kamino LHY, Tobias Junior R, Campos IC, Silvino G, Castro KJ, Mauro ML, Rodrigues NUA, Miranda MPS, Pinto CEF. Fundão tailings dam failures: the environment tragedy of the largest technological disaster of Brazilian mining in global context. *Perspect Ecol Conserv.* 2017;15:145-51. <https://doi.org/10.1016/j.pecon.2017.06.002>

Chenu C, Bissonnais Y, Arrouays, D. Organic matter influence on clay wettability and soil aggregate stability. *Soil Science Society of America Journal*, v. 64, n. 4, p. 1479-1486, 2000.

Cruz FVS, Gomes MP, Bicalho EM, Torre FD, Garcia QS. (2020). Does Samarco's spilled mud impair the growth of native trees of the Atlantic Rainforest? *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 189, 110021.

Dias Junior MS, Gomes AN, Andrade SC, Azevedo MR. Avaliação da sustentabilidade da estrutura de Argissolos em sistemas florestais. *Cerne*. 2002;8(1):103-114.

Dias Junior MS, Leite FP, Lasmar Júnior E, Araújo Junior CF. Traffic effect on the Preconsolidation pressure due to Eucalyptus harvest operations. *Sci Agric.* 2005; 62:248-55.

Dias Júnior MS, Leite FP, Winter ME, Pires JVG. Avaliação quantitativa da sustentabilidade estrutural de um Latossolo Vermelho-Amarelo cultivado com eucalipto na região de Peçanha-MG. *Rev. Árvore*. 2003;27:343-349.

Dias Junior MS, Martins PCC. Ensaio de compressão uniaxial e modelos de capacidade de suporte de carga do solo. In: Teixeira PC, Donagemma GK, Fontana A, Teixeira WG, editors. *Manual de métodos de análise de solo*. 3. ed. rev e ampl. Brasília, DF: Embrapa; 2017. p. 15271.

Dias Júnior MS, Pierce FJ. A simple procedure for estimating preconsolidation pressure from soil compression curves. *Soil Technol.* 1995;8:139-151.

Dias Junior MS, Tassinari D, Martins PCC. Compactação do solo: Atualização. In: Severiano EC, Moraes MF, Paula AM, editors. Tópicos em ciência do solo. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo; 2019. v. 10. p. 7-69.

Dias Júnior MS. Compression of three soils under longterm tillage and wheel traffic. East Lansing, Michigan State University, 1994. 114 p. (Tese de Doutorado).

Donagemma GK, Viana JHM, Almeida BG, Ruiz HA, Klein VA, Dechen SCF, Fernandes RBA. Análise granulométrica. In: TEIXEIRA PC, DONAGEMMA GK, Fontana A, Teixeira WG, editores. *Manual de métodos de análise de solo*. 3. ed. rev. e ampl. Brasília, DF: Embrapa; 2017. p. 95-116.

Fageria NK. Role of soil organic matter in maintaining sustainability of cropping systems. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 2012;43(16):2063-2113.

Gao GL, Ding GD, WU B, ZhanG YQ, Qin SG, Zhao YY, Bao YF, Liu YD, Wan L, Deng JF. Fractal scaling of particle size distribution and relationships with topsoil properties affected by biological soil crusts. *PLoS One*. 2014;9(e88559).

Hallett PD, Gaskin RE. An introduction to soil water repellency. In: Proceedings of the 8th International Symposium on Adjuvants for Agrochemicals (ISAA2007), International Society for Agrochemical Adjuvants, Columbus, Ohio, USA, 2007.

Hatje V, Pedreira RM, Rezende CE, Schettini CAF, Souza GC, Marin DC, Hackspacher PC. The environmental impacts of one of the largest tailing dam failures worldwide. *Scientific Reports*. 2017;7(1):1-13.

IBAMA. Laudo Técnico Preliminar-Impactos ambientais decorrentes do desastre envolvendo o rompimento da barragem de Fundão, em Mariana. Minas Gerais. 2015. Disponível em:

<https://www.ibama.gov.br/phocadownload/barragemdefundao/laudos/laudo_tecnico_preliminar_ibama.pdf>. Acesso em: 5 março 2022.

Iori P, Silva RBD, Dias Júnior MS, Lima JMD. Pressão de preconsolidação como ferramenta de análise da sustentabilidade estrutural de classes de solos com diferentes usos. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 2012, 36:1448–1456.

IUSS Working Group WRB. World reference base for soil resources 2006 - A framework for international classification, correlation and communication. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations; 2006. (World Soil Resources Reports, 103).

Mapa PS. Rota de processo para o underflow da deslamagem de minério de ferro do concentrador da Samarco Mineração. 2006. 190p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Minas) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG.

Páez, BCMD, Dias Junior, MS, Severiano EDC, Carneiro MAC, Martins PCC (2024). Propriedades físicas limitantes de Tecnosolos formados pelo rompimento da barragem de Fundão, Minas Gerais, Brasil. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 48 , e0230021. <https://doi.org/10.36783/18069657rbc20230021>.

Piccolo A, Mbagwu JSC. Role of hydrophobic components of soil organic matter in soil aggregate stability. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 1999;63(6):1801-1810.

Pronk GJ, Heister K, Ding GC, Smalla K, Kögel-Knabner I. Development of biogeochemical interfaces in an artificial soil incubation experiment; aggregation and formation of organo-mineral associations. *Geoderma*. 2012;189-190:585–594.

Reinert DJ, Reichert JM. Propriedades físicas do solo. Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2006.

Quadra GR, Roland F, Barros N, Malm O, Lino AS, Azevedo GM, Thomaz Jr, Andrade-Vieira LF, Praça-Fontes MM, Almeida RM, Mendonça RFF, Cardoso SJ, Guida YS, Campos JMS. Far-reaching cytogenotoxic effects of mine waste from the Fundão dam disaster in Brazil. *Chemosphere*. 2019;215:753-757.

Santini T, Fey M. Assessment of Technosol formation and in situ remediation in capped alkaline tailings. *Catena*. 2016;136:17-29.

Santos OSH, Avellar FC, Alves M, Trindade RC, Menezes MB, Ferreira MC, França GS, Cordeiro J, Sobreira FG, Yoshida IM, Moura PM, Baptista MB, Scotti MR. Understanding the environmental impact of a mine dam rupture in Brazil: Prospects for remediation. *J Environ Qual*. 2019;48:43949

Severiano EC, Oliveira GC, Junior MSD, Curi N, Costa KAP, Carducci. Preconsolidation pressure, soil water retention characteristics, and texture of Latosols in the Brazilian Cerrado. *Soil Research*, v. 51, n. 3, p. 193-202, 2013.

Severiano EC, Oliveira GC, Dias Júnior MS, Oliveira LFC, Castro MB. Pressão de preconsolidação e intervalo hídrico ótimo como indicadores de alterações estruturais do solo em decorrência das operações de colheita da cana-de-açúcar. *Rev. Bras. Ci. Solo*. 2008;32:1419-1427.

Silva AC, Cavalcante LCD, Fabris JD, Franco Júnior R, Barral UM, Farnezi MMM, Viana AJS, Ardisson JD, Eugenio L, Fernandez-Outon, Lara LRS, Stumpf HO, Barbosa JBS, Silva LC. Chemical, mineralogical and physical characteristics of a material accumulated on the river margin from mud flowing from the collapse of the iron ore tailings dam in Bento Rodrigues, Minas Gerais, Brazil. *Rev Espinhaço*. 2016;5:44-53.

Silva AO, Guimarães AA, Lopes BDO, Zanchi CS, Vega CFP, Batista ER, Moreira FMS, Souza FRC, Pinto FA, Santos JV, Carneiro JJ, Siqueira JO, Kemmelmeier K, Guilherme LRG, Ruffini M, Dias Junior MS, Aragão OOS, Borges PHC, Olivera-Longatti SM, Carneiro MAC. Chemical, physical, and biological attributes in soils affected by deposition of iron ore tailings from the Fundão Dam failure. *Env Monit Assess*. 2021.

Silva RB, Dias Junior MS, Santos FL, Franz CAB. Resistência ao cisalhamento de um Latossolo sob diferentes uso e manejo. *Rev. Bras. Ciênc. Solo*. 2004;28:165-173.

SULLIVAN LA. Soil organic matter, air encapsulation and water stable aggregation. *J. Soil Sci.*, 1990; 41:529-534.

Viana JHM, Teixeira WG, Donagemma GK. Densidade de partículas. In: Teixeira PC, Donagemma GK, Fontana A, Teixeira WG, editors. *Manual de métodos de análise de solo*. 3. ed. rev e ampl. Brasília, DF: Embrapa; 2017. p. 76-81.

Zanchi CS, Souza EP, Silva RV, Freitas TS, Alves GS. Pre-cultivation with herbaceous plants assists in the revegetation process of iron mining tailings with *Enterolobium contortisiliquum*. *Water, Air, & Soil Pollution*. 2022;233:2

Artigo 2

Elaborado de acordo com as normas da Revista Brasileira de Ciência do Solo

Artigo 2 – Efeitos de compostos orgânicos associados a ciclos de umedecimento e secagem na estruturação e capacidade de suporte de carga de Tecnossolos

Josiane da Conceição Almeida ¹, Moacir de Souza Dias Júnior¹, Renato Saldanha Bastos²

⁽¹⁾ Universidade Federal de Lavras, Departamento de Ciência do Solo, Lavras, Minas Gerais, Brasil.

⁽²⁾ Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Sul de Minas Gerais, Campus Três Corações, Três Corações, Minas Gerais, Brasil.

***Autor correspondente**

E-mail: josianealmeidaufv@gmail.com tel:

Agradecimentos: Departamento de Ciência do Solo; Universidade Federal de Lavras; CAPES

Destaques:

O composto orgânico hidrofóbico associado a ciclos de umedecimento e secagem, auxilia na estruturação de Tecnossolos.

O composto orgânico hidrofóbico aumenta a capacidade de suporte de carga de Tecnossolos.

O composto orgânico hidrofílico pode diminuir a capacidade de suporte de carga de Tecnossolos.

RESUMO: Tecnossolos oriundos do rompimento de barragem de mineração são pouco estruturados. A aplicação de compostos orgânicos e a ação de ciclos de umedecimento e secagem (US) podem contribuir para a estruturação destes solos. O objetivo deste trabalho foi avaliar o efeito de compostos orgânicos com distintos graus de hidrofobicidade associados a ciclos de US, sobre a estruturação de Tecnossolos originários do rompimento da barragem de Fundão, em Mariana (MG). Tais efeitos foram avaliados por meio da capacidade de suporte de carga (CSC). Para isso, foram conduzidos dois experimentos: o primeiro avaliou se uma semana seria equivalente a um ciclo de US, enquanto o segundo experimento, testou os efeitos das associações de ciclos de US e doses dos compostos orgânicos, sobre a estruturação de Tecnossolos. O experimento 1 foi conduzido seguindo o esquema fatorial 2 x 4, sendo 2 compostos orgânicos (amido, ácido esteárico) em 4 doses [0,0 (controle); 2,5; 5,0 e 10,0 g kg⁻¹]. O delineamento experimental adotado foi em blocos casualizados, com 5 repetições. No experimento 2, foi aplicado um esquema fatorial 3 x 2 x 4 x 3, considerou-se 3 grupos de ciclos semanais de US (26, 52 e 78 ciclos), 2 compostos orgânicos (amido, ácido esteárico), 4 doses [0,0 (controle); 2,5; 5,0 e 10,0 g kg⁻¹] e 3 tensões hídricas iniciais (-10, -100 e -1.500 kPa). O delineamento experimental do experimento 2, também foi em blocos casualizados, porém com três repetições. Nos experimentos 1 e 2, os compostos orgânicos foram incorporados ao Tecnossolo, que foi acondicionado em cilindros volumétricos de volume interno conhecido e estes, colocados em bandejas plásticas. As amostras foram umedecidas semanalmente por capilaridade até atingirem a capacidade de campo estimada. No experimento 1, o peso das amostras foi registrado ao longo de 11 semanas. No experimento 2, após os ciclos de US, as amostras foram saturadas e estabilizadas nas tensões hídricas definidas. Posteriormente, foi realizado o teste de compressão uniaxial, para determinação das pressões de pré-consolidação e obtenção dos modelos de capacidade de suporte de carga (CSC). Adicionalmente, foram calculadas as porosidades totais (Pt), microporosidades (Mi) e macroporosidades (Ma). Para o

experimento 1, o período de uma semana pode ser considerado equivalente a um ciclo de US nas amostras de Tecnossolos. No experimento 2, o composto orgânico hidrofóbico e os ciclos de US influenciaram a Pt e Mi. O composto orgânico hidrofóbico contribuiu para o início de estruturação no Tecnossolo, indicado pelos maiores valores CSC. Esse efeito é alcançado com uma menor dose ($2,5 \text{ g kg}^{-1}$) deste composto orgânico e com o menor número de ciclos de US (26), ou, com doses mais elevadas ($10,0 \text{ g kg}^{-1}$) e maior número de ciclos de US (52 e 78). Em contrapartida, o composto hidrofílico associado a um número de ciclos de US elevado (78), diminui a CSC do Tecnossolo.

Palavras-chave: rejeitos de mineração; porosidade do solo; hidrofobicidade; pressão de pré-consolidação

1. INTRODUÇÃO

Em Minas Gerais, a produção mineral está concentrada no centro-leste do estado, na região denominada Quadrilátero Ferrífero (Segura et al., 2016; Borges et al., 2023), a qual foi afetada por dois rompimentos de barragens de mineração de ferro. O primeiro ocorreu em 2015, na cidade de Mariana (barragem de Fundão), e o segundo em 2019, na cidade de Brumadinho (barragem do Córrego do Feijão). Quando a barragem de Fundão rompeu, cerca de 50 milhões de metros cúbicos e rejeito foram derramados na natureza, atingindo cursos d'água desde a bacia do Rio Doce até o Oceano Atlântico (Ibama, 2015; Segura et al., 2016; Carmo et al., 2017; Omachi et al., 2018; Tognella et al., 2022; Borges et al. 2024; Pauly et al., 2024).

O solo formado após a deposição da lama de rejeitos é classificado como Tecnossolo pela World Reference Base for Soil Resources (WRB-FAO) (IUSS Working Group WRB, 2006). Em sua composição são encontrados maiores teor de areia e silte e menores teor de argila (Silva et al., 2016; Almeida et al., 2018; Batista et al., 2020; Páez et al., 2024). Estes solos possuem limitações química e física que dificultam o crescimento de plantas (Borges et al., 2023; 2024). Uma limitação química, é o pH próximo a neutralidade ou básico (Batista et al., 2020; Borges et al., 2023), devido a presença de hidróxido de sódio utilizado no processo de separação do minério (flotação) (Pires et al., 2003). Dentre as limitações físicas destes Tecnossolos, está a redução da porosidade (Zanchi et al., 2021; Borges et al., 2024), ocasionada pela alta densidade do solo (Zanchi et al., 2021; Zanchi et al., 2022; Borges et al., 2024; Páez et al., 2024), consequentemente criando uma resistência física para as raízes (Zanchi et al., 2022; Borges et al., 2024). A alta resistência dos Tecnossolos é, portanto, sua principal limitação física, e para

diminuí-la é necessário integrar diferentes práticas de manejo, melhorando as propriedades físicas e multifuncionalidade completa (Páez et al., 2024).

Diversos fatores interferem na agregação do solo como o teor e o tipo de argila, óxidos e hidróxidos de ferro, exsudatos orgânicos oriundos de plantas, presença de substâncias orgânicas resultantes da atividade microbiana e outros compostos orgânicos (Bastos et al., 2005a). Os ciclos de umedecimento e secagem, congelamento e descongelamento, microrganismos e a interação entre as partículas do solo são agentes que controlam a formação de agregados do solo (Pronk et al., 2012). De acordo com Piccolo et al. (1997), os ciclos de umedecimento e secagem tem sua importância na estabilidade estrutural dos solos, pois, em solos pouco estruturados, esses ciclos auxiliam na agregação do solo. Outro fator que auxilia na agregação dos solos são os compostos orgânicos (Bastos et al., 2005a). A adição destes, pode causar repelência à água no solo e auxiliar na estabilidade de agregados (Bastos et al., 2005a). Os compostos orgânicos podem ter caráter hidrofóbicos ou hidrofílicos, de acordo com sua afinidade com a água (Bastos et al., 2005a; Woche et al., 2005; Mapa, 2006). Dois compostos utilizados em estudos envolvendo a estabilidade de agregados, são o ácido esteárico (hidrofóbico) e o amido (hidrofílico) (Bastos et al., 2005a,b).

A pressão de pré-consolidação é a máxima pressão que um solo consegue suportar antes de ocorrer a degradação da estrutura (Dias Junior, 1994; Dias Junior et al., 2002), podendo ser utilizada para identificar a degradação estrutural do solo (Iori et al., 2012). A partir da variação dos valores da pressão de pré-consolidação e umidade, Dias Junior (1994) desenvolveu o modelo de capacidade de suporte de carga (CSC). Devido à sensibilidade em quantificar a máxima pressão que um solo é capaz de suportar, e considerando a dificuldade de estruturação presente nos Tecnossolos formados a partir de rejeitos de mineração, este trabalho utilizará a pressão de pré-consolidação e os modelos de CSC para avaliar a formação de estrutura nesses solos. Dessa forma, o objetivo deste trabalho foi avaliar o efeito de compostos orgânicos com distintos graus de hidrofobicidade associados a ciclos de US, sobre a estruturação de Tecnossolos originários do rompimento da barragem de Fundão, em Mariana (MG). A hipótese deste estudo é que a incorporação de compostos orgânicos associados a ciclos de umedecimento e secagem, auxiliam na estruturação e aumento da CSC dos Tecnossolos.

2. MATERIAL E MÉTODOS

O estudo foi conduzido na Universidade Federal de Lavras (UFLA), Lavras, Minas Gerais (MG), Brasil. O solo utilizado foi o Tecnossolo coletado cinco anos após a deposição dos rejeitos da barragem de Fundão, Mariana, Minas Gerais, Brasil. O material foi coletado um metro de profundidade nas coordenadas 20° 17' 47.86" S/43° 12' 19.88" W, transferido para a UFLA, onde foi seco ao ar e peneirado em malha de 2 mm, para a condução dos experimentos.

Uma mostra foi enviada ao Laboratório de Fertilidade do solo e realizada a caracterização química: pH em água 7,0; fósforo (P) 4,89 mg dm⁻³; K (potássio) 18,07 mg dm⁻³; sódio (Na) 11,0 mg dm⁻³; cálcio (Ca²⁺) 1,37 cmolc dm⁻³, magnésio (Mg²⁺) 0,1 cmolc dm⁻³, alumínio (Al³⁺) 0 cmolc dm⁻³; acidez potencial (H+Al) 0,8 cmolc dm⁻³; soma de bases (SB) 1,52; capacidade de troca catiônica efetiva (t) 1,52 cmolc dm⁻³; Capacidade de troca catiônica a pH 7,0 (T) 2,32 cmolc dm⁻³; matéria orgânica 0,61 dag kg⁻¹; saturação por bases (V) 65,36 %; saturação por alumínio (m) 0%; fósforo remanescente 54,50 mg L⁻¹; zinco (Zn) 0,4 mg dm⁻³; ferro (Fe) 0,88 mg dm⁻³; manganês (Mn) 127,3 mg dm⁻³; boro (B) 0,08 mg dm⁻³; enxofre (S) 9,7 mg dm⁻³. Outra amostra foi levada ao laboratório de Física do Solo onde foi caracterizada fisicamente com 75% de areia, 18% de silte e 7% de argila, pelo método de Boyocous (Donagemma et al., 2017). A densidade de partículas (Dp) de 2,72 g cm⁻³ foi determinada pelo método do balão volumétrico (Viana et al., 2017). Também foi obtido a densidade do solo (Ds) de 1,81 g cm⁻³ (Almeida et al., 2017).

Foram conduzidos dois experimentos. O primeiro experimento (experimento 1), visou determinar se o período de uma semana correspondia a um ciclo de umedecimento e secagem nas amostras de Tecnossolo, incorporadas com compostos orgânicos (hidrofílico/hidrofóbico) em diferentes doses. O segundo, avaliou se os ciclos de umedecimento e secagem associado aos compostos orgânicos em diferentes doses, poderiam contribuir para a estruturação do Tecnossolo, através capacidade de suporte de carga.

O experimento consistiu no esquema fatorial 3 x 2 x 4 x 3, sendo três grupos de ciclos de umedecimento e secagem (26, 52 e 78 ciclos), dois compostos orgânicos (amido, ácido esteárico) em quatro doses [0,0 (controle); 2,5; 5,0 e 10,0 g kg⁻¹] e três tensões iniciais para o teste de compressão uniaxial -10, -100 e -1.500 kPa. O delineamento experimental foi em blocos casualizados, com três repetições, totalizando 216 unidades amostrais.

As unidades amostrais consistiram de cilindros volumétricos, cada um com as dimensões 2,5 cm de altura e 6,3 cm de diâmetro, e a base coberta com tecido amarrado por um elástico. Os conjuntos (cilindro, elástico e tecido) foram identificados individualmente, e registradas as medidas de altura, massa e diâmetro interno do cilindro, além da massa do tecido e do elástico. Os compostos orgânicos utilizados foram o ácido esteárico PA (ácido octadecanóico – $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{16}\text{COOH}$) puro (AE), de caráter é hidrofóbico, e o amido solúvel PA ACS (Am) $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$ com ligações α 1-4 de caráter hidrofílico. Ambos os compostos foram aplicados nas doses 0 (controle); 2,5; 5,0 e 10,0 g kg^{-1} . Após a homogeneização, a mistura foi despejada nos cilindros preenchendo todo o seu volume, e estes, foram acondicionados em bandejas plásticas de dimensões 43,5 (comprimento) x 28,5 (largura) x 8,0 cm (altura). As bandejas foram levadas à casa de vegetação e as amostras foram umedecidas semanalmente por capilaridade com água destilada, até a capacidade de campo de -10 kPa de potencial matricial.

Após completar os 26, 52 e 78 ciclos de umedecimento e secagem, as bandejas contendo as amostras foram transportadas para o Laboratório de Física do Solo. As amostras foram saturadas com água destilada, por pelo menos 24 horas. Em seguida, foram submetidas às tensões de -10 kPa na mesa de tensão e à -100 e -1500 kPa na câmara de Richards. Após a estabilização das amostras, que variou entre 1 e 12 dias, conforme a força que a água estava retida nas mesmas, estas foram retiradas dos equipamentos, pesadas e encaminhadas para o ensaio de compressão uniaxial.

No ensaio de compressão uniaxial as amostras foram colocadas em consolidômetros de ar comprimido (Terralload S-450, Durham GeoSlope®) e submetidas às pressões sequenciais (25, 50, 100, 200, 400, 800 e 1.600 kPa) e sem descompressão (Dias Júnior e Martins, 2017). As pressões foram aplicadas até atingir 90% da deformação máxima (Taylor, 1948). Posteriormente, as amostras foram secas em estufa a 105 °C por 48 horas e a massa de solo seco foi determinada.

As pressões de pré-consolidação foram determinadas pelo procedimento de Dias Junior e Pierce (1995). Com os dados de tensão e das pressões de pré-consolidação, utilizando o software Sigma Plot 14, foram obtidas as regressões, correspondentes aos modelos de capacidade de suporte de carga. Estes, foram comparados pelo procedimento de Snedecor e Cochran (1989), para modelos lineares ($\log \sigma_p = a + b\theta$), o qual inclui o teste F. Através deste procedimento, foi possível testar a homogeneidade dos dados, os coeficientes lineares (a) e angulares (b). Quando os modelos foram homogêneos e os coeficientes lineares e/ou angulares foram não

significativos, os dados foram agrupados e um novo modelo foi ajustado. Dessa forma, os tratamentos possuíam a mesma capacidade de suporte de carga. Quando os coeficientes lineares e/ou angulares foram significativos, os dados foram mantidos em modelo separado, ou seja, cada tratamento possuía capacidade de suporte de carga diferente (Dias Junior et al., 2019).

A porosidade total (Pt) foi determinada pela equação $Pt = 1 - D_s/D_p$, em que D_p representa a densidade de partículas (Almeida et al., 2017). A microporosidade foi calculada pela expressão $Mi = (m_a - m_s / v_t)$, sendo m_a , a massa de solo seco mais água a uma tensão de 6 kPa, e v_t , o volume da amostra. A macroporosidade foi obtida pela diferença entre a porosidade total e a microporosidade ($Ma = Pt - Mi$) (Almeida et al., 2017).

Para a Pt, Ma e Mi a análise dos dados foi realizada por meio de ANOVA, e, quando houve diferenças estatisticamente significativas ($p < 0,05$), o teste de Tukey foi aplicado a um nível de significância de 5%. O teste de Dunnett foi utilizado para comparar os tratamentos com o controle, enquanto o teste de Tukey foi empregado para realizar comparações múltiplas entre todos os grupos avaliados.

3. RESULTADOS

A porosidade total, macroporosidade e microporosidade estão representadas na figura 2. Observa-se nesta figura, que a quantidade de microporos é maior em relação aos macroporos. O teste de Dunnett, indicou que para a Pt, Ma e Mi, somente o ácido esteárico nas doses 5,0 e 10,0 g kg⁻¹ apresentaram diferenças significativas em relação ao controle.

Para a Pt e Mi, a ANOVA indicou que há diferenças entre os tratamentos e existe interação. No tratamento ácido esteárico, a dose 2,5 g kg⁻¹ teve a maior média, seguida por 5,0 e 10,0 g kg⁻¹. No tratamento amido, as doses tiveram a mesma média. Para a dose 2,5 g kg⁻¹, o ácido esteárico e amido tiveram médias iguais. Para as doses 5,0 g kg⁻¹ e 10,0 g kg⁻¹, a média do amido foi superior ao ácido esteárico.

Em relação a macroporosidade, não houve interação significativa entre os compostos orgânicos e os ciclos de umedecimento e secagem (US) na ANOVA.

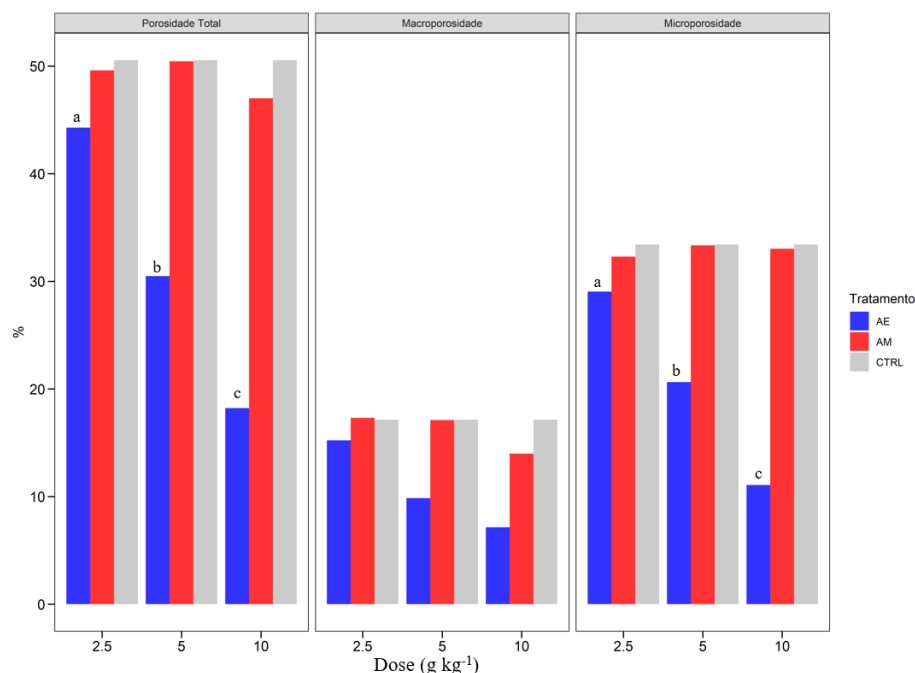


Figura 1: Pt (%), Ma (%) e Mi (%) de amostras construídas do Tecnossolo de Mariana, mediante à aplicação de compostos orgânicos em diferentes doses e submetidas a 78 ciclos (547 dias) de US. Ctrl: controle. AE: ácido esteárico. Am: amido. 2,5; 5,0; 10,0 g kg⁻¹: doses dos compostos orgânicos.

Para os modelos de capacidade de suporte de carga ($\sigma_p = a + b\psi$), o resumo da análise estatística utilizando o Procedimento Snedecor e Cochran (1989), encontra-se na tabela 1. Os modelos de capacidade de suporte de carga correspondente aos 26 e 78 ciclos de US, estão na figura 3 e 4, respectivamente.

Aos 26 ciclos (180 dias) de US, o contraste CtrlxAE_2,5 g kg⁻¹ e foi significativo, logo, cada tratamento foi mantido em modelo separado (tabela 1, figura 3). Os contrastes CtrlxAE_5,0; CtrlxAE_10,0; Ctrlx Am_2,5; CtrlxAm_5,0; CtrlxAm_10,0, não diferiram significativamente, portanto, os dados foram combinados e uma nova equação foi ajustada.

Aos 52 ciclos (365 dias) de US, todos os contrastes (CtrlxAE_2,5; CtrlxAE_5,0; CtrlxAE_10,0; CtrlxAm_2,5; CtrlxAm_5,0; CtrlxAm_10,0), não tiveram diferença estatística (tabela 1).

Aos 78 ciclos (547 dias) de US, os contrastes CtrlxAE_2,5; CtrlxAE_5,0; CtrlxAE_10,0; CtrlxAm_5,0 tiveram efeito significativo, assim, foram mantidos em modelos separados (tabela 1, figura 4). Já os contrastes CtrlxAm_2,5; CtrlxAm_10,0 não foram estatisticamente significativos, logo, os dados foram agrupados e uma nova equação foi ajustada.

Em todos os ciclos de US, maioria das doses dos compostos orgânicos não tiveram efeito significativo pelo procedimento Snedecor e Cochran (1989), mas as figuras 5 e 6 destacam o efeito destes compostos orgânicos.

Tabela 1. Comparação dos modelos de capacidade de suporte de carga ($\sigma_p = a + b\psi$) pelo procedimento Snedecor e Cochran (1989) do Tecnosolo de Mariana (MG), tratado com compostos orgânicos (amido e ácido esteárico) com diferentes graus de hidrofobicidade e doses, submetidos a 26, 52 e 78 ciclos de US.

Ciclos de umedecimento e secagem (c)	Contrastes dos tratamentos			F	F		Decisão
					Coeficiente linear (a)	Coeficiente angular (b)	
26 (180 dias)	Ctrl	x	AE_2,5	H	ns	*	Não agrupar
	Ctrl	x	AE_5,0	H	ns	ns	Agrupar
	Ctrl	x	AE_10,0	H	ns	ns	Agrupar
	Ctrl	x	Am_2,5	H	ns	ns	Agrupar
	Ctrl	x	Am_5,0	H	ns	ns	Agrupar
	Ctrl	x	Am_10,0	H	ns	ns	Agrupar
52 (365 dias)	Ctrl	x	AE_2,5	H	ns	ns	Agrupar
	Ctrl	x	AE_5,0	H	ns	ns	Agrupar
	Ctrl	x	AE_10,0	H	ns	ns	Agrupar
	Ctrl	x	Am_2,5	H	ns	ns	Agrupar
	Ctrl	x	Am_5,0	H	ns	ns	Agrupar
	Ctrl	x	Am_10,0	H	ns	ns	Agrupar
78 (547 dias)	Ctrl	x	AE_2,5	H	*	ns	Não agrupar
	Ctrl	x	AE_5,0	H	**	ns	Não agrupar
	Ctrl	x	AE_10,0	H	**	ns	Não agrupar
	Ctrl	x	Am_2,5	H	ns	ns	Agrupar
	Ctrl	x	Am_5,0	H	**	*	Não agrupar
	Ctrl	x	Am_10,0	H	ns	ns	Agrupar

Tratamentos: Ctrl (controle); AE (ácido esteárico); Am (amido); doses do composto orgânico (2,5; 5,0 ;10,0 g kg⁻¹). F: teste F para homogeneidade de variância e coeficientes ajustados; H: homogêneo; *: significativo a 5%; **: significativo a 1%; ns: não significativo.

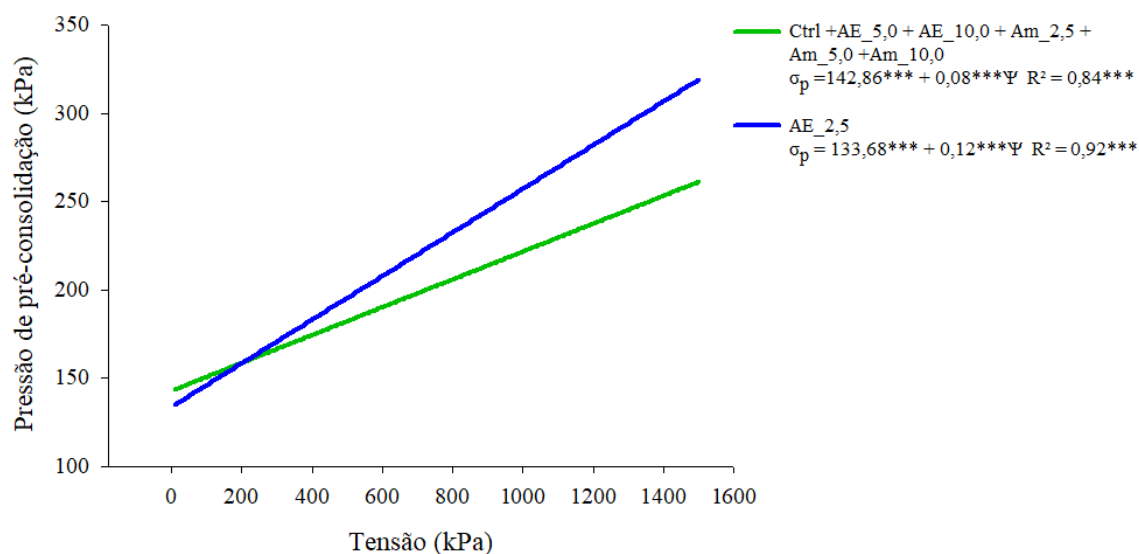


Figura 2: Modelos de capacidade de suporte de carga do Tecnossolo de Mariana (MG), cinco anos após o desastre, tratado com compostos orgânicos e submetido a 26 ciclos de US. Ctrl: controle. AE: ácido esteárico. Am: amido. 2,5; 5,0; 10,0: doses do composto orgânico (g kg^{-1}). Ψ : tensão (kPa). σ_p : pressão de pré-consolidação (kPa). ***: significativo ($p < 0,001$). R^2 : coeficiente de determinação.

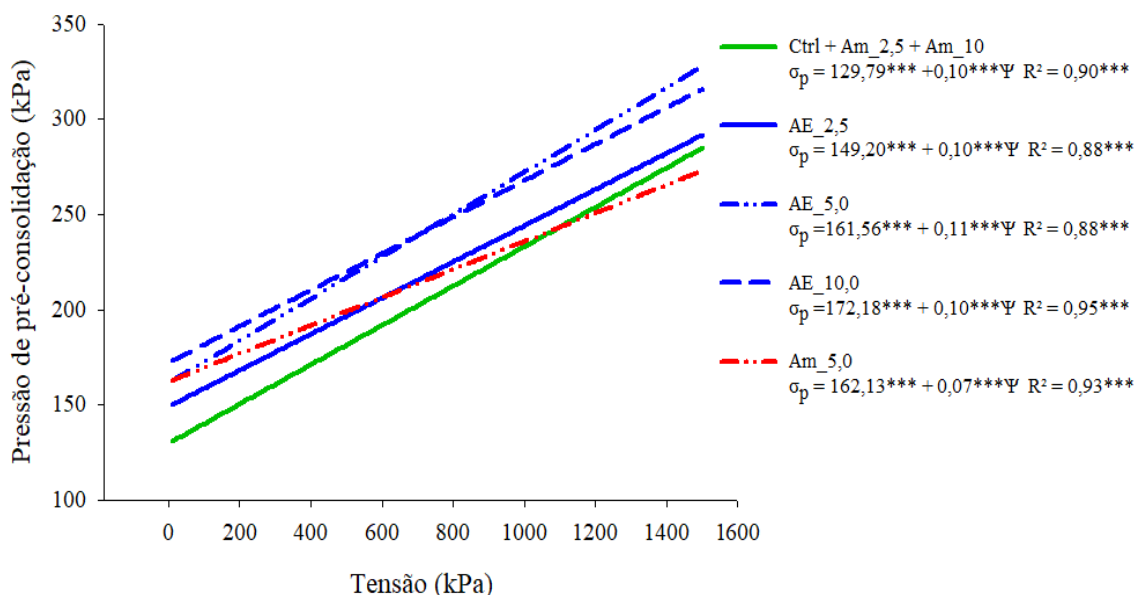


Figura 3: Modelos de CSC do Tecnossolo de Mariana (MG), cinco anos após o desastre, tratado com compostos orgânicos e submetido a 78 ciclos de US. Ctrl: controle. AE: ácido esteárico. Am: amido. 2,5; 5,0; 10,0: doses do composto orgânico (g kg^{-1}). Ψ : tensão (kPa). σ_p : pressão de pré-consolidação (kPa). ***: significativo ($p < 0,001$). R^2 : coeficiente de determinação.

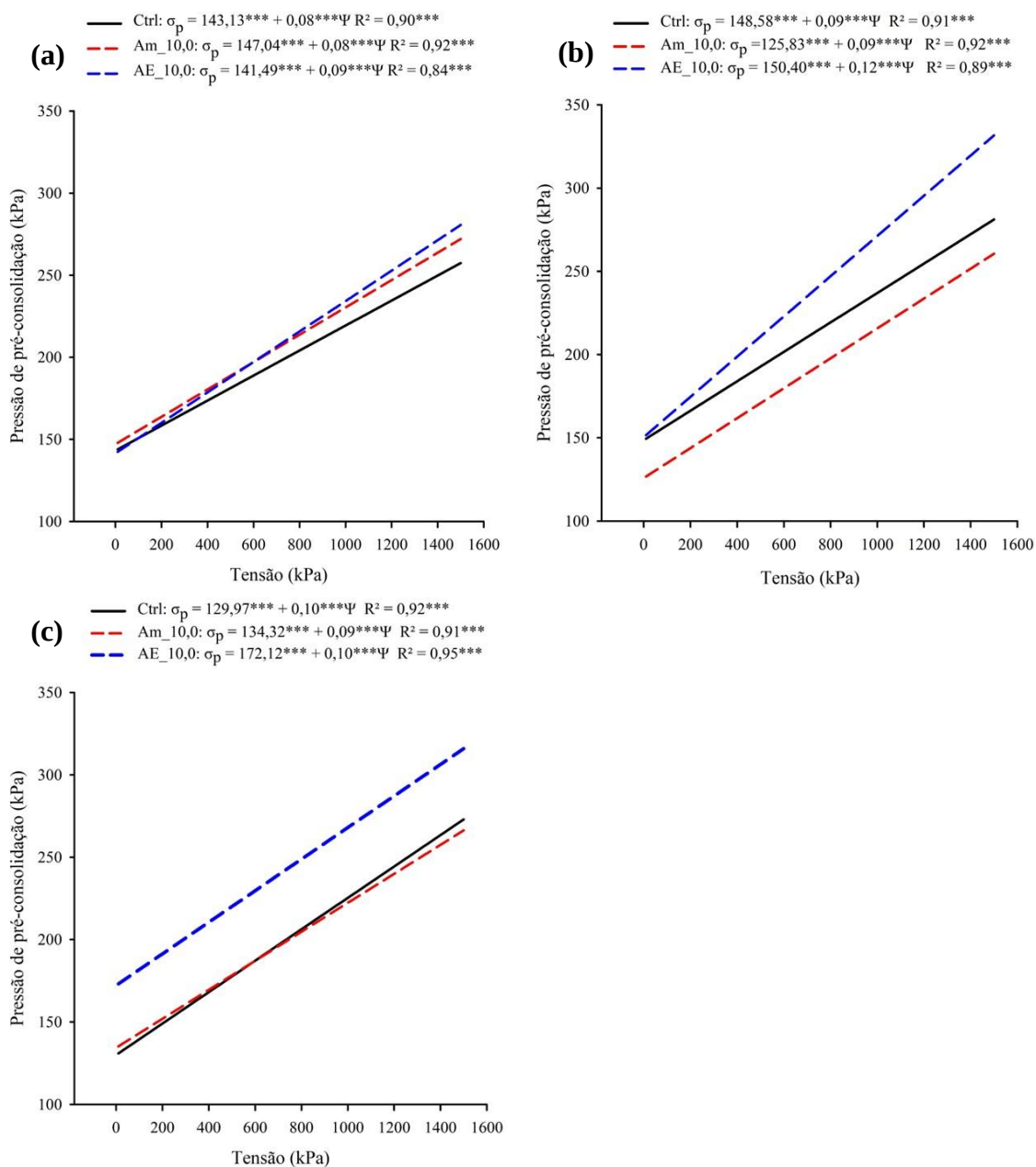


Figura 4: Modelos de CSC do Tecno solo de Mariana (MG), cinco anos após o desastre, tratado com $10,0 \text{ g kg}^{-1}$ de compostos orgânicos (hidrofílico e hidrofóbico) e submetido a 26 (a), 52 (b) e 78 (c) ciclos de US. Ctrl: controle. AE: ácido esteárico. Am: amido. Ψ : tensão (kPa). σ_p : pressão de pré-consolidação (kPa). ***: significativo ($p < 0,001$). R^2 : coeficiente de determinação.



Figura 5: Representação das amostras úmidas de Tecno solo tratadas com os compostos orgânicos (hidrofóbico e hidrofílico) submetidas a 78 ciclos de US.

4. DISCUSSÃO

Para a Pt, Ma e Mi o fato de o amido ter apresentado maior média pode ser explicado pelo seu caráter hidrofílico. Essa afinidade com a água permite que esta preencha os poros do solo, enquanto o ácido esteárico repele a água, devido ao seu caráter hidrofóbico. Assim, as maiores doses de ácido esteárico criaram uma maior barreira à penetração da água aos microporos principalmente, quando comparado ao amido. Para os próximos trabalhos, sugerimos que para a análise da porosidade em solo tratados com compostos hidrofóbicos, não utilizar a água para o preenchimento dos poros, uma vez que a hidrofobicidade do composto pode impedir que a água chegue em todos os poros, subestimando a análise.

Na Pt e Mi, a interação significativa mostra que há uma relação entre os ciclos de US e os compostos orgânicos. Já a Ma não foi influenciada pelos compostos orgânicos e ciclos de US. Bastos et al. (2005a) observaram que na agregação do solo, os efeitos dos compostos orgânicos foram reduzidos pelos ciclos de US. O modelo de hierarquia de agregados explica que os microagregados são formados dentro de macroagregados (Tisdall e Oades, 1982; Bastos et al., 2005a; Pronk et al., 2012). Bastos et al (2005a), observaram que o composto orgânico hidrofóbico não é muito eficaz na formação de grandes agregados, entretanto, cria uma

resistência à entrada de água, auxiliando na estabilidade. Infere-se que houve uma formação de microagregados primeiro e que a aplicação de composto orgânico (principalmente o de caráter hidrofóbico) e os ciclos de US contribuíram para essa formação.

Dada a composição do Tecnossolo rica em areia, esperava-se maior quantidade de Ma em relação a Mi, entretanto, menores valores de Ma foram observados. Silva et al. (2007) observaram maior porcentagem de microporos em relação a macroporos em rejeitos, dada a presença de areia fina. Zanchi et al. (2022) também destaca que a alta concentração de sódio no rejeito aumenta a dispersão de partículas, reduz a porosidade, agregação, além da capacidade de infiltração e a retenção de água. Isso pode explicar a menor macroporosidade no Tecnossolo.

A incorporação do composto orgânico hidrofóbico associada aos 26, 52 e 78 ciclos de US iniciou o processo de estruturação do Tecnossolo, constatado pelo aumento da CSC (figuras 3, 4 e 5).

Embora a maioria das doses dos compostos orgânicos não tiveram efeito significativo, aos 26 e 52 ciclos, pelo procedimento Snedecor e Cochran (1989) (tabela 1), é possível observar na figura 5 que ao utilizar a dose $10,0 \text{ g kg}^{-1}$ dos compostos orgânicos houve alguns destaques. Aos 26, 52 e 78 ciclos de US, o composto orgânico hidrofóbico apresentou valores de CSC superiores ao composto orgânico hidrofílico, à medida em que se aumentaram os ciclos de US. Aos 52 ciclos de US, o composto orgânico hidrofílico diminuiu a CSC, apresentando valores inferiores ao controle. Aos 78 ciclos de US, foi possível observar que a CSC do composto hidrofílico e do controle foram semelhantes, ou seja, parece que o composto hidrofílico perdeu seu efeito.

Os ciclos de US tem muita importância na formação e estabilização de agregados e seu efeito é potencializado quando há incorporação de resíduos orgânicos no solo (Bravo-Garza et al., 2009). Solos tratados com materiais orgânicos que tenha compostos orgânicos hidrofóbicos demonstram mais estabilização dos agregados em relação àqueles com materiais hidrofílicos predominante (Bastos et al., 2005b). O caráter hidrofóbico acentuado na matéria orgânica, auxilia no encapsulamento de ar dentro de agregados do solo, retardando a entrada rápida de água, e consequentemente reduzindo a quebra (Sullivan, 1990). Além disso, solos arenosos geralmente possuem menor superfície específica que os solos siltosos e podem ser mais hidrofóbicos (Woche et al., 2005). As amostras do presente estudo foram construídas com um

solo sem estruturação e contendo 70% de areia, assim, espera-se que esses Tecnossolos apresentem maior caráter hidrofóbico.

A textura do solo pode influenciar na sua capacidade de suporte de carga (Dias Junior et al., 2002). Em um trabalho um Argissolo Amarelo de textura arenosa e com densidade de partículas próxima ao do presente estudo, Dias Junior et al. (2002) observaram maior CSC em relação a mesma classe de solo com textura argilosa. Assim, o predomínio da fração areia no Tecnossolo associado a incorporação do composto orgânico hidrofóbico, contribui para aumentar sua hidrofobicidade e CSC, quando comparado a presença do composto orgânico hidrofílico. O composto orgânico hidrofóbico conferiu uma proteção aos agregados do Tecnossolo que estavam se formando.

Na figura 6 nota-se que o ácido esteárico, devido ao seu caráter hidrofóbico, provoca uma repelência à água, criando uma barreira de proteção ao agregado em processo de formação. Já a amostra tratada com o amido, evidencia seu caráter hidrofílico, uma vez que a água conseguiu penetrar em toda a amostra. Este efeito visual, não foi observado nas amostras em menores numeros de ciclos de US. De acordo com Hallett (2007), na natureza alguns compostos orgânicos produzidos por microrganismos ou exudatos das plantas quando molhados podem apresentar caráter hidrofílico. Contudo, quando o solo seca, essas superfícies hidrofílicas se ligam fortemente entre si e às partículas do solo, se orientando para o interior do agregado, enquanto que a superfície hidrofóbica do composto orgânico é exposta para face externa, formando uma camada que repele a água (Piccolo e Mbagwu, 1999; Hallett, 2007).

5. CONCLUSÕES

Os compostos orgânicos e os ciclos de umedecimento e secagem (78 ciclos – 547 dias) têm efeito na porosidade total e microporosidade do Tecnossolo.

No Tecnossolo em processo de estruturação, há um predomínio da quantidade de microporos em relação aos macroporos, após 78 ciclos (547 dias) de umedecimento e secagem.

Maiores valores de porosidade total, macroporosidade e microporosidade são observados na presença do composto orgânico hidrofílico (amido). Porém, o composto orgânico hidrofóbico

(ácido esteárico) criou uma proteção ao Tecnossolo à presença de água, o que pode contribuir para evitar perdas de partículas do solo.

Sugerimos que para a análise de porosidade em solos tratados com composto orgânico hidrofóbico, não seja utilizada a água para o preenchimento dos poros.

Maiores valores de capacidade de suporte de carga são observados no Tecnossolo tratado com o composto hidrofóbico (ácido esteárico).

O composto orgânico hidrofóbico (ácido esteárico) contribui para a estruturação do Tecnossolo, com menor número de ciclos de umedecimento e secagem (26) e menor dose ($2,5 \text{ g kg}^{-1}$) ou com maior número de ciclo de umedecimento e secagem (52 e 78) e maiores doses ($5,0$ e $10,0 \text{ g kg}^{-1}$) deste composto.

O composto orgânico hidrofílico (amido) associado aos 78 ciclos de umedecimento e secagem, contribui para uma menor capacidade de suporte de carga do Tecnossolo.

O composto orgânico hidrofílico associado aos ciclos de umedecimento e secagem, pode afetar a estruturação do Tecnossolo, permitindo a entrada rápida de água no agregado em formação.

REFERÊNCIAS

- Almeida BG, Viana JHM, Teixeira WG, Donagemma GK. Densidade do solo. In: Teixeira PC, Donagemma GK, Fontana A, Teixeira WG, editores. Manual de métodos de análise de solo. 3. ed. rev ampl. Brasília, DF: Embrapa; 2017. p. 65-75.
- Almeida CA, Oliveira AF, Pacheco AA, Lopes RP, Neves AA, Lopes Ribeiro De Queiroz ME. Characterization and evaluation of sorption potential of the iron mine waste after Samarco dam disaster in Doce River basin – Brazil. *Chemosphere*. 2018;209:411–420.
- Bastos RS, Mendonça ES, Alvarez VH, Corrêa MT, Costa LV. Formação e estabilização de agregados do solo influenciados por ciclos de umedecimento e secagem após adição de compostos orgânicos com diferentes características hidrofóbicas. *Rev. Bras. Cienc. Solo*. 2005a;29(1):21-31.
- Bastos RS, Mendonça ES, Alvarez VH, Corrêa MT. Formação e estabilização de agregados do solo decorrentes da adição de compostos orgânicos com diferentes características hidrofóbicas. *Rev. Bras. Cienc. Solo*. 2005b;29:11-20.
- Batista ER, Carneiro JJ, Pinto FA, Santos JV, Carneiro MAC. Environmental drivers of shifts on microbial traits in sites disturbed by a large-scale tailing dam collapse. *Sci. Total Environ*. 2020;738:139453. doi:10.1016/j.scitotenv.2020.139453.
- Borges PHC, Silva AO, Benevenuto PAN, Santos JV, Batista ER, Carvalho AMX, Carneiro MAC, Siqueira JO. Pelletization and fertilization improve the root environment in soil affected by iron mining tailings. *Water, Air, Soil Pollut*. 2023;234:538.
- Borges PHD, Silva AOD, Santos JVD, Carvalho AMXD, Carneiro MAC, Siqueira JO. Soil conditioners improve the environment for grass growth in iron mining tailings of the Fundão dam failure. *Ciência e Agrotecnologia*. 2024;48.
- BRADY NC.; WEIL RR. Elementos da natureza e propriedades dos solos. Tradução técnica: Igo Fernando Lepesch. 2. ed. Porta Alegre: Bookman, 2013. 686 p.
- Bravo-Garza MR, BRYAN RB, VORONEY P. Influence of wetting and drying cycles and maize residue addition on the formation of water stable aggregates in Vertisols. *Geoderma*. 2009;151(3-4):150-156.

Bucka FB, KÖLBL A, Uteau D, Peth S, Kögel-Knabner I. Organic matter input determines structure development and aggregate formation in artificial soils. *Geoderma*. 2019;354:113881.

Dias Junior MS, Gomes AN, Andrade SC, Azevedo MR. Avaliação da sustentabilidade da estrutura de Argissolos em sistemas florestais. *Cerne*. 2002;8(1):103-114.

Dias Júnior MS. Compression of three soils under long-term tillage and wheel traffic. 1994. 114 p. Tese (Doutorado) – Michigan State University, East Lansing, 1994.

Dias Júnior MS, Pierce FJ. A simple procedure for estimating preconsolidation pressure from soil compression curves. *Soil Technol*. 1995;8:139-151.

Donagemma GK, Viana JHM, Almeida BG, Ruiz HA, Klein VA, Dechen SCF, Fernandes RBA. Análise granulométrica. In: TEIXEIRA PC, DONAGEMMA GK, FONTANA A, TEIXEIRA WG, editores. Manual de métodos de análise de solo. 3. ed. rev. e ampl. Brasília, DF: Embrapa; 2017. p. 95-116.

Hallett PD, Gaskin RE. An introduction to soil water repellency. In: Proceedings of the 8th International Symposium on Adjuvants for Agrochemicals (ISAA2007), International Society for Agrochemical Adjuvants, Columbus, Ohio, USA, 2007. Scientific Reports. 2017;7(1):1-13.

IBAMA. Laudo Técnico Preliminar-Impactos ambientais decorrentes do desastre envolvendo o rompimento da barragem de Fundão, em Mariana. Minas Gerais. 2015. Disponível em:

<https://www.ibama.gov.br/phocadownload/barragemdefundao/laudos/laudo_tecnico_preliminar_ibama.pdf>. Acesso em: 5 março 2022.

Iori P, Silva RBD, Dias Júnior MS, Lima JMD. Pressão de preconsolidação como ferramenta de análise da sustentabilidade estrutural de classes de solos com diferentes usos. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 2012, 36:1448–1456.

Omachi CY, Siani Smoo, Chagas FM, Mascagni ML, Cordeiro M, Garcia GD, Thompson CC, Siegle E, Thompson FL. Atlantic Forest loss caused by the world's largest tailing dam collapse (Fundão Dam, Mariana, Brazil). *Remote Sens. Appl. Soc. Environ*. 2018;12:30-4.

Páez BCMD, Dias Junior MDS, Severiano EDC, Carneiro MAC, Martins PCC. Propriedades físicas limitantes de Tecossolos formados pelo rompimento da barragem de Fundão, Minas Gerais, Brasil. *Rev. Bras. Cienc. Solo*. 2024;48.

Pauly GFE, Perina FC, Yamamoto FY, Kim BSM, Trevizani TH, Cruz ACF, Ribeiro CC, Menezes L, Figueira RCL, Abessa DMS. Five years after the collapse of the Fundão Dam: lessons from temporal monitoring of chemistry and acute toxicity. *Environ. Monit. Assess.* 2024;196(3):247.

Piccolo A, Pietramellara G, Mbagwu JSC. Use of humic substances as soil conditioners to increase aggregate stability. *Geoderma*. 1997;75:267–277. doi:10.1016/S0016-7061(96)00092-4.

Piccolo A, Mbagwu JSC. Role of hydrophobic components of soil organic matter in soil aggregate stability. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 1999;63(6):1801-1810.

Pires JMM, Lena JC, Machado CC, Pereira RS. Potencial poluidor de resíduo sólido da Samarco Mineração: estudo de caso da barragem de Germano. *Rev. Árvore*. 2003;27:393-397.

Pronk GJ, Heister K, Ding GC, Smalla K, Kögel-Knabner I. Development of biogeochemical interfaces in an artificial soil incubation experiment; aggregation and formation of organo-mineral associations. *Geoderma*. 2012;189-190:585–594.

Silva AC, Cavalcante LCD, Fabris JD, Franco JR, Barral UM, Farnezi MMM, Viana AJS, Ardisson JD, Eugenio L, Fernandez-Outon L, Lara LRS, Stumpf HO, Barbosa JBS, Silva LC. Chemical, mineralogical and physical characteristics of a material accumulated on the river margin from mud flowing from the collapse of the iron ore tailings dam in Bento Rodrigues, Minas Gerais, Brazil. *Rev. Espinhaço*. 2016;5:44-53.

Segura FR, Nunes EA, Paniz FP, Paulelli ACC, Rodrigues GB, Braga GÚL, Batista BL. Potential risks of the residue from Samarco's mine dam burst (Bento Rodrigues, Brazil). *Environ. Pollut.* 2016;218:813-825.

SULLIVAN LA. Soil organic matter, air encapsulation and water stable aggregation. *J. Soil Sci.*, 1990; 41:529-534.

Tognella M; Falqueto A; Espinoza H; Gontijo I; Gontijo A; Fernandes A; Schmildt E; Soares M; Chaves F; Schmidt A; Lopes D; Barcelos U; D'addazio V; Lima K; Pascoalini S; Paris J; Brites Júnior N; Porto L; Almeida Filho E; Oliveira C; Leopoldo R; Leite S; Berribilli M; Vieiras S; Rosa M; Sá F; Neto R; Ghisolfi R; Castro M; Rigo D; Tosta V; Albino J.

Mangroves as traps for environmental damage to metals: The case study of the Fundão Dam. *Sci. Total Environ.* 2022;806:150452.

Viana JHM, Teixeira WG, Donagemma GK. Densidade de partículas. In: Teixeira PC, Donagemma GK, Fontana A, Teixeira WG, editors. *Manual de métodos de análise de solo*. 3. ed. rev e ampl. Brasília, DF: Embrapa; 2017. p. 76-81.

Woche SK, Goebel MO, Kirkham MB, Horton R, Van Der Ploeg RR, Bachmann J. Contact angle of soils as affected by depth, texture, and land management. *Eur. J. Soil Sci.* 2005;56(2):239-251.

Zanchi CS, Souza EP, Silva RV, Freitas TS, Alves GS. Pre-cultivation with herbaceous plants assists in the revegetation process of iron mining tailings with *Enterolobium contortisiliquum*. *Water, Air, & Soil Pollution.* 2022;233:231.

ANEXOS

1 - Formação da amostra de Tecnosolo de Mariana (MG), em laboratório.



Fonte: do autor.

2 - Instalação dos experimentos de incubação e ciclos de umedecimentos e secagem (a); umedecimento das amostras por capilaridade (b).



Fonte: do autor

3- Amostras de Tecnossolo umedecidas, após 72 ciclos de umedecimento e secagem, evidenciando a barreira de proteção do composto hidrofóbico (manchas) à água.



Fonte: do autor.

4 - Tabela 1: comparação todos modelos de capacidade de suporte de carga ($\sigma_p = a + b\psi$) (DIAS JUNIOR, 1994) do Tecnossolo de Mariana (MG), para diferentes doses dos compostos orgânicos (amido e ácido esteárico) e diferentes períodos de incubação (180, 365 e 547 dias), pelo procedimento Snedecor e Cochran (1989).

Tempo de incubação em dias (d)	Contrastes dos tratamentos			F	F		Decisão
					Coefficiente linear (a)	Coefficiente angular (b)	
180	Ctrl	x	AE_2,5	H	**	ns	Não agrupar
	Ctrl	x	AE_5,0	H	ns	*	Não agrupar
	Ctrl	x	AE_10,0	H	ns	ns	Agrupar
	Ctrl	x	Am_2,5	H	ns	ns	Agrupar
	Ctrl	x	Am_5,0	H	ns	ns	Agrupar
	Ctrl	x	Am_10,0	H	*	ns	Não agrupar
	AE_2,5	x	Am_2,5	H	ns	ns	Agrupar
	AE_5,0	x	Am_5,0	H	*	ns	Não agrupar
	AE_10,0	x	Am_10,0	H	ns	ns	Agrupar
365	Ctrl	x	AE_2,5	H	ns	ns	Agrupar
	Ctrl	x	AE_5,0	H	ns	ns	Agrupar
	Ctrl	x	AE_10,0	H	ns	ns	Agrupar
	Ctrl	x	Am_2,5	H	ns	ns	Agrupar
	Ctrl	x	Am_5,0	H	ns	ns	Agrupar
	Ctrl	x	Am_10,0	H	*	ns	Não agrupar
	AE_2,5	x	Am_2,5	H	**	ns	Não agrupar
	AE_5,0	x	Am_5,0	H	ns	ns	Agrupar
	AE_10,0	x	Am_10,0	H	*	*	Não agrupar
547	Ctrl	x	AE_2,5	H	ns	ns	Agrupar
	Ctrl	x	AE_5,0	H	ns	ns	Agrupar
	Ctrl	x	AE_10,0	H	ns	ns	Agrupar
	Ctrl	x	Am_2,5	H	ns	ns	Agrupar
	Ctrl	x	Am_5,0	H	ns	*	Não agrupar
	Ctrl	x	Am_10,0	H	ns	ns	Agrupar
	AE_2,5	x	Am_2,5	H	*	ns	Não agrupar
	AE_5,0	x	Am_5,0	H	ns	ns	Agrupar
	AE_10,0	x	Am_10,0	H	ns	ns	Agrupar
365 x 180	Ctrl_365d	x	Ctrl_180d	H	ns	ns	Agrupar
	AE_2,5_365d	x	AE_2,5_180d	H	**	**	Não agrupar
	AE_5,0_365d	x	AE_5,0_180d	H	ns	ns	Agrupar
	AE_10_365d	x	AE_10_180d	H	ns	ns	Agrupar
	Am_2,5_365d	x	Am_2,5_180d	H	ns	**	Não agrupar
	Am_5,0_365d	x	Am_5,0_180d	H	ns	ns	Agrupar
	Am_10,0_365d	x	Am_10,0_180d	H	ns	ns	Agrupar
547 x 180	Ctrl_547d	x	Ctrl_180d	H	ns	ns	Agrupar
	AE_2,5_547d	x	AE_2,5_180d	H	**	**	Não agrupar
	AE_5,0_547d	x	AE_5,0_180d	H	ns	ns	Agrupar
	AE_10_547d	x	AE_10_180d	H	ns	ns	Agrupar
	Am_2,5_547d	x	Am_2,5_180d	H	ns	ns	Agrupar
	Am_5,0_547d	x	Am_5,0_180d	H	ns	ns	Agrupar
	Am_10_547d	x	Am_10,0_180d	H	ns	ns	Agrupar
547 x 365	Ctrl_547d	x	Ctrl_365d	H	ns	ns	Agrupar
	AE_2,5_547d	x	AE_2,5_365d	H	ns	ns	Agrupar
	AE_5,0_547d	x	AE_5,0_365d	H	ns	ns	Agrupar
	AE_10_547d	x	AE_10_365d	H	ns	ns	Agrupar
	Am_2,5_547d	x	Am_2,5_365d	H	ns	ns	Agrupar
	Am_5,0_547d	x	Am_5,0_365d	H	ns	ns	Agrupar
	Am_10_547d	x	Am_10,0_365d	H	ns	ns	Agrupar

Tratamentos: Ctrl (controle); AE (ácido esteárico); Am (amido); doses do composto orgânico (2,5; 5,0 ;10,0 g kg⁻¹). F: teste F para homogeneidade de variância e coeficientes ajustados; H: homogêneo; *: significativo a 5%; **: significativo a 1%; ns: não significativo.

5 – Tabela 2: comparação todos modelos de capacidade de suporte de carga ($\sigma_p = a + b\psi$) (DIAS JUNIOR, 1994) pelo procedimento Snedecor e Cochran (1989) do Tecnossolo de Mariana (MG), tratado com compostos orgânicos em diferentes graus de hidrofobicidade e doses, submetidos a 26, 52 e 78 ciclos de US.

Ciclos de umedecimento e secagem (c)	Contrastes dos tratamentos			F	F		Decisão
					Coefficiente linear (a)	Coefficiente angular (b)	
26 (180 dias)	Ctrl	x	AE_2,5	H	ns	*	Não agrupar
	Ctrl	x	AE_5,0	H	ns	ns	Agrupar
	Ctrl	x	AE_10,0	H	ns	ns	Agrupar
	Ctrl	x	Am_2,5	H	ns	ns	Agrupar
	Ctrl	x	Am_5,0	H	ns	ns	Agrupar
	Ctrl	x	Am_10,0	H	ns	ns	Agrupar
	AE_2,5	x	Am_2,5	H	ns	*	Não agrupar
	AE_5,0	x	Am_5,0	H	ns	ns	Agrupar
	AE_10,0	x	Am_10,0	H	ns	ns	Agrupar
52 (365 dias)	Ctrl	x	AE_2,5	H	ns	ns	Agrupar
	Ctrl	x	AE_5,0	H	ns	ns	Agrupar
	Ctrl	x	AE_10,0	H	ns	ns	Agrupar
	Ctrl	x	Am_2,5	H	ns	ns	Agrupar
	Ctrl	x	Am_5,0	H	ns	ns	Agrupar
	Ctrl	x	Am_10,0,0	H	ns	ns	Agrupar
	AE_2,5	x	Am_2,5	H	ns	ns	Agrupar
	AE_5,0	x	Am_5,0	H	ns	ns	Agrupar
	AE_10,0	x	Am_10,0	H	ns	ns	Agrupar
78 (547 dias)	Ctrl	x	AE_2,5	H	*	ns	Não agrupar
	Ctrl	x	AE_5,0	H	**	ns	Não agrupar
	Ctrl	x	AE_10,0	H	**	ns	Não agrupar
	Ctrl	x	Am_2,5	H	ns	ns	Agrupar
	Ctrl	x	Am_5,0	H	**	*	Não agrupar
	Ctrl	x	Am_10,0,0	H	ns	ns	Agrupar
	AE_2,5	x	Am_2,5	H	ns	*	Não agrupar
	AE_5,0	x	Am_5,0	H	ns	ns	Agrupar
	AE_10,0	x	Am_10,0	H	**	ns	Não agrupar
52x26	Ctrl_52c	x	Ctrl_26c	H	ns	ns	Agrupar
	AE_2,5_52c	x	AE_2,5_26c	H	ns	*	Não agrupar
	AE_5,0_52c	x	AE_5,0_26c	H	ns	ns	Agrupar
	AE_10,0_52c	x	AE_10,0_26c	H	ns	ns	Agrupar
	Am_2,5_52c	x	Am_2,5_26c	H	ns	ns	Agrupar
	Am_5,0_52c	x	Am_5,0_26c	H	ns	ns	Agrupar
	Am_10,0_52c	x	Am_10,0_26c	H	ns	ns	Agrupar
78x26	Ctrl_78c	x	Ctrl_26c	H	ns	ns	Agrupar
	AE_2,5_78c	x	AE_2,5_26c	H	ns	ns	Agrupar
	AE_5,0_78c	x	AE_5,0_26c	H	ns	ns	Agrupar
	AE_10,0_78c	x	AE_10,0_26c	H	*	ns	Não agrupar
	Am_2,5_78c	x	Am_2,5_26c	H	ns	**	Não agrupar
	Am_5,0_78c	x	Am_5,0_26c	H	ns	ns	Agrupar
	Am_10_78c	x	Am_10_26c	H	ns	ns	Agrupar
78 x 52	Ctrl_78c	x	Ctrl_52c	H	*	ns	Não agrupar
	AE_2,5_78c	x	AE_2,5_52c	H	ns	ns	Agrupar
	AE_5,0_78c	x	AE_5,0_52c	H	ns	ns	Agrupar
	AE_10,0_78c	x	AE_10,0_26c	H	ns	ns	Agrupar
	Am_2,5_78c	x	Am_2,5_52c	H	ns	ns	Agrupar
	Am_5,0_78c	x	Am_5,0_52c	H	ns	ns	Agrupar
	Am_10_78c	x	Am_10_52c	H	ns	ns	Agrupar

Tratamentos: Ctrl (controle); AE (ácido esteárico); Am (amido); doses do composto orgânico (2,5; 5,0 ;10,0 g kg⁻¹). F: teste F para homogeneidade de variância e coeficientes ajustados; H: homogêneo; *: significativo a 5%; **: significativo a 1%; ns: não significativo.

6 – Tabela 3 : médias dos valores de pressões de pré-consolidação (kPa) obtidas pelo método de Dias Junior e Pierce (1995) e suas respectivas tensões (kPa) do Tecnossolo de Mariana (MG), para diferentes doses dos compostos orgânicos (amido e ácido esteárico) e diferentes períodos de incubação (180, 365 e 547 dias).

Tempo (dias)	Tratamento	Tensão (kPa)		
		10	100	1500
		Pressão de pré-consolidação (kPa)		
180	CTRL	139,60	125,39	261,56
	AE_2,5	182,63	173,63	268,56
	AE_5,0	156,69	152,92	234,26
	AE_10,0	154,51	134,13	246,76
	Am_2,5	141,16	146,22	231,37
	Am_5,0	148,29	135,74	280,06
	Am_10,0	171,16	144,32	266,54
365	CTRL	134,72	117,07	262,89
	AE_2,5	125,28	125,22	270,11
	AE_5,0	132,26	128,80	243,98
	AE_10,0	154,21	134,59	265,27
	Am_2,5	163,51	130,84	357,46
	Am_5,0	148,66	149,93	249,45
	Am_10,0	158,36	158,44	243,73
547	CTRL	127,88	150,65	272,94
	AE_2,5	122,54	133,65	254,69
	AE_5,0	139,48	146,54	283,69
	AE_10,0	116,96	148,58	253,97
	Am_2,5	135,93	153,18	269,02
	Am_5,0	148,58	139,76	227,73
	Am_10,0	144,34	148,04	239,44

7 - Tabela 4: Médias dos valores de pressões de pré-consolidação (kPa) obtidas pelo método de Dias Junior e Pierce (1995) e suas respectivas tensões (kPa) do Tecnossolo de Mariana (MG), para diferentes doses dos compostos orgânicos (amido e ácido esteárico) e ciclos de umedecimento e secagem (26, 52 e 78).

Ciclos de umedecimento e secagem	Tratamento	Tensão (kPa)		
		10	100	1500
Pressão de pré-consolidação (kPa)				
26	CTRL	147,29	147,12	257,63
	AE_2,5	143,50	136,91	308,85
	AE_5,0	171,37	132,60	273,95
	AE_10,0	148,61	144,17	281,01
	Am_2,5	133,93	141,92	240,80
	Am_5,0	166,93	125,53	249,83
	Am_10,0	142,98	160,58	271,73
52	CTRL	145,36	161,78	280,86
	AE_2,5	151,70	152,66	252,55
	AE_5,0	183,05	156,29	308,64
	AE_10,0	122,12	169,22	331,21
	Am_2,5	143,75	135,23	277,85
	Am_5,0	187,67	139,22	295,78
	Am_10,0	130,28	131,04	260,79
78	CTRL	125,85	144,90	272,65
	AE_2,5	159,63	148,61	292,46
	AE_5,0	146,17	190,29	326,96
	AE_10,0	181,66	172,69	316,48
	Am_2,5	122,77	142,12	327,63
	Am_5,0	174,38	157,28	273,94
	Am_10,0	146,14	131,48	267,01

8 - Planilha de controle de dados iniciais dos experimentos

Página Inicial Inserir Layout da Página Fórmulas Dados Revisão Exibir Ajuda Acrobat

Colar

Calibri | 11 | A⁺ A⁻
N *I* S [Borda] [Cor] [Fundo]

Geral
 % 000 000 000

Formatação Condicional Formatar como Tabela Estilos de Célula

Inserir Excluir Formatar

Somatório Classificar e Filtrar

Área de Transferência Fonte Alinhamento Número Estilos Células

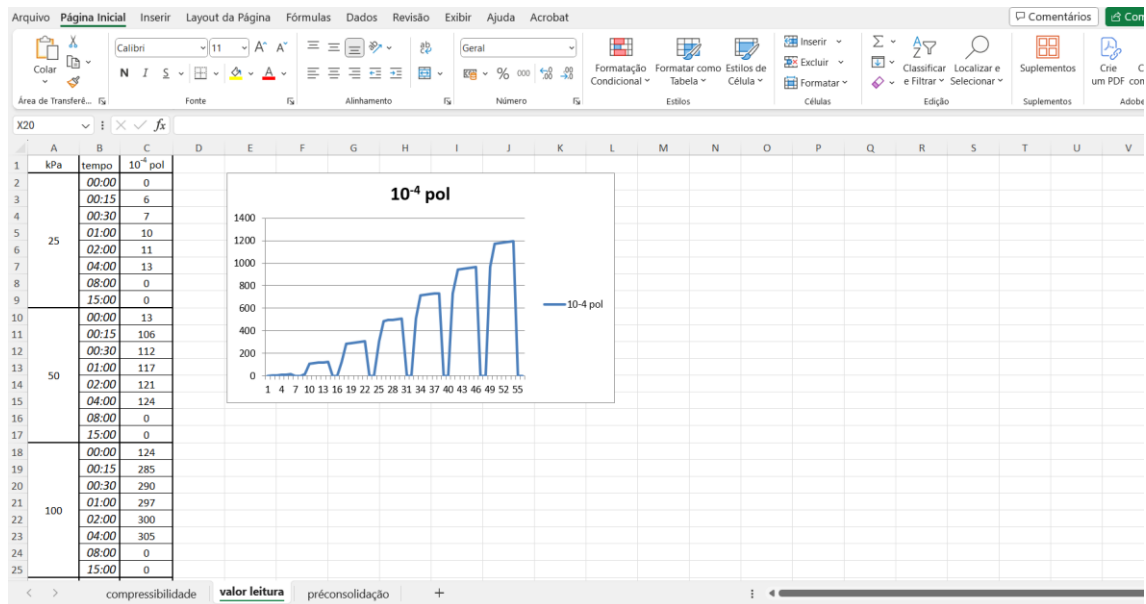
S11 fx

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P
1	Data de início			20/05/2022												
2	Anel	Bandeja	Exp.	Trat	Dias	vazio (g)	H (mm)	d (mm)	v + elás + pano (g)	v + elás + pano + solo (g)	SOLO (g)	Vol (cm³)	elás + pano (g)	Ds	m água 10Kpa (mL)	m média água (mL)
6	4	3	1	Incub	180	56,34	25,89	66,33	58,04	208,01	149,97	89,46	1,70	1,68	31,30	30,55
9	7	3	1	Incub	180	55,78	26,39	63,23	57,31	205,20	147,89	82,87	1,53	1,78	30,86	30,55
11	9	3	1	Incub	180	55,78	25,75	63,22	58,38	201,56	143,18	80,83	2,60	1,77	29,88	30,55
14	12	3	1	Incub	180	53,22	24,86	63,41	55,00	213,56	158,56	78,51	1,78	2,02	33,09	30,55
16	14	3	1	Incub	180	56,41	25,57	63,12	58,06	207,56	149,50	80,01	1,65	1,87	31,20	30,55
21	19	3	1	Incub	180	55,63	25,51	63,52	57,40	202,90	145,50	80,84	1,77	1,80	30,37	30,55
29	27	3	1	Incub	180	55,11	25,39	63,38	56,74	199,24	142,50	81,10	1,63	1,78	29,74	30,55
31	29	3	1	Incub	180	57,04	25,97	63,40	58,72	207,11	148,39	81,99	1,68	1,81	30,97	30,55
35	33	3	1	Incub	180	57,36	25,58	63,46	58,95	205,55	146,60	80,91	1,59	1,81	30,60	30,55
36	34	3	1	Incub	180	52,68	25,41	63,78	54,32	202,34	148,02	81,18	1,64	1,82	30,89	30,55
43	41	3	1	Incub	180	55,39	25,54	63,52	56,90	197,18	140,28	80,93	1,51	1,73	29,28	30,55
56	54	3	1	Incub	180	57,66	25,89	63,23	59,12	209,20	150,08	81,30	1,46	1,85	31,32	30,55
60	58	3	1	Incub	180	58,38	26,39	63,49	59,82	218,34	158,52	83,55	1,44	1,90	33,08	30,55
74	72	3	1	Incub	180	54,39	25,09	63,17	56,08	200,96	144,88	78,63	1,69	1,84	30,24	30,55
79	77	3	2	Incub	365	55,49	25,47	62,86	57,20	192,77	135,57	79,04	1,71	1,72	28,29	30,22
91	89	3	2	Incub	365	56,73	25,75	63,13	58,33	204,71	146,38	80,60	1,60	1,82	30,55	30,22

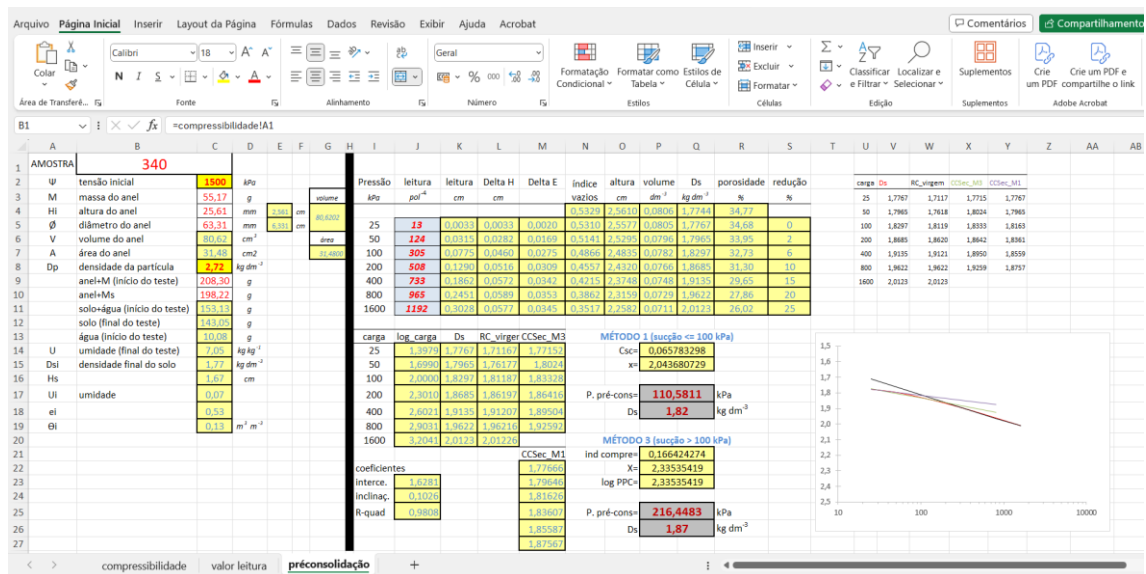
9 - Planilha para cálculo da pressão de pré-consolidação, com os valores obtidos na compressibilidade, seguindo o método de Dias Junior e Pierce (1995).

[illegible]

10- Planilha para cálculo da pressão de pré-consolidação com os valores de leitura.



11- Planilha para cálculo da pressão de pré-consolidação seguindo o método de Dias Junior e Pierce (1995).



12 - Planilha para avaliação de contrastes de covariância, de acordo com o procedimento Snedecor e Cochran (1989).

Copiar os pontos do modelo AQUI

365dias_US_Ctr				365dias_US_AE_10.0			
Umidade 1 (X)	PPC1 (Y)	Umidade 2 (X)	PPC2 (Y)	Umidade 1 (X)	LOG PPC1 (Y)	Umidade 2 (X)	LOG PPC2 (Y)
10	176.26	10	114.82	10,0000	2,25	10,0000	2,06
10	139.24	10	107.91	10,0000	2,14	10,0000	2,03
10	121.98	10	143.64	10,0000	2,09	10,0000	2,16
10	172.91	100	178.71	10,0000	2,24	100,0000	2,25
10	109.26	100	193.97	10,0000	2,04	100,0000	2,29
10	152.55	100	134.98	10,0000	2,18	100,0000	2,13
100	165.82	1500	342.46	100,0000	2,22	1500,0000	2,53
100	145.01	1500	337.49	100,0000	2,16	1500,0000	2,53
100	152.42	1500	313.88	100,0000	2,18	1500,0000	2,50
100	182.34			100,0000	2,26		
100	158.34			100,0000	2,20		
100	166.73			100,0000	2,22		
1500	299.31			1500,0000	2,48		
1500	290.56			1500,0000	2,46		
1500	283.31			1500,0000	2,45		
1500	287.51			1500,0000	2,46		
1500	274.79			1500,0000	2,44		
1500	249.68			1500,0000	2,40		

365dias_US_Ctr	365dias_US_AE_10.0
18	9

n =

13- Planilha para avaliação de contrastes de covariância, de acordo com o procedimento Snedecor e Cochran (1989) – continuação.

[illegible]

14 - Planilha para criação dos modelos de capacidade de suporte de carga proposto por Dias Junior (1994), utilizando software Sigma Plot 14.

	1	2	3	4	5	6	7-x column	8-y column	9-x column 1	10-y column 1	11-x column 2	12-y column 2	13-x column 3	14-y column 3	15-x column 4	16-y column 4
1		Inc_Am_5,0 + AE_5,0	Inc_AE_2,5	Inc_Am_10,0	Inc_AE_10,0		10,0000	136,7188	10,0000	141,4032	10,0000	120,8896	10,0000	155,8290	10,0000	141,0928
2	10,0000	148,0000	165,5100	125,8900	158,4136	139,8620	15,8203	137,1476	15,8203	142,2416	15,8203	121,4714	15,8203	156,1717	15,8203	141,5746
3	10,0000	148,8000	159,0900	149,4400	143,0433	178,4512	21,6406	137,5763	21,6406	143,0801	21,6406	122,0532	21,6406	156,5144	21,6406	142,0564
4	10,0000	149,1300	165,9300	100,4900	172,6087	145,1066	27,4609	138,0050	27,4609	143,9185	27,4609	122,6349	27,4609	156,8572	27,4609	142,5382
5	10,0000	145,2200					33,2813	138,4338	33,2813	144,7569	33,2813	123,2167	33,2813	157,1999	33,2813	143,0199
6	10,0000	112,5600					39,1016	138,8625	39,1016	145,5954	39,1016	123,7985	39,1016	157,5426	39,1016	143,5017
7	10,0000	139,0000					44,9219	139,2913	44,9219	146,4338	44,9219	124,3802	44,9219	157,8853	44,9219	143,9835
8	100,0000	142,8200	116,9500	116,7500	132,8518	151,3954	50,7422	139,7200	50,7422	147,2722	50,7422	124,9620	50,7422	158,2280	50,7422	144,4653
9	100,0000	127,9200	147,1700	139,0000	162,1728	129,7298	56,5625	140,1487	56,5625	148,1107	56,5625	125,5438	56,5625	158,5707	56,5625	144,9471
10	100,0000	179,0500	128,4000	119,9100	180,2950	122,6323	62,3828	140,5775	62,3828	148,9491	62,3828	126,1255	62,3828	158,9134	62,3828	145,4289
11	100,0000	134,7200					68,2031	141,0062	68,2031	149,7875	68,2031	126,7073	68,2031	159,2562	68,2031	145,9106
12	100,0000	139,5100					74,0234	141,4350	74,0234	150,6260	74,0234	127,2890	74,0234	159,5989	74,0234	146,3924
13	100,0000	112,1700					79,8438	141,8637	79,8438	151,4644	79,8438	127,8708	79,8438	159,9416	79,8438	146,8742
14	1500,0000	280,7500	398,0000	260,1500	260,9019	270,9640	85,6641	142,2924	85,6641	152,3028	85,6641	128,4526	85,6641	160,2843	85,6641	147,3560
15	1500,0000	215,2600	304,1700	287,1800	225,6664	271,4275	91,4844	142,7212	91,4844	153,1413	91,4844	129,0343	91,4844	160,6270	91,4844	147,8378
16	1500,0000	252,3500	370,2200	262,9800	244,6094	253,4263	97,3047	143,1499	97,3047	153,9797	97,3047	129,6161	97,3047	160,9697	97,3047	148,3196
17	1500,0000	249,6200					103,1250	143,5787	103,1250	154,8181	103,1250	130,1979	103,1250	161,3124	103,1250	148,8013
18	1500,0000	215,6000					108,9453	144,0074	108,9453	155,6566	108,9453	130,7796	108,9453	161,6551	108,9453	149,2831
19	1500,0000	266,7200					114,7656	144,4361	114,7656	156,4950	114,7656	131,3614	114,7656	161,9979	114,7656	149,7649
20							120,5859	144,8649	120,5859	157,3334	120,5859	131,9432	120,5859	162,3406	120,5859	150,2467
21							126,4063	145,2936	126,4063	158,1719	126,4063	132,5249	126,4063	162,6833	126,4063	150,7285
22							132,2266	145,7223	132,2266	159,0103	132,2266	133,1067	132,2266	163,0260	132,2266	151,2103
23							138,0469	146,1511	138,0469	159,8487	138,0469	133,6885	138,0469	163,3687	138,0469	151,6921
24							143,8672	146,5798	143,8672	160,6872	143,8672	134,2702	143,8672	163,7114	143,8672	152,1738
25							149,6875	147,0086	149,6875	161,5256	149,6875	134,8520	149,6875	164,0541	149,6875	152,6556
26							155,5078	147,4373	155,5078	162,3640	155,5078	135,4338	155,5078	164,3968	155,5078	153,1374
27							161,3281	147,8660	161,3281	163,2025	161,3281	136,0155	161,3281	164,7396	161,3281	153,6192
28							167,1484	148,2948	167,1484	164,0409	167,1484	136,5973	167,1484	165,0823	167,1484	154,1010
29							172,9688	148,7235	172,9688	164,8793	172,9688	137,1791	172,9688	165,4250	172,9688	154,5828
30							178,7891	149,1523	178,7891	165,7178	178,7891	137,7608	178,7891	165,7677	178,7891	155,0645
31							184,6094	149,5810	184,6094	166,5562	184,6094	138,3426	184,6094	166,1104	184,6094	155,5463
32							190,4297	150,0097	190,4297	167,3946	190,4297	138,9244	190,4297	166,4531	190,4297	156,0281
33							196,2500	150,4385	196,2500	168,2331	196,2500	139,5061	196,2500	166,7958	196,2500	156,5099

15- Gráfico do modelos de capacidade de suporte de carga proposto por Dias Junior (1994), aplicados ao Tecnossolo, utilizando software Sigma Plot 14

