

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**  
**FACULDADE DE TECNOLOGIA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL**

**EFEITOS DA ESTABILIZAÇÃO POLIMÉRICA NO  
COMPORTAMENTO MECÂNICO DE SOLO TROPICAL ARGILOSO  
SOB CARREGAMENTOS ESTÁTICOS E CÍCLICOS**

**DANIEL TULER PASSOS**

**ORIENTADOR: JOSÉ WILSON DOS SANTOS FERREIRA**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM GEOTECNIA**  
**PUBLICAÇÃO: G.DM-433/2026**

**BRASÍLIA / DF: 26 DE FEVEREIRO DE 2026**

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**  
**FACULDADE DE TECNOLOGIA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL**

**EFEITOS DA ESTABILIZAÇÃO POLIMÉRICA NO**  
**COMPORTAMENTO MECÂNICO DE SOLO TROPICAL ARGILOSO**  
**SOB CARREGAMENTOS ESTÁTICOS E CÍCLICOS**

**DANIEL TULER PASSOS**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE**  
**ENGENHARIA CIVIL DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS**  
**REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE.**

**APROVADA POR:**

---

**Prof. JOSÉ WILSON DOS SANTOS FERREIRA, Dr. (UnB)**  
**(ORIENTADOR)**

---

**Prof. MICHÉLE DAL TOÉ CASAGRANDE, Dra. (UnB)**  
**(EXAMINADORA INTERNA)**

---

**Prof. GIOVANNA MONIQUE ALELVAN, Dra. (UFMG)**  
**(EXAMINADORA EXTERNA)**

**BRASÍLIA / DF: 26 DE FEVEREIRO DE 2026**

## FICHA CATALOGRÁFICA

PASSOS, DANIEL TULER

Efeitos da estabilização polimérica no comportamento mecânico de solo tropical argiloso sob carregamentos estáticos e cíclicos

(Distrito Federal) 2026.

xii, 70 p., 210x297 mm (ENC/FT/UnB, Mestre, Geotecnia, 2026)

Dissertação Mestrado – Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental

- |                     |                             |
|---------------------|-----------------------------|
| 1. Solo Tropical    | 2. Estabilização Polimérica |
| 3. Ensaio Triaxiais | 4. Ensaio de pavimentação   |
| I. ENC/FT/UnB       | II. Mestre                  |

## REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

PASSOS, D. T. (2026) Efeitos da estabilização polimérica no comportamento mecânico de solo tropical argiloso sob carregamentos estáticos e cíclicos, Dissertação de Mestrado, Publicação G.DM-433/2026, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 70 p.

## CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Daniel Tuler Passos

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO: Efeitos da Estabilização Polimérica no Comportamento Mecânico de Solo Tropical Argiloso sob Carregamentos Estáticos e Cíclicos

GRAU: Mestre

ANO: 2026

É concedida à Universidade de Brasília a permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.

---

Daniel Tuler Passos

Universidade de Brasília, Secretaria de Coordenação de Pós-Graduação em Geotecnia  
Campus Darcy Ribeiro, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Prédio SG-12,  
Universidade de Brasília. CEP: 70910-900 – Brasília, DF – Brasil  
danieltpassos@gmail.com

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a Deus, por me dar força e amparo na jornada. Nos momentos de dificuldade sei que Ele esteve a meu lado.

A minha família, que me apoiou incondicionalmente em todos os aspectos de vida pessoal, acadêmica e profissional. Mesmo em momentos em que tudo parecia uma loucura, embarcaram comigo e deram todo apoio possível.

A Ana Júlia, minha noiva, que me deu amparo e carinho, além de muitas horas de consultorias técnicas e grande apoio no laboratório. Sem seu companheirismo eu não teria chegado nem na metade do caminho.

Aos amigos de laboratório, que me deram muita ajuda na realização dos ensaios, além de tornarem o ambiente colaborativo e favorável para a discussão de ideias.

A todos os funcionários, técnicos e professores da Universidade de Brasília, que contribuíram direta ou indiretamente com a pesquisa. Que mais pessoas possam ter as oportunidades que eu tive.

A meu orientador, José Wilson, por responder todas as dúvidas que tive, relacionadas ou não à pesquisa desenvolvida. Pelo apoio e descontração em momentos tensos e pela grande ajuda para tirar o melhor neste trabalho.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) sob Processo 405313/2025-0 do Projeto CNPq/MCTI/FNDCT – Chamada Universal nº 44/2024 e à Fundação de Apoio à Pesquisa do Distrito Federal (FAP/DF) sob Projeto SEI-GDF nº 00193-00001386/2024-04.

## RESUMO

A busca por alternativas sustentáveis no estudo de estabilização de solos motiva a investigação de novos agentes químicos, como o uso de polímeros. Entretanto, há lacunas na compreensão dos mecanismos de interação solo-polímero sob carregamentos estáticos e cíclicos ao se empregar solos tropicais finos. Assim, o presente trabalho investiga os efeitos da adição de polímero no comportamento mecânico de solo tropical argiloso, visando sua aplicação em obras geotécnicas. A primeira etapa da metodologia englobou caracterização física, química, térmica e mineralógica do solo e polímero (pH, DRX, FRX, FTIR, TG/DSC, ICP-OES, CHN), seguida pela definição das condições experimentais, por meio de ensaios de compactação e de resistência à compressão simples (RCS) com e sem imersão do compósito com diferentes teores de polímero em relação a massa de água e diferentes períodos de cura. Na terceira etapa, estudou-se o comportamento mecânico e microestrutural do solo e do compósito, por meio de ensaios triaxiais estáticos e cíclicos, Índice de Suporte Califórnia (ISC), Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e Porosimetria por Intrusão de Mercúrio (PIM). A partir dos resultados, classificou-se o solo como laterítico argiloso (LG'), composto majoritariamente por caulinita, gibbsita e hematita, e identificou-se o polímero como estireno, composto por 71,96% de carbono e suscetível a degradação térmica. Em decorrência do pH apresentado pelo solo e a predominância de óxidos de alumínio, observou-se redução da interação e da adesão polimérica. A dosagem ótima do polímero foi definida em 50% em relação à massa de água e cura ao ar de 14 dias, condições que proporcionaram os maiores ganhos de RCS. Ainda assim, evidenciou-se a sensibilidade do compósito quando rompido na condição pós-imersão. Sob baixas tensões confinantes, a estabilização resultou em aumento do intercepto coesivo e redução no ângulo de atrito e, em médias tensões, observou-se processo contrário. Sob carregamentos cíclicos, o Módulo de Resiliência do solo estabilizado demonstrou comportamento similar a materiais granulares, com rigidez governada pelo estado de tensões globais e menor sensibilidade à tensão desviadora. A análise de Deformação Permanente indicou que o material estabilizado apresentou maior rigidez estrutural, menor deformabilidade e menor dependência das tensões confinantes em comparação ao solo natural. As análises microestruturais confirmaram a formação de filmes poliméricos e pontes entre as partículas, promovendo a agregação e a estabilidade da matriz do solo. Conclui-se que a estabilização polimérica alterou positivamente as propriedades geotécnicas do solo tropical, tornando-o uma alternativa tecnicamente viável e eficiente para obras geotécnicas.

## ABSTRACT

The search for sustainable alternatives in soil stabilization has intensified interest in the investigation of new chemical agents, such as polymers. However, there are gaps in the understanding of soil-polymer interaction mechanisms under static and cyclic loading when employing fine-grained tropical soils. Thus, this study investigates the effects of polymer addition on the mechanical performance of a tropical clayey soil, aiming for its application in geotechnical works. The first stage of the methodology encompassed the physical, chemical, thermal, and mineralogical characterization of the soil and polymer (pH, XRD, XRF, FTIR, TG/DSC, ICP-OES, CHN), followed by the definition of experimental conditions through compaction and Unconfined Compressive Strength (UCS) tests, with and without immersion of the composite, using different polymer contents relative to the water mass and varying curing periods. In the third stage, the mechanical and microstructural behavior of the soil and the composite were studied through static and cyclic triaxial tests, California Bearing Ratio (CBR), Scanning Electron Microscopy (SEM), and Mercury Intrusion Porosimetry (MIP). Based on the results, the soil was classified as clayey lateritic (LG'), composed mostly of kaolinite, gibbsite, and hematite, and the polymer was identified as styrene, composed of 71.96% carbon and susceptible to thermal degradation. Due to the soil's pH and the predominance of aluminum oxides, a reduction in polymer interaction and adhesion was observed. The optimum polymer dosage was defined at 50% relative to the water mass with 14 days of air curing, conditions that provided the highest UCS gains. Nevertheless, the sensitivity of the composite when sheared in the post-immersion condition was evidenced. Under low confining pressures, polymer stabilization resulted in an increase in the cohesive intercept and a reduction in the friction angle; at medium pressures, the opposite process was observed. Under cyclic loading, the Resilient Modulus of the stabilized soil demonstrated behavior similar to granular materials, with stiffness governed by the global stress state and lower sensitivity to deviatoric stress. Permanent Deformation analysis indicated that the stabilized material presented higher structural stiffness, lower deformability, and less dependence on confining pressures compared to the natural soil. Microstructural analyses confirmed the formation of polymeric films and bridges between particles, promoting aggregation and stability of the soil matrix. Overall, polymer stabilization positively altered the geotechnical properties of the tropical soil, making it a technically viable and efficient alternative for geotechnical engineering projects.

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO .....	1
1.1	CONTEXTO GERAL .....	1
1.2	OBJETIVOS .....	2
1.2.1	OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	2
1.3	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO .....	2
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	4
2.1	SOLOS TROPICAIS .....	4
2.2	MECÂNICA DOS PAVIMENTOS .....	6
2.2.1	MÓDULO DE RESILIÊNCIA.....	6
2.2.2	DEFORMAÇÃO PERMANENTE .....	9
2.3	ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS TROPICAIS .....	10
2.3.1	SOLOS ESTABILIZADOS COM POLÍMEROS.....	12
3	MATERIAIS E MÉTODOS .....	18
3.1	MATERIAIS .....	18
3.2	MÉTODOS.....	18
3.2.1	CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS .....	19
3.2.2	DEFINIÇÃO DAS CONDIÇÕES EXPERIMENTAIS .....	22
3.2.3	ENSAIOS TRIAXIAIS ESTÁTICOS.....	24
3.2.4	ENSAIOS PARA PAVIMENTAÇÃO.....	25
3.2.5	ANÁLISES MICROESTRUTURAIS.....	29
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	30
4.1	CARACTERIZAÇÃO FÍSICA E CLASSIFICAÇÃO DO SOLO .....	30
4.2	MINERALOGIA .....	31
4.3	FTIR.....	32
4.4	ANÁLISES ELEMENTARES .....	33

4.5	TG/DSC .....	36
4.6	DEFINIÇÃO DAS CONDIÇÕES EXPERIMENTAIS .....	38
4.6.1	PARÂMETROS DE COMPACTAÇÃO DO SOLO PURO .....	38
4.6.2	DOSAGEM .....	39
4.6.3	PARÂMETROS DE COMPACTAÇÃO DO SOLO-POLÍMERO .....	41
4.6.4	TEMPO DE CURA .....	42
4.7	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO TRIAXIAL .....	43
4.8	ÍNDICE DE SUPORTE CALIFÓRNIA (ISC) .....	47
4.9	MÓDULO DE RESILIÊNCIA.....	47
4.10	DEFORMAÇÃO PERMANENTE .....	51
4.10.1	MODELOS DE DEFORMAÇÃO PERMANENTE.....	53
4.11	MICROESTRUTURAL .....	58
5	CONCLUSÕES .....	62
6	REFERÊNCIAS.....	64

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Deslocamentos gerados no ensaio de carga repetida (BERNUCCI <i>et al.</i> , 2022)..	9
Figura 2.2 – Reação esquemática de estabilização polimérica (VINOD <i>et al.</i> , 2010).....	13
Figura 2.3 – Resultados de DRX em solo puro (U) e estabilizado (T) (VINOD <i>et al.</i> , 2010). 15	
Figura 2.4 – Microscopia Eletrônica de Varredura para: (a) solo sem estabilização; (b) solo com estabilização (GEORGEES <i>et al.</i> , 2020).....	16
Figura 2.5 – Microscopia Eletrônica de Varredura para: (a) interação do solo e polímero; (b) preenchimento dos vazios do solo com polímero (LIU <i>et al.</i> , 2011). .....	16
Figura 3.1 – Dados do local de coleta das amostras deformadas e estabilizante químico utilizado.....	18
Figura 3.2 – Atividades experimentais desenvolvidas. ....	19
Figura 3.3 – Preparação do solo. ....	20
Figura 3.4 – Etapas dos ensaios triaxiais estáticos. (a) moldagem em cilindro Mini-MCV; (b) extrusão do CP; (c) imersão do CP para aumentar grau de saturação; (d) Prensa Triaxial Axissimétrica Estática de modelo Fulltest FT 17002 – 50 kN; (e) etapa de saturação, adensamento e cisalhamento; (f) CP após cisalhamento.....	24
Figura 3.5 – Etapas dos ensaios triaxiais cíclicos. (a) CP após moldagem; (b) Prensa Triaxial Cíclica de modelo Owntec MS 161; (c) imersão do CP para correção de umidade. ....	26
Figura 4.1 – Curva de Distribuição Granulométrica. ....	30
Figura 4.2 – Resultados da Difração de Raios-X. ....	31
Figura 4.3 – Resultado da Análise FTIR. ....	32
Figura 4.4 – Resultados da análise térmica do solo, polímero e compósito. (a) TG; (b) DSC; (c) comparação com curvas de referência, conforme Gidigas, 1976.....	36
Figura 4.5 – Curva de Termogravimetria Derivada (DTG) do solo, polímero e compósito....	38
Figura 4.6 – Curvas e parâmetros de Compactação do solo compactado nas Energias Proctor Normal e Intermediária. ....	38
Figura 4.7 – Curvas de tensão <i>versus</i> deformação do solo: (a) não imerso e (b) pós-imersão. 39	
Figura 4.8 – Resistência a Compressão Simples para solo estabilizado: (a) não imerso e (b) imerso.....	40
Figura 4.9 – Curvas e parâmetros de Compactação do solo estabilizado compactado na Energia Proctor Intermediária em comparação com o solo puro. ....	41

Figura 4.10 –RCS em função do tempo de cura do solo estabilizado.....	42
Figura 4.11 – Resultados do ensaio de compressão triaxial para o solo puro (SP) e solo estabilizado com 14 dias de cura (SE-14d). .....	44
Figura 4.12 – Parâmetros de resistência ao cisalhamento gerais obtidos para o solo puro (SP) e solo estabilizado com 14 dias de cura (SE-14d). .....	45
Figura 4.13 – Parâmetros de resistência ao cisalhamento obtidos para o solo puro (SP) e solo estabilizado com 14 dias de cura (SE-14d) sob: (a) baixas tensões; (b) médias tensões. ....	46
Figura 4.14 – Ajustes globais obtidos para os ensaios em solo natural. ....	49
Figura 4.15 – Ajustes globais obtidos para os ensaios em solo estabilizado, seco, após cura de 14 dias. (a) sem correção de umidade; (b) com correção de umidade. ....	51
Figura 4.16 – Deslocamentos Permanentes Acumulados por número de ciclos, considerando: (a) solo puro; (b) solo estabilizado. ....	51
Figura 4.17 – Análise da ocorrência do <i>shakedown</i> para o solo puro (SP) e solo estabilizado com cura de 14 dias, após correção de umidade (SE-14d).....	53
Figura 4.18 – Curva Mestra do Solo Puro, utilizando-se 10.000, 20.000 e 150.000 ciclos. ....	56
Figura 4.19 – Curva Mestra do Solo Estabilizado, utilizando-se 10.000, 20.000 e 150.000 ciclos. ....	57
Figura 4.20 – MEV do solo: (a) puro; (b) estabilizado com 14 dias de cura. ....	59
Figura 4.21 – Espectroscopia por Energia Dispersiva (EDS) do solo puro (SP) e estabilizado com cura de 14 dias (SE-14d). ....	59
Figura 4.22 – Resultados da análise de porosimetria por intrusão de mercúrio do solo e do compósito solo-polímero após 14 dias de cura. ....	60

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Limites do Módulo de Resiliência (YANG <i>et al.</i> , 2025). .....	8
Tabela 3.1 – Tensões confinantes utilizadas nos ensaios triaxiais estáticos. ....	25
Tabela 3.2 – Estados de tensão utilizados para a determinação da Deformação Permanente. ....	27
Tabela 4.1 – Faixas granulométricas do solo – com e sem o uso de defloculante. ....	30
Tabela 4.2 – Caracterização física do solo. ....	31
Tabela 4.3 – Análise química dos óxidos maiores do solo analisados via FRX. ....	33
Tabela 4.4 – Análise química dos elementos menores analisados via FRX. ....	34
Tabela 4.5 – Análise química dos elementos presentes no solo analisados via ICP-OES. ....	35
Tabela 4.6 – Análise elementar do polímero (CHN). ....	35
Tabela 4.7 – Tensões na ruptura para o solo natural e estabilizado com polímero. ....	43
Tabela 4.8 – Valores de expansão e ISC do SP e SE-14d. ....	47
Tabela 4.9 – Coeficientes de Regressão – Solo Natural Compactado. ....	48
Tabela 4.10 – Coeficientes de Regressão – modelo de Guimarães (2009). ....	54
Tabela 4.11 – Coeficientes de Regressão – PD S para 10.000 e 150.000 ciclos. ....	55
Tabela 4.12 – Quantitativos obtidos por elemento na análise de Espectroscopia por Energia Dispersiva (EDS). ....	60

## LISTA DE SÍMBOLOS, NOMENCLATURAS E ABREVIACÕES

AASHTO	<i>American Association of State Highway and Transportation Officials</i>
$c'$	Coesão efetiva
$CD_{sat}$	Ensaio de compressão triaxial drenado saturado
CHN	Carbono, Hidrogênio e Nitrogênio
CIA	Índice de Alteração Química
CP	Corpo de Prova
DP	Deformação Permanente
DRX	Difração de raios-x
DSC	Calorimetria Exploratória Diferencial
$E_{50}$	Módulo de Elasticidade determinado com 50% da resistência máxima
EDS	Espectroscopia por Energia Dispersiva
$e_{min}$	Índice de Vazios mínimo
FRX	Fluorescência de raios-x
FTIR	Espectroscopia de Absorção no Infravermelho com Transformada de Fourier
GOI	Ganho na Ignição
ICP-OES	Espectroscopia de Emissão Óptica por Plasma Acoplado Individualmente
IH	Índice de Hinckley
IP	Índice de Plasticidade
ISC	Índice de Suporte Califórnia
$k$	Tensão de normalização do modelo de Mota et al. (2024)
$k_1, k_2, k_3$	Coefficientes de regressão dos modelos de previsão de $M_r$
$K_i$	Relação Molecular entre o percentual de sílica e óxido de alumínio
LL	Limite de Liquidez
LOI	Perda na Ignição
LP	Limite de Plasticidade
LQ	Limite de Quantificação do equipamento de FRX
MCT	Miniatura, Compactado, Tropical
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
Mini-MCV	Metodologia de compactação, utilizando-se de cilindro com dimensões reduzidas
$M_r$	Módulo de Resiliência
N	Número de ciclos de aplicação de carga
$N_{red}$	Número Reduzido de ciclos do modelo de Mota et al. (2024)
pH	Potencial hidrogeniônico
PIM	Porosimetria por Intrusão de Mercúrio
$R^2$	Coefficiente de Regressão
RCS	Resistência à Compressão Simples
S	Fator de tensão global do modelo de Mota et al. (2024)

$s_1, s_2, a_1, a_2,$ $a_3$	Coeficientes de regressão do modelo de Mota et al. (2024)
SE-14d	Solo Estabilizado - 14 dias de cura
SP	Solo Puro
$S_{ref}$	Parâmetro S de referência do modelo de Mota et al. (2024)
UICS	Sistema Unificado de Classificação de Solos
TG	Termogravimetria
$\delta_p$	Deslocamento plástico ou permanente
$\epsilon_p$	Deformação Permanente
$\epsilon_r$	Deformação vertical recuperável
$\phi'$	ângulo de atrito efetivo
$\omega_{ót}$	Umidade ótima
$\theta$	Tensão de Massa (Primeiro Invariante de tensões)
$\rho_0$	Tensão de referência no modelo de Guimarães (2009) – pressão atmosférica
$\rho_{d,max}$	Massa específica seca máxima
$\sigma_3$	Tensão Confinante
$\sigma_d$	Tensão desviadora
$\psi_1, \psi_2, \psi_3$ e $\psi_4$	Coeficientes de regressão do modelo de Guimarães (2009)

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 CONTEXTO GERAL

A mecânica dos solos tradicionais buscou caracterizar os fenômenos que regem o comportamento de solos em regiões temperadas (CARVALHO e GITIRANA Jr, 2021). No entanto, no Brasil, cerca de 71% da superfície do território está coberta por solos tropicais, sendo 80% de solos lateríticos, em que o processo de formação pedogenética desses solos faz com que apresentem características e comportamentos particulares (SANTOS, 2011).

Em condições naturais, os solos tropicais são usualmente porosos e com elevada concentração de microporos (LOPES *et al.*, 2022), características que os diferem dos solos estudados na mecânica dos solos clássica e geram características peculiares, tais como alta compressibilidade, erodibilidade e baixos parâmetros de resistência (HUAT *et al.*, 2004). Ainda assim, dada a sua abundância e melhoria de comportamento com a compactação, a utilização de solos tropicais é bastante utilizada, especialmente na pavimentação.

Nesse contexto, o sistema de transporte rodoviário brasileiro é composto por mais de 1,5 milhões de quilômetros de estradas, das quais, cerca de 78,5% são estradas não pavimentadas (CNT, 2024). Os principais problemas associados aos pavimentos envolvem o comportamento dos solos quanto às deformações permanentes, causadas por carregamentos repetidos (MEDINA e MOTTA, 2015).

A utilização de novos materiais geotécnicos surge como alternativa para a melhoria do comportamento mecânico do solo em obras geotécnicas, tais como aterros, bases de estradas, erosão de encostas e controle de poeira. Neste cenário, a estabilização polimérica desponta como uma possibilidade ecologicamente viável com efeitos em diferentes propriedades geotécnicas (DONAYRE *et al.*, 2018; ALMAJED *et al.*, 2022), positiva em solos arenosos (BOAVENTURA *et al.*, 2023) e com aplicações em rejeitos de mineração (ALELVAN *et al.*, 2022; LOPES *et al.*, 2025). Nos solos tropicais finos, em contrapartida, os efeitos da estabilização polimérica sob carregamentos estáticos e cíclicos ainda não são totalmente compreendidos, necessitando de investigações robustas.

Para além de determinar as propriedades geotécnicas, também é necessário compreender as metodologias de utilização, com a avaliação de dosagens e ganhos de resistência ao longo do tempo (LIU *et al.*, 2011; LUAN *et al.*, 2023). Para tanto, torna-se necessário um estudo compreensivo dos efeitos da estabilização polimérica em solos tropicais, visando sua utilização em obras de geotecnia. Assim, propõe-se entender os mecanismos de

estabilização química de solo tropical argiloso, típico da região do Distrito Federal, a partir da utilização de polímero, sob carregamentos cíclicos e estáticos, a fim de contribuir para soluções eficientes e sustentáveis em geotecnia.

## **1.2 OBJETIVOS**

O principal objetivo deste trabalho é estudar os efeitos da estabilização polimérica no comportamento mecânico de solo tropical argiloso sob carregamentos estáticos e cíclicos, visando a aplicação do compósito em obras de terra e pavimentação.

### **1.2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

Para se atingir o objetivo principal, são definidos como objetivos específicos:

- i. Entender as características físicas, químicas e mineralógicas de solo tropical argiloso, do polímero e do compósito;
- ii. Compreender o efeito de diferentes dosagens de polímero no comportamento mecânico do solo, por meio de ensaios de resistência à compressão simples considerando condição de avaliação imersa e não imersa;
- iii. Estudar as taxas de acréscimo de resistência à compressão simples ao longo de diferentes tempos de cura (3, 7, 14 e 28 dias), a partir do teor ótimo de concentração do polímero em massa de água;
- iv. Avaliar o efeito da estabilização polimérica nas solicitações de carga estáticas, por meio de ensaios triaxiais consolidados drenados para 14 dias de cura;
- v. Verificar a influência do polímero nos parâmetros de resiliência e deformação não recuperável do solo e do compósito, a partir de ensaios de ISC, módulo de resiliência e deformação permanente;
- vi. Analisar o impacto da adição de polímero na microestrutura do solo, por meio de ensaios de Porosimetria por Intrusão de Mercúrio e Microscopia Eletrônica de Varredura.

## **1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO**

Esta dissertação foi estruturada em cinco capítulos. No primeiro capítulo, contextualiza-se o problema que motivou o desenvolvimento da pesquisa e apresentam-se os objetivos do trabalho. O capítulo 2 detalha o referencial teórico, destacando-se a abordagem de solos tropicais, mecânica dos pavimentos, métodos de estabilização química de solos tropicais e a estabilização polimérica de solos. No capítulo 3 são apresentados os materiais utilizados na

presente pesquisa, o local de coleta e informações prévias do solo e do polímero e a metodologia dos ensaios realizados. No capítulo 4 são discutidos os resultados obtidos e suas respectivas análises, separados em: caracterização dos materiais, definição das condições experimentais e ensaios mecânicos. O capítulo 5 sintetiza as conclusões e inclui sugestões e recomendações para pesquisas futuras.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo se divide em quatro etapas, em que se discutem o comportamento de solos tropicais, a mecânica dos pavimentos envolvendo solos tropicais, os métodos de estabilização química e, especificamente, solos estabilizados com polímeros.

### 2.1 SOLOS TROPICAIS

Os materiais sólidos que constituem a superfície terrestre podem ser agrupados em dois grandes grupos: solos e rochas, em que solos são um conjunto de grãos minerais que podem ser facilmente desagregados por meio de esforços leves, enquanto as rochas são formadas por forças de coesão permanentes de maior magnitude

Este entendimento estende-se para os dois principais grupos de solos: residuais e transportados, no qual o primeiro é formado e localizado onde se situa a rocha-mãe, já o segundo se situa em local diferente de onde ele foi formado (HUAT *et al.*, 2004). A água atua como o principal agente geomorfológico, em que fatores como a intensidade de precipitação, a frequência de eventos de chuva, a porosidade e permeabilidade dos solos de cobertura, as taxas de evapotranspiração e a cobertura vegetal influenciam nesse processo (PELTIER, 1950, HUGGETT, 2011).

Dessa forma, as regiões tropicais reúnem, em geral, condições ideais que possibilitam a aceleração do intemperismo químico. Nestas, são encontrados horizontes de solo residuais e transportados bastante intemperizados, denominados de solos tropicais. Estes solos são divididos de acordo com seu grau de intemperismo e comportamento hidromecânico, sendo classificados em solos lateríticos e solos saprolíticos. Enquanto o primeiro é resultado de um elevado grau de intemperismo químico e físico, é comum que, em solos saprolíticos, ocorra a permanência da organização original dos cristais da rocha mãe, gerando estruturas reliquiares (HUAT *et al.*, 2012).

O comportamento hidromecânico dos solos tropicais depende de sua composição químico-mineralógica e das características estruturais. A mineralogia é o fator principal que define as propriedades e comportamentos do solo, controlando a forma e tamanho das partículas do solo. De maneira genérica, o solo é constituído por minerais primários, como quartzo, feldspato e micas, argilominerais de distintos grupos, i.e., esmectita e caulinita, e óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio (CARVALHO *et al.*, 2023). Assim, estudar a mineralogia de solos tropicais é essencial, uma vez que possibilita a identificação de características inerentes, como o potencial de colapso e de expansão (LIBÂNIO, 2024).

O principal grupo argilomineral presente em solos tropicais com elevado grau de intemperismo é o da caulinita, descrito pela fórmula de sua cela unitária  $(Al_4Si_4O_{10}(OH)_4)$ . Este argilomineral possui estrutura 1:1, com distância interplanar basal de 7,16 Å, com espaços entre as camadas de 2,79 Å, não suficientes para a acomodação de moléculas de água (que possuem tamanho aproximado de 2,90 Å de diâmetro). Não é comum, também, que sejam introduzidas moléculas externas neste espaço, devido à forte ligação entre a folha tetraédrica e octaédrica (COELHO e SANTOS, 2007)

Nesse sentido, as características dos solos dependem do grau de intemperismo ao qual ele já esteve sujeito, sendo que solos mais maduros (mais intemperizados) tendem a apresentar maior quantidade de argilominerais e óxidos livres, como gibbsita, goethita e hematita, em comparação com solos jovens (MELO e ALLEONI, 2019). Os principais elementos que caracterizam os solos tropicais brasileiros bem evoluídos são a coloração avermelhada, estrutura porosa e a presença de concreções lateríticas, resultado do elevado estágio de intemperização que os solos se encontram. A coloração avermelhada dos solos lateríticos é fruto da presença de óxido de ferro, que predomina mesmo quando sua concentração é menor que a de hidróxidos de alumínio, os quais fornecem coloração amarelada ao solo (PEREIRA *et al.*, 2020).

Estes solos são, em condições naturais, porosos e com distribuição bimodal de poros, concentrada na região de macro e microporos (LOPES *et al.* 2022). Neste aspecto, ao realizar a compactação, objetiva-se melhorar as características do solo para que este atinja as especificações de projeto. No entanto, observa-se que, ao submeter um solo tropical bem evoluído a efeitos de compactação, não ocorrem alterações no volume de microporos, uma vez que eles se encontram nos poros intra-agregado e não são afetados pelos esforços mecânicos impostos (OLIVEIRA *et al.*, 2022).

Apesar da origem e formação dos solos tropicais ser diferente dos solos caracterizados pelos estudos na Mecânica dos Solos Clássica, a caracterização desses solos ainda é realizada conforme padrões de classificação tradicionais, desenvolvido para solos de climas temperados (GUIMARÃES *et al.*, 2025). Nesses sistemas tradicionais de classificação de solos, os solos são avaliados por meio de classificações granulométricas e limites de Atterberg, nos quais os solos originados por processos de elevado intemperismo usualmente são caracterizados como inadequados para uso em camadas de pavimentação (OWOYEMI e ADEYEMI, 2017; MENGUE *et al.* 2018).

Além disso, devido à formação de agregações, existe uma diferença entre a distribuição dos tamanhos dos grãos efetivamente presente no perfil de solo. Assim, os métodos de classificação tradicionais, se mostram ineficientes para categorizar alguns solos tropicais (GUIMARÃES *et al.*, 2025). Para suprir essa demanda, pode ser adotada a classificação pelo método MCT (Miniatura, Compactado, Tropical), que permite classificar os solos por meio do comportamento hidráulico e mecânico, diferenciando-os em lateríticos e não lateríticos, em que a utilização de materiais oriundos do primeiro grupo é satisfatória em construções de aterros e pavimentação (NOGAMI e VILLIBOR, 1981).

Dada a importância de solos tropicais para a pavimentação, na sequência discorrem-se conceitos fundamentais da mecânica dos pavimentos para entendimento do comportamento desses materiais frente às solicitações de cargas repetidas.

## **2.2 MECÂNICA DOS PAVIMENTOS**

A Mecânica dos Pavimentos é fundamentada sob a análise do comportamento tensão-deformação das camadas constitutivas da infraestrutura viária quando submetidas a carregamentos cíclicos (HUANG, 2004, MEDINA e MOTTA, 2015). No contexto de estradas não pavimentadas, a resposta estrutural do pavimento depende da resposta geomecânica dos materiais cujo comportamento é não linear (LÉKARP *et al.*, 2020). A análise desses pavimentos, portanto, é realizada ao dissociar a resposta do material em duas parcelas distintas: a elástica, recuperável, expressa pelo Módulo de Resiliência, e a plástica, acumulativa, referente à Deformação Permanente (BROWN, 1996).

A compreensão dos modelos constitutivos que regem esses fenômenos, fundamentados tanto na Teoria do *Shakedown* (WERKMEISTER *et al.*, 2001) quanto em abordagens empírico-mecanísticas adaptadas para solos tropicais (GUIMARÃES, 2009), é premissa indispensável para a previsão da vida útil de vias não pavimentadas.

### **2.2.1 MÓDULO DE RESILIÊNCIA**

A natureza do comportamento tensão-deformação em camadas de pavimento é majoritariamente não elástica na grande maioria dos materiais, de forma que, após a aplicação de cada carga sejam geradas deformações permanentes. Contudo, se a solicitação for pequena ao ser comparada com a resistência do material e repetida uma quantidade de vezes considerável, a deformação após cada carregamento é quase completamente recuperável e proporcional à magnitude da carga, caracterizando-se, portanto, como um carregamento elástico (HUANG, 2004).

O MR é usado como um parâmetro de entrada para o cálculo das relações tensão-deformação nos métodos empíricos-mecanístico de dimensionamento de pavimentos, ao considerar uma relação elástica não linear, ainda que a natureza desses materiais não seja puramente elástica (BERNUCCI *et al.*, 2022). Os autores ainda estabelecem uma relação entre os valores de  $M_r$ , o tipo de material empregado e as tensões desviadora e de confinamento.

Alguns fatores possuem maior influência na resposta resiliente de cada material, em que se menciona a magnitude do carregamento, a densidade, a granulometria e a distribuição dos grãos, o tipo de agregado e o formato das partículas, o teor de umidade, o histórico de tensões e o número de aplicações de carregamentos e a duração, a frequência e a sequência de carregamento (LÉKARP *et al.*, 2020).

A depender dos carregamentos aos quais o material estiver sujeito, a resposta resiliente será afetada (ALNEDAWI *et al.*, 2022). Khasawneh (2019) concluiu que o módulo de resiliência diminui com o aumento da tensão desviadora e aumenta com o aumento da tensão confinante, ao avaliar três tipos de solos classificados pela metodologia AASHTO como A-1-B, A-4-A e A-6-A, indicando boa correlação para solos coesivos.

Ao utilizar uma maior energia de compactação na densificação do solo, espera-se que ocorra redução nas deformações resilientes e permanentes. No entanto, Alnedawi *et al.* (2022) apresentam a visão de diferentes autores, demonstrando dúvidas sobre a significância do nível de compactação frente outras variáveis do solo, tais como metodologia de compactação, tipo de solo, percentual de finos, teor de umidade e tipos de carregamentos.

Pan *et al.* (2006) avaliaram a textura superficial e a angularidade dos grãos, de forma a concluir que o tamanho e formato das partículas possuem efeito considerável na performance do pavimento, especialmente no comportamento resiliente. Cada tipo de solo possui uma diferente resposta resiliente (YANG *et al.*, 2025), conforme apresentado na Tabela 2.1.

As técnicas tradicionais de classificação e hierarquização, quando aplicadas aos solos tropicais lateríticos e saprolíticos, se demonstrou inadequada. Bernucci *et al.* (2022) apontaram que solos lateríticos podem apresentar Módulos de Resiliência de cerca de 100 MPa a 500 MPa, com solos argilosos apresentando menores valores que solos mais arenosos. Outros autores avaliaram a variação do MR com a classificação MCT, como destacam Silva (2019) e Oliveira (2022).

Tabela 2.1 – Limites do Módulo de Resiliência (YANG *et al.*, 2025).

Classificação do Solo (SUCS)	Limites do Módulo de Resiliência (MPa)		Módulo de Resiliência médio (MPa)
	Inferior	Superior	
ML	117,2	175,8	137,9
MH	55,2	120,7	79,3
CL	93,1	165,5	117,2
CH	34,5	93,1	55,2
SM	193,1	258,6	220,6
SC	148,2	193,1	165,5
GM	227,5	289,6	265,4
GC	165,5	258,6	148,2

No contexto de solos tropicais, conforme ocorre redução no teor de umidade e consequente aumento na sucção, o módulo de resiliência sofre um aumento considerável, especialmente quando aplicados carregamentos de baixa magnitude (CERATTI *et al.*, 2004). De forma similar, com a adição de água pós-compactação, é esperado que haja redução na sucção e redução nos valores de módulo de resiliência, quando comparadas amostras compactadas sob as mesmas condições e submetidos aos mesmos níveis de tensão (PREUSSLER, 1983).

O histórico de tensões aparece como variável devido ao processo de densificação progressiva e rearranjo das partículas sob carregamentos cíclicos (BERNUCCI *et al.*, 2022). Os efeitos dessa condição podem ser reduzidos durante o estágio de condicionamento, sob carregamentos cíclicos, evitando-se, porém, a adoção de grandes razões entre a tensão desvio ( $\sigma_d$ ) e tensão confinante ( $\sigma_3$ ) (BOYCE, 1976).

Seed *et al.* (1967) propuseram um modelo dependente do somatório das tensões, conforme Equação 2.1. Neste modelo, a tensão de massa ( $\theta$ ) é a soma das três tensões principais que atuam em um ponto, equivalente ao primeiro invariante de tensões, uma vez definido o tensor de tensões. Os parâmetros  $k_1$  e  $k_2$  são coeficientes de regressão. Este modelo é frequentemente utilizado para retratar materiais granulares, nos quais os efeitos da tensão de confinamento são mais representativos do comportamento resiliente (NGUYEN e MOHAJERANI, 2016).

$$M_r = k_1 \times \theta^{k_2} \quad (\text{Equação 2.1})$$

Em solos finos, a influência da tensão confinante torna-se insignificante, uma vez que a resistência deste tipo de solo não advém da parcela atritiva, mas sim das ligações coesivas (NGUYEN e MOHAJERANI, 2016). Svenson (1980) propôs um segundo modelo de potência, conforme Equação 2.2. Neste modelo, o módulo de resiliência ( $M_r$ ) é calculado com base na tensão desviadora ( $\sigma_d$ ). Os parâmetros  $k_1$  e  $k_2$  são coeficientes de regressão.

$$M_r = k_1 \times \sigma_d^{k_2} \quad (\text{Equação 2.2})$$

Uzan (1985) propôs um modelo de potência combinado, apresentado na Equação 2.3. Neste modelo, o módulo de resiliência ( $M_r$ ) é calculado com base no primeiro invariante de tensões ( $\theta$ ) e na tensão desviadora ( $\sigma_d$ ). Os parâmetros  $k_1$ ,  $k_2$  e  $k_3$  são coeficientes de regressão.

$$M_r = k_1 \times \theta^{k_2} \times \sigma_d^{k_3} \quad (\text{Equação 2.3})$$

### 2.2.2 DEFORMAÇÃO PERMANENTE

A deformação permanente, em si, é a parcela do deslocamento que não retorna à posição inicial após a aplicação de uma sollicitação. Ao longo da vida do pavimento, essas deformações se acumulam, gerando problemas estruturais e de usabilidade nas rodovias, destacando-se o afundamento de trilho de rodas (GUIMARÃES, 2009).

O ensaio de Deformação Permanente visa o estudo de respostas de longo prazo para previsão do desempenho de materiais aplicáveis à pavimentação. O ensaio permite obter, dentre outras informações, a característica de acomodação da deformação permanente após uma elevada quantidade de ciclos de carregamento (BERNUCCI *et al.*, 2022). A Figura 2.1 ilustra os deslocamentos gerados no ensaio de cargas repetidas.

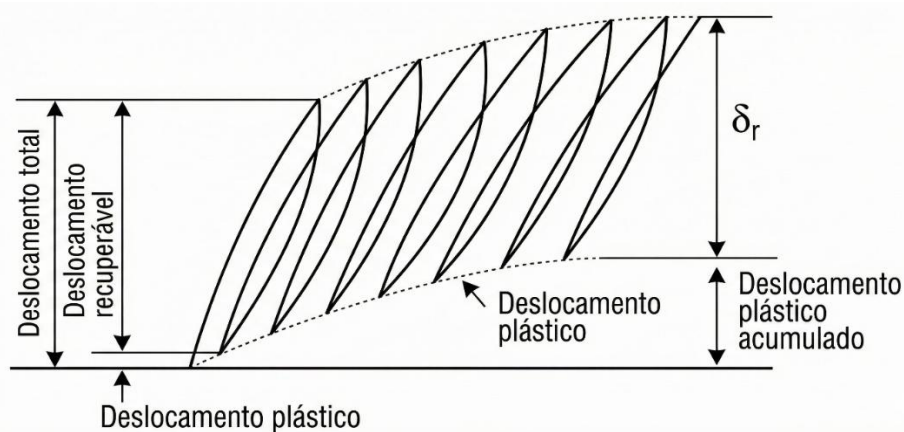


Figura 2.1 – Deslocamentos gerados no ensaio de carga repetida (BERNUCCI *et al.*, 2022).

Segundo Lima (2020), os principais fatores que influenciam o desenvolvimento de deformação permanente são similares aos descritos para o módulo de resiliência, destacando-se as tensões solicitantes, a umidade, a energia de compactação, o tipo de agregado, o formato das partículas e o arranjo estrutural.

As pesquisas de Lima (2020) demonstraram, de forma generalizada, que o aumento da deformação permanente é maior quanto maior o nível de tensão aplicado no material, especialmente quando considerado o aumento na razão  $\sigma_d/\sigma_3$ . Ainda, destacou o ganho de rigidez durante o processo de compactação, com a conclusão de que, em geral, o aumento da densificação dos materiais leva à diminuição das deformações permanentes.

A variação de umidade nos materiais ensaiados por solicitações repetidas pode gerar aumento ou redução na resistência quando os materiais são avaliados abaixo ou acima da umidade ótima, respectivamente. (TAKEDA, 2006; GUIMARÃES, 2009; ZAGO, 2016; LIMA *et al.*, 2018, OLIVEIRA, 2022). Existe, portanto, consenso de que ocorre incremento na resistência quando o material se encontra abaixo da umidade ótima e redução acima da umidade ótima.

Quando avaliada a metodologia MCT como fator de classificação dos solos, observa-se maiores deformações permanentes em solos não lateríticos, quando comparados aos lateríticos. No entanto, este fator não deve ser considerado isoladamente, uma vez que há a possibilidade de solos não lateríticos possuírem desempenho satisfatório, principalmente se tratando de materiais granulares (LIMA, 2020). A autora reforça a importância de selecionar os materiais para as camadas de pavimento com base nos resultados dos ensaios de caracterização e triaxiais cíclicos para melhor entendimento do comportamento.

### **2.3 ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS TROPICAIS**

Apesar de demonstrarem certa estabilidade em sua composição, os solos tropicais estão em um estado de desequilíbrio, com condições de equilíbrio dinâmico parcialmente estabelecidas, devido a reações de dissolução e cristalização de minerais e lixiviação intermitente, que ocorrem de forma contínua e lenta. As estruturas formadas que parecem se aproximar do equilíbrio são de composição complexa e com características metaestáveis (MELLO e ALLEONI, 2019).

Objetivando melhorar as características dos solos tropicais são adotados diferentes métodos de estabilização, a fim de adequá-los aos requisitos de projeto. Podem ser alterados o

peso específico, a capacidade de carga e a deformabilidade, de acordo com a necessidade de cada obra geotécnica (FIROOZI *et al.*, 2017).

Existem, porém, diversas metodologias de estabilização que podem ser utilizadas com o objetivo de se atingir os parâmetros desejados para projeto, enquadradas em estabilização mecânica, física e química. A estabilização mecânica é estabelecida por meio de processos de compactação e adensamento. Já a estabilização física se propõe a uma correção granulométrica, a fim de alterar densidade, teor de umidade e/ou resistência mecânica dos solos, e depende da mistura de dois ou mais materiais com características distintas. Por fim, a estabilização química depende da inserção de um agente químico que atuará reforçando as ligações químicas dos minerais e argilominerais presentes no solo (AFRIN, 2017).

Particularmente na estabilização química, a solução visa criar um compósito com propriedades particulares daquelas apresentadas individualmente pelos materiais considerados (ANDRADE, 2017). Assim, pode-se dividir o material compósito em duas fases, em que os grãos e partículas de solo são a matriz e os agentes químicos são os elementos de estabilização (THOMAS, 2019).

As abordagens possíveis para a estabilização química de solos, especialmente lateríticos, foram objeto de estudo de diversos autores, conforme descritos a seguir. Saing *et al.* (2017) destacaram, para um solo laterítico com 90% de material passante pela peneira de nº200, ganhos de resistência à compressão simples maiores que 450% após tratamento com cimento e cura de 28 dias, associando o ganho de resistência à presença majorada de forças de atração.

Osula (1989) avaliou solo laterítico nigeriano, por meio da adição de diferentes concentrações de cimento Portland e cal hidratada como estabilizante, em diferentes tempos de cura, em corpos de prova sem imersão e pós imersão em água. Neste estudo, o incremento de resistência no solo se deu por meio de reações pozolânicas, regidas principalmente pela ação da cal hidratada, visto que a mistura solo-cimento conferiu ganhos de resistência menores.

Com o mesmo solo, Osula (1993) estudou a adição de uma mistura de cimento Portland e cloreto de sódio. Comparativamente ao primeiro conjunto de testes, os ganhos de resistência foram maiores, especialmente pela característica de retenção de água da mistura solo-sal. Com o reaproveitamento de cinzas provenientes da queima de conchas de ostras, Etim *et al.* (2020) avaliaram o ganho de resistência em um solo laterítico da Nigéria, avaliando cinco concentrações de mistura de cinzas que possuíam alto teor de óxido de cálcio. Para os tempos de cura avaliados, percebeu-se que a resistência à compressão simples do solo aumentava, conforme o teor de cinzas crescia. Ao final, reportou-se ganhos de resistência de até 800%.

Observou-se, por meio de microscopia eletrônica, um novo arranjo microestrutural do solo, proveniente da adição do material cimentante.

Morales *et al.* (2024) avaliaram o potencial de melhoramento de um solo laterítico amazônico com a adição de resíduos agroindustriais álcali-ativados. Procedeu-se com a avaliação do solo estabilizado em microscópio eletrônico de varredura (MEV) e ensaios mecânicos de compactação e resistência à compressão simples. Observou-se que, com maiores quantidades de NaOH, obtinham-se maiores massas específicas seca máximas, com redução no teor de umidade ótimo. Ainda, a resistência à compressão simples evidenciou um padrão crescente de ganho de resistência com o aumento da concentração de aditivo, até estabilizar-se em um ponto. Por fim, observaram a precipitação de produtos álcali-ativados na superfície das partículas do solo laterítico, confirmando a atuação do bagaço de cana em reações pozolânicas, com efeito cimentante no solo.

### **2.3.1 SOLOS ESTABILIZADOS COM POLÍMEROS**

A estabilização química dos solos por meio de polímeros já é objeto de estudo desde as últimas décadas com objetivos distintos, como controle de erosão, redução de poeira, controle de fluxo e melhoria de parâmetros de resistência e permeabilidade (DONAYRE *et al.*, 2018).

Os mecanismos de atuação dos polímeros na estabilização de solos são caracterizados especialmente pela habilidade de formação de filmes contínuos nas superfícies das partículas, preenchendo vazios e ligando partículas durante a cura por secagem (XIA *et al.*, 2024). As cadeias poliméricas apresentam desbalanceamento de cargas em soluções aquosas, que permitem sua aderência aos argilominerais, aproximando as partículas do solo. Essa reação eletrostática resulta na redução da espessura da dupla camada, ligando os argilominerais (VINOD *et al.*, 2010).

O processo de estabilização proposto por Vinod *et al.* (2010) é apresentado na Figura 2.2, na qual as camadas de argilominerais, com cargas negativas (linhas tracejadas), se estabilizam em ligações lateríticas representadas por círculos. Uma vez que iniciado o tratamento do solo com o polímero, ocorre adsorção na superfície do argilomineral, por meio de atração eletrostática e as ligações poliméricas atraem as partículas de argila, aproximando-as e formando agregações mais estáveis após a cura.

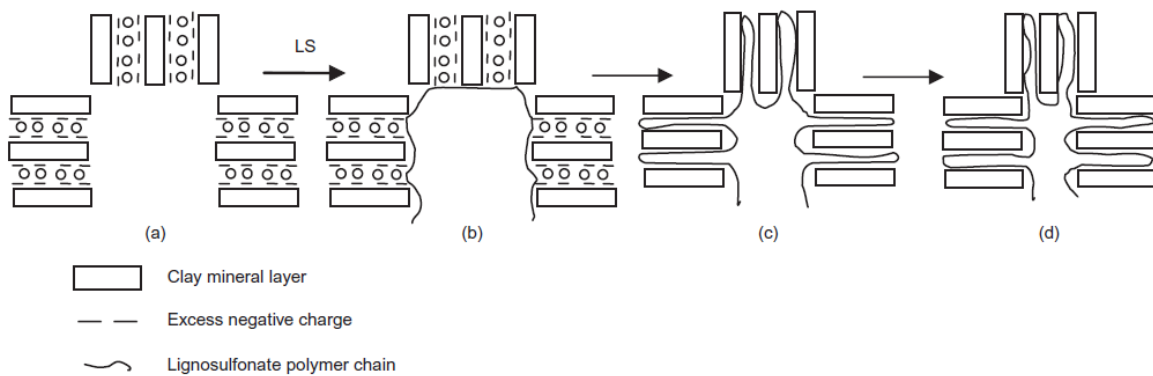


Figura 2.2 – Reação esquemática de estabilização polimérica (VINOD *et al.*, 2010).

Em areias e solos arenosos, a atuação dos polímeros se dá fundamentalmente pelo efeito cola (HEFFER *et al.*, 2005). Ainda, a adição de polímeros causa alteração microestrutural, com a ligação dos agregados, possibilitando ganhos de resistência inclusive em solos com baixa ou nenhuma plasticidade (MORALES *et al.*, 2024). A análise microestrutural de solo estabilizado indica a existência de reações que revestem as partículas, unindo-as, conforme avaliado por Ezreig *et al.* (2023), que observaram novas ligações efetivas proporcionadas pela adição de polímero em solo laterítico, reduzindo a porosidade e os vazios, gerando uma estrutura densificada com ganhos de resistência, mesmo na situação imersa.

Para além do efeito de aglutinação dos grãos, em solos argilosos, o polímero é adsorvido pelos argilominerais, causando alteração nas cargas elétricas de superfície (naturalmente desbalanceadas), reduzindo as forças de repulsão inter-agregados, e aproximação dos argilominerais, criando agregações ao ligar argilominerais, óxidos e grãos entre si (PETERSON *et al.*, 2002). Em solos tropicais bem evoluídos, cujo principal argilomineral seja a caulinita, ainda ocorrem os efeitos de interação química de desbalanceamento de cargas superficiais, mesmo que esta seja mais estável que outros grupos de argilominerais (COELHO e SANTOS, 2007). Dessa forma, avalia-se como positivo o potencial de estabilização de solos tropicais.

Boaventura *et al.* (2023) analisaram a atuação de polímero sintético como estabilizante de solo arenoso, reportando alteração no comportamento das curvas de compactação, que gerou aumento na massa específica seca máxima. A adição do polímero, para os teores avaliados, resultou em cimentação e aumento da resistência do solo, aumentando o ângulo de atrito e adicionando parcela de coesão. Estes resultados se devem ao efeito cola induzido pelo polímero que gera adesão entre grãos e partículas adjacentes, aumentando a área de contato e reduzindo os vazios no solo, densificando-o, conforme apresentado pela análise microestrutural.

Os efeitos da estabilização de solos em ensaios de resistência estáticos demonstram, especialmente ganhos de coesão (HUANG *et al.*, 2021), embora sejam escassos estudos sobre o efeito dos polímeros em solos tropicais argilosos em ensaios cíclicos. Latifi *et al.* (2016) avaliaram a estabilização polimérica em argilas. No caso da caulinita, o ganho de coesão em solo compactado sob a energia Proctor Normal foi superior a seis vezes.

A estabilização de solos surge, ainda, como uma possibilidade para a redução do acúmulo de deformações excessivas. As metodologias tradicionais incluem a adição de cal ou cimento, buscando-se um enrijecimento significativo do solo ou melhoria parcial da trabalhabilidade e capacidade de suporte (BERNUCCI *et al.*, 2022). Embora ocorra o ganho de desempenho, bases estabilizadas com cimento aparecem como fonte de trincas, ao introduzir uma rigidez frágil às camadas de pavimento (ADASKA e LUHR, 2004).

Iyengar *et al.* (2013) demonstraram que a performance de solos estabilizados com polímeros teve desempenho comparável ou superior à de solos estabilizados com cimento para um solo calcáreo com baixo teor de finos. Os autores demonstraram ganhos na resistência à compressão simples (RCS) e rigidez ( $E_{50}$ ) e, por meio de modelos empíricos de correlação entre a RCS e  $M_r$ , obteve valores entre 130 e 4830 MPa para o solo estabilizado.

Ao investigar a estabilização de solo utilizando um aditivo baseado em poliacrilamida em ensaios de cargas repetidas, Georgees *et al.* (2018) avaliaram o desempenho mecânico dos materiais nos parâmetros de resistência à compressão simples, especialmente para solos com menor quantidade de finos e argila. O módulo elástico apresentou incrementos entre 19,3% e 26,3%, gerando maiores ganhos em solos com maior quantidade de finos. Em relação ao módulo de resiliência, foram registrados aumentos de aproximadamente 35% para solos granulares e 55% para solos coesivos, enquanto, para o solo argilo-arenoso, o ganho observado foi pouco expressivo.

Em estudo subsequente, Georgees *et al.* (2018) avaliaram os mesmos solos sob diferentes níveis de compactação. Os resultados indicaram que o aumento na energia de compactação gerou acréscimo na resistência à compressão simples, embora a relação entre o número de golpes e o ganho de resistência não tenha se demonstrado linear. Quanto ao desempenho sob solicitações cíclicas, observou-se redução das deformações permanentes em todos os solos analisados, especialmente em solos com menores teores de finos e submetidos a maiores energias de compactação.

Posteriormente, Georgees *et al.* (2020) avaliaram os efeitos do polímero de poliacrilamida sob a perspectiva microestrutural. Na primeira parte do artigo, observou-se que

o aumento no teor de finos resultou em elevação da massa específica seca máxima, da resistência à compressão simples e do módulo elástico do solo estabilizado, atingindo valores máximos para um teor de argila de 2,5%, a partir do qual observou-se redução desses parâmetros.

Na segunda parte, os autores realizaram ensaios de difração de raios-x, por meio dos quais evidenciaram a presença das mesmas fases cristalinas nas amostras de solos estabilizadas e não estabilizadas. O resultado obtido indica que não houve formação de novos compostos minerais, sugerindo que a interação solo-polímero ocorreu por mecanismos físicos, tais como a adsorção superficial e efeito cola, corroborando com a teoria proposta por Hefer *et al.* (2005).

Vinod *et al.* (2010) avaliaram se a inserção do polímero na fábrica do solo argiloso causou alteração na estrutura cristalina do solo, originalmente composta por, majoritariamente, caulinita, ílita, montmorilonita e quartzo. Após a inserção do polímero, nenhum novo pico foi observado no ensaio de DRX, confirmando a natureza amorfa, ou não cristalina, do composto adicionado.

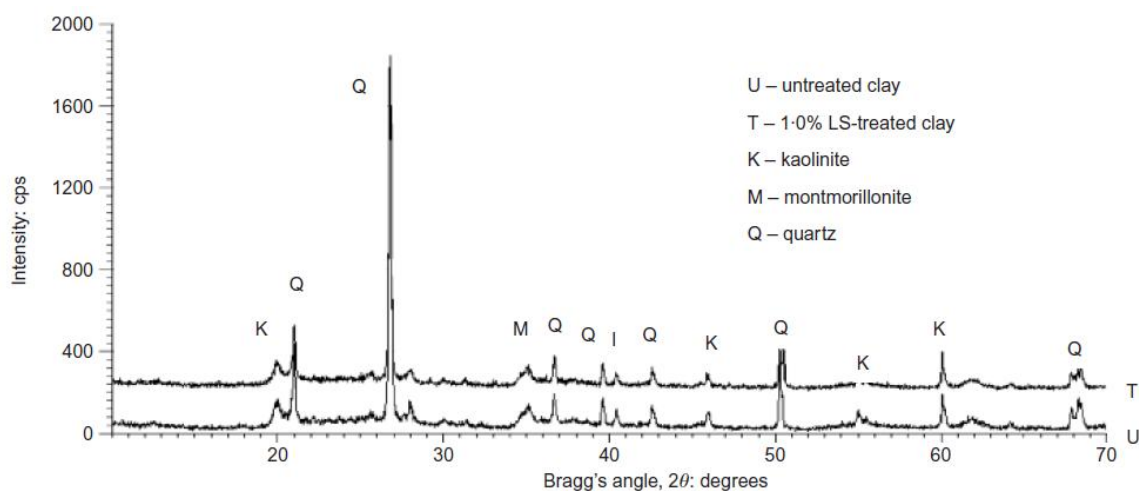


Figura 2.3 – Resultados de DRX em solo puro (U) e estabilizado (T) (VINOD *et al.*, 2010).

Nas imagens de microscopia eletrônica de varredura apresentadas na Figura 2.4, Georges *et al.* (2020) reforçam essa interpretação ao evidenciarem maior preenchimento dos poros após a estabilização. Esse rearranjo microestrutural contribuiu para o aumento da resistência à tração entre partículas individuais, de forma a gerar agregações mais estáveis. O conjunto dessas interações se reflete diretamente no comportamento mecânico do solo estabilizado.

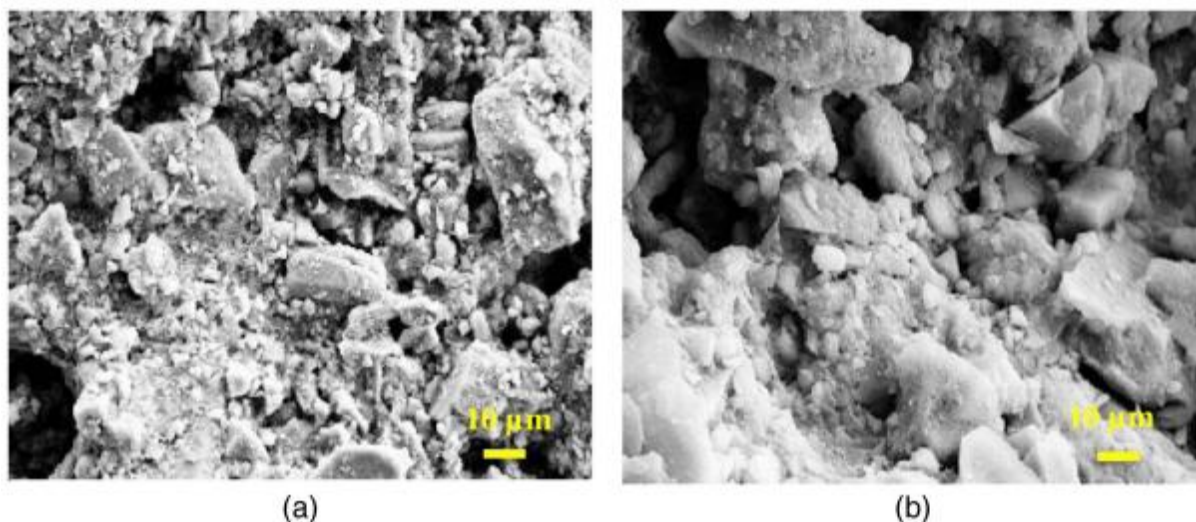


Figura 2.4 – Microscopia Eletrônica de Varredura para: (a) solo sem estabilização; (b) solo com estabilização (GEORGEES *et al.*, 2020).

Ao avaliar a estabilização de um solo argiloso com polímero composto por polivinil acetato, Liu *et al.* (2011) descreveram o mecanismo de estabilização do solo. Por meio de microscopia eletrônica de varredura, os autores identificaram uma grande quantidade de polímero preenchendo os vazios do solo. Com a ação da cura por secagem, as longas cadeias poliméricas envolvem a superfície dos agregados formados e se ligam, formando uma membrana elástica e viscosa, melhorando a resistência e reduzindo a suscetibilidade à erosão. A Figura 2.5 apresenta o mecanismo descrito por Liu *et al.* (2011).

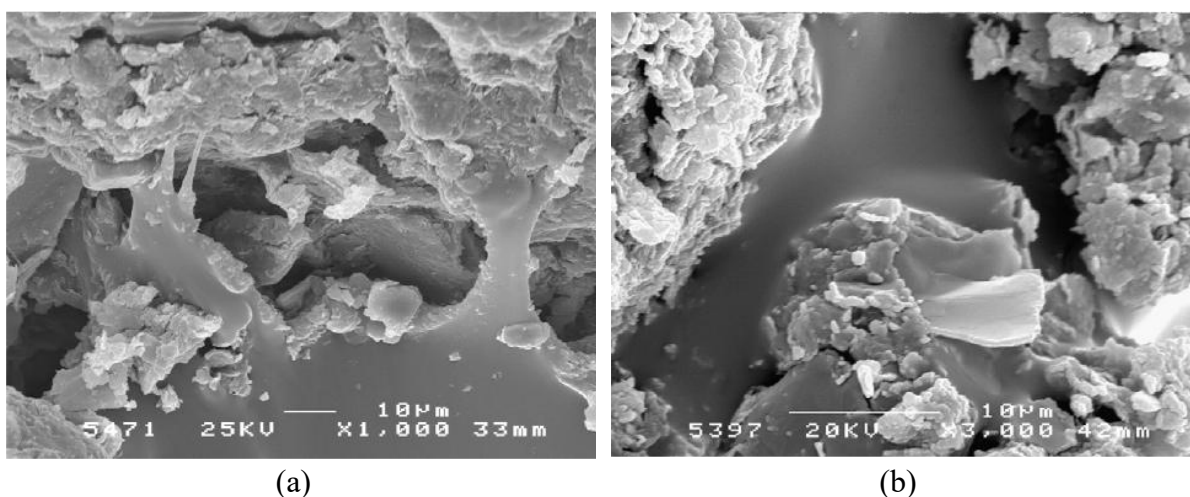


Figura 2.5 – Microscopia Eletrônica de Varredura para: (a) interação do solo e polímero; (b) preenchimento dos vazios do solo com polímero (LIU *et al.*, 2011).

Liu *et al.* (2011) indicaram que a resistência à compressão do solo estabilizado se altera ao longo do tempo, conforme ocorre a secagem do polímero. Desta forma, determinaram que ocorre um aumento expressivo na RCS durante as primeiras 24h, reduzindo a velocidade de acréscimo de resistência ao longo do tempo. Ainda, afirmaram que o preenchimento dos vazios

e ganho de resistência é proporcional à quantidade de aditivo utilizado, de forma que, quanto maior a concentração de aditivo, maiores os ganhos de resistência. No entanto, a maior concentração adotada no estudo foi de 30%.

O tempo de cura possui papel importante no aumento de resistência dos solos estabilizados com polímero. Luan *et al.* (2023) avaliaram um solo argiloso, cujos principais argilominerais identificados via DRX foram caulinita, montmorilonita e ilita, além de grande presença de quartzo. Após a adição de polímero em diferentes concentrações, avaliou-se a resistência à compressão simples em diferentes tempos de cura. Constatou-se que a RCS possui uma relação positiva com a concentração de polímero e o tempo de cura. Ocorreu grande tendência de crescimento na resistência até 14 dias, a partir da qual, apesar de crescente, a taxa de crescimento reduziu-se.

Quando avaliado o efeito do aditivo a base de poliacrilamida no ensaio de ISC, Georgees *et al.* (2016) verificaram aumento médio de 13,6% no valor do Índice de Suporte Califórnia, para o ensaio não inundado, enquanto, nos ensaios inundados, os ganhos foram marginais ou inexistentes. Adicionalmente, os ensaios de permeabilidade à carga variável indicaram redução da condutividade hidráulica dos solos estabilizados.

Por meio de avaliação FTIR, Vinod *et al.* (2010) observaram que a argila analisada consistia nos grupos funcionais identificados pelos estiramentos de Si-O, Al-O-H e OH. Após o tratamento, além de manterem a estrutura base, o solo estabilizado passou a apresentar bandamentos associados ao alongamento de grupos reconhecidos do polímero analisado, comprovando o sucesso da estabilização polimérica e, por consequência, a presença do polímero nos espaços interlamelares dos argilominerais.

Carre e Schultz (1983) apresentaram dificuldades na adesão polimérica em superfícies de alumínio oxidadas. Os autores apontaram que a performance dos aditivos na superfície do alumínio depende da qualidade da interface formada e da presença de contaminantes associados à oxidação do alumínio.

Em geral, a utilização de polímeros para estabilização de solos contribui para a redução de sua condutividade hidráulica, por meio de alterações na microestrutura, culminando na efetiva redução de microporos (HUANG *et al.*, 2021). Contudo, os autores ressaltaram que a alteração na textura devido a floculação dos argilominerais pode realizar abertura de canais de fluxo preferenciais, gerando aumento na condutividade hidráulica após a estabilização.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 MATERIAIS

Este trabalho possui caráter experimental e a maior parte de suas atividades foram desenvolvidas no Laboratório de Novos Materiais Geotécnicos da Universidade de Brasília – UnB. O solo tropical utilizado na presente pesquisa foi coletado com estrutura deformada a uma profundidade aproximada de 1,0 m da superfície, na região do entorno de Brasília. A Figura 3.1 ilustra o local de coleta, localizado nas coordenadas S15°47'39,20860" (LAT) e W47°58'7,90480" (LONG), altitude 1125 m.

Já o estabilizante químico utilizado é um polímero acrílico de estireno comercialmente conhecido como AggreBind, que surge como uma tecnologia limpa, verde e sustentável (AGGREBIND, 2025). Os principais usos para esse polímero são a estabilização de solos para estradas, bases de estradas, tratamento de erosão de encostas e controle de poeira. O polímero possui coloração branca, pH de 7 a 9, teor de sólidos  $50 \pm 1\%$ , viscosidade 3000-7000 mPas e gravidade específica  $1,05 \pm 0,01$ . Além disso, utilizou-se água destilada para a realização dos ensaios de caracterização e compactação.



Figura 3.1 – Dados do local de coleta das amostras deformadas e estabilizante químico utilizado.

#### 3.2 MÉTODOS

A Figura 3.2 apresenta as atividades desenvolvidas no escopo do trabalho, com o detalhamento das atividades de caracterização do solo, definição das condições experimentais e ensaios mecânicos estáticos e cíclicos para avaliação do comportamento do solo estabilizado com polímero.

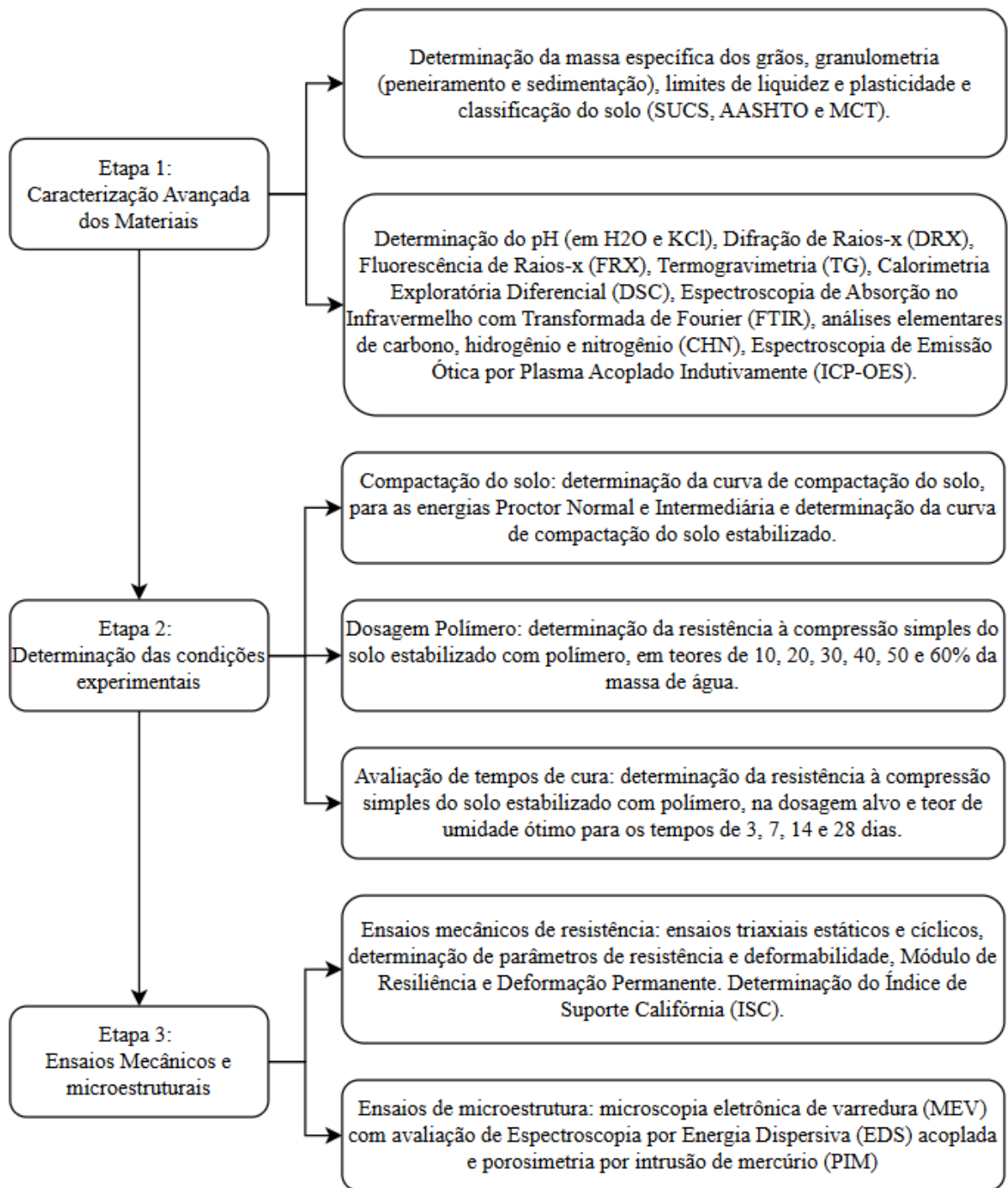


Figura 3.2 – Atividades experimentais desenvolvidas.

### 3.2.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

Após o recebimento das amostras deformadas de solo, realizou-se a secagem destas ao ar e o seu destorroamento. Em seguida, foi realizada a homogeneização pelo método de quarteamento manual e, por fim, as amostras de solo foram armazenadas e identificadas em sacos plásticos, conforme ilustrado na Figura 3.3. A preparação das amostras seguiu o preconizado pela NBR 6457 (ABNT, 2024).



Figura 3.3 – Preparação do solo.

Com o objetivo de caracterizar fisicamente o solo, foram realizados ensaios de determinação da massa específica dos solos (ABNT, 2025f), granulometria por peneiramento e sedimentação, com e sem defloculante (ABNT, 2025c), determinação de limites de liquidez (ABNT, 2025a) e de plasticidade (ABNT, 2025b), complementando-se com a determinação do pH do solo em água e KCl (TEIXEIRA *et al.*, 2017).

A partir da caracterização física, realizou-se a classificação do solo com base nos sistemas SUCS (Sistema Unificado de Classificação dos Solos) e AASHTO (*American Association of State Highway and Transportation Officials*). Também, realizou-se a classificação do solo seguindo a metodologia MCT (Miniatura, Compactado, Tropical), obtida por meio de ensaios em corpos de prova de dimensões reduzidas, moldados por compactação conforme norma DNIT 259 (DNIT, 2023).

Além disso, foram realizados ensaios de Difração de Raios-X (DRX), no laboratório de Geociências da Universidade de Brasília (IG/UnB), com objetivo de caracterizar qualitativamente os minerais e argilominerais presentes no solo e passantes pela peneira de nº200. Foi utilizado o difratômetro modelo Rigaku Ultima IV, operando a 45 kV e 15 mA. O intervalo  $2\theta$  avaliado varia de  $2^\circ$  a  $60^\circ$  e a identificação e interpretação dos minerais e argilominerais é baseado nos picos característicos, identificados pelo *software* MDI Jade.

As análises de Fluorescência de Raios-X (FRX) e termogravimétricas foram realizadas no Centro Regional para Desenvolvimento Tecnológico e Inovação (CRTI) da Universidade Federal de Goiás (UFG). Para o FRX de óxidos maiores em solo e no polímero foram separadas por quarteamento 5 gramas dos materiais, os quais foram levados para pulverização em moinho planetário de bolas, equipado com elementos de moagem de ágata por 10 minutos. Após a

moagem, as amostras foram secas em estufa por 105°C por 12 horas e destinadas à determinação da perda na ignição (LOI) ou ganho na ignição (GOI). Após esse estágio, foi submetido para análise em espectrômetro WDS Rigaku, modelo ZSX Primus IV, equipado com tubo de Rh.

No caso da análise de FRX de elementos menores em solo e no polímero foi separada uma quantidade de 15 gramas, seguindo o mesmo processo descrito para óxidos maiores. Após a moagem, a amostra foi seca em estufa por 12 horas e destinada à confecção da pastilha prensada, misturando-se e homogeneizando-se 3 gramas de aglutinante com 9 gramas da amostra previamente seca. Em seguida, a mistura foi prensada com uma força de 15 toneladas. A análise dos elementos menores foi realizada em um espectrômetro WDS Bruker modelo S8 Tiger, equipado com tubo de Rh. As concentrações dos elementos menores foram obtidas por pacotes de curvas GeoQuantT Bruker.

A partir dos quantitativos de óxidos obtidos na análise de FRX, determinou-se o valor de  $K_i$ , relação molecular entre o percentual de sílica e óxido de alumínio, conforme metodologia apresentada no Manual de Métodos de Análise de Solo da Embrapa (TEIXEIRA *et al.*, 2017), visto ser um importante parâmetro para avaliar o grau de intemperismo do solo. Embora a metodologia da Embrapa seja aplicada a concentrações obtidas pelo ataque sulfúrico, o baixo teor de  $\text{SiO}_2$  total e o elevado teor de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  indicam presença de quartzo residual mínima. Nestas condições de intemperismo elevado, os quantitativos convergem quando avaliados os dois métodos. Assim,  $K_i$  total é calculado conforme a Equação 3.1.

$$K_{i_{total}} = 1,7 \times \frac{\text{SiO}_2}{\text{Al}_2\text{O}_3} \quad (\text{Equação 3.1})$$

Taylor e McLennan (1985) apresentam um índice de alteração química, útil para medir o grau de intemperismo, calculado conforme a Equação 3.2, utilizando-se de proporções moleculares. Para tal, foi descartada a quantidade de CaO presente no material, devido a esta se tratar de contaminante do processo de destorroamento e moagem.

$$CIA = \frac{\text{Al}_2\text{O}_3}{\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{CaO} + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}} \times 100 \quad (\text{Equação 3.2})$$

A análise térmica foi realizada em analisador térmico modelo Nietzsche STA 449 F3 Nevio, com faixa de trabalho entre 35 e 800 °C. Os ensaios foram realizados com taxa de aquecimento de 10°C/min e fluxo de nitrogênio ( $\text{N}_2$ ) de 100 mL/min. Buscou-se, por meio da calorimetria exploratória diferencial (DSC), quantificar o fluxo de calor absorvido ou liberado pela amostra, possibilitando a identificação de reações de decomposição, cristalização, fusão,

etc., enquanto que por meio da termogravimetria (TG), verificou-se a variação de massa da amostra com a temperatura, até a estabilização da massa residual.

Os ensaios de Espectroscopia de Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR) foram realizados na Central Analítica do Instituto de Química da Universidade de Brasília (CAIQ/UnB), utilizando-se do equipamento Varian, modelo FTIR 640, equipado com detector TA DLATGS e medidas espectroscópicas na região entre 4000 à 400  $\text{cm}^{-1}$ . As análises foram realizadas em solo, que foi fragmentado em almofariz de ágata para obtenção de granulometria fina e homogênea. Para o polímero, este foi submetido a secagem ao ar e posterior fragmentação. Após estes processos, as amostras foram inseridas no equipamento para a identificação de compostos orgânicos e inorgânicos.

A análise elementar de carbono, hidrogênio e nitrogênio (CHN) foi realizada para identificar marcadores orgânicos no polímero, sendo realizada na Central Analítica do Instituto de Química da Universidade de Brasília (CAIQ/UnB) em um analisador elementar modelo Perkin Elmer, modelo EA 2400 Series II. Para esta análise, aproximadamente 15 gramas do polímero foram secas ao ar, objetivando-se analisar o polímero no estado sólido.

Para a identificação de uma ampla gama de elementos químicos presentes em baixa ou alta concentração no solo, no polímero e no solo estabilizado (após cura de 14 dias), utilizou-se de Espectrômetro de Emissão Óptica por Plasma Acoplado Indutivamente (ICP-OES) Agilent Technologies modelo 5100, equipado com nebulizador Meinhard, no laboratório de Geoquímica da UnB. O método utilizado para a preparação da digestão ácida por ácido hidrocloreídrico (HCl) consistiu na utilização do forno mufla, que atinge temperaturas entre 400 e 1200°C. Após a digestão, as amostras foram aspiradas para uma câmara de plasma, capaz de atingir altas temperaturas ( $\sim 10.000^\circ\text{C}$ ) para que fosse realizada a vaporização do solvente e a ionização dos elementos presentes nelas. Com a excitação dos íons e átomos, foram coletadas via espectrômetro óptico as radiações eletromagnéticas convertidas em sinais elétricos características de cada material. Os elementos são detectáveis pelo equipamento após a etapa de calibração, na qual são introduzidas amostras dos elementos identificáveis de forma isolada, obtendo-se as curvas características de cada um.

### **3.2.2 DEFINIÇÃO DAS CONDIÇÕES EXPERIMENTAIS**

Com o objetivo de determinar os parâmetros de compactação ideais do solo, antes da adição de polímero, foram determinadas as curvas de compactação para as energias Proctor Normal e Proctor Intermediária (ABNT, 2025d). Ressalta-se que a investigação do

comportamento mecânico estático e cíclico envolveu apenas a realização dos ensaios na energia Proctor Intermediária, em teor de umidade ótima e massa específica seca máxima para avaliação de resistência à compressão simples. A construção da curva na energia normal serviu para corroborar os resultados obtidos na energia intermediária.

Para avaliar o efeito do teor de aditivo no comportamento mecânico do solo, foi avaliada a RCS de seis dosagens, nos teores de 10%, 20%, 30%, 40%, 50% e 60% de polímero em relação a massa de água a adicionar ao solo durante a compactação. Para atingir o teor de polímero, iniciou-se com a adição de 50% da quantidade total de água a ser adicionada, para promover a redução da energia estática do solo seco e, após uma homogeneização, adicionou-se polímero diluído em água em maior concentração. No final, o teor de polímero em massa de água atingiu as dosagens pré-estabelecidos.

Os CPs foram moldados para o teor de umidade ótimo do solo, sob a energia de compactação Proctor Intermediária. A moldagem dos CPs foi realizada para o grau de compactação  $(GC) \geq 98\%$  e desvio de teor de umidade  $(\Delta\omega_{ót})$  igual a  $\omega_{ót} \pm 2\%$  e curados ao ar por 14 dias, definido a partir dos estudos de Alelvan *et al.* (2022), Boaventura *et al.* (2023) e Lopes *et al.* (2025).

Na sequência, os compósitos foram rompidos em equipamento do tipo Multiprensa, modelo MP-01, fabricado pela Owntec, baseando-se na norma NBR 12770 (ABNT, 2022), para avaliar a resistência à compressão simples (RCS), considerando as condições de não imersão e imersão em água por 4h anteriormente ao rompimento, a fim de verificar o efeito da umidade nesse parâmetro. Ressalta-se que para cada condição experimental foram moldados dois corpos de prova, sendo apresentados os resultados em termos de valores médios.

A partir dessa análise inicial, foi definido o teor de 50% de polímero, em relação a quantidade de água, visto que foi o teor mais eficiente sob os pontos de vista de resistência e estabilidade frente a imersão. Assim, um novo ensaio de compactação foi realizado, considerando a concentração ótima de aditivo, para a definição dos parâmetros de compactação na energia intermediária.

A partir destes resultados, foram moldados 24 corpos-de-prova sob as mesmas condições de controle definidas anteriormente, para intervalos de cura ao ar de 3, 7, 14 e 28 dias, sendo três réplicas para cada condição, isto é, imersa e não imersa. Essa etapa permitiu avaliar a influência do período de cura na evolução de resistência e fixar essa variável para as etapas subsequentes.

### 3.2.3 ENSAIOS TRIAXIAIS ESTÁTICOS

A investigação do comportamento mecânico estático se deu a partir da realização de ensaios de compressão triaxial drenados saturados ( $CD_{sat}$ ), de forma a simular a aplicabilidade em obras de terra, em Prensa Triaxial Axissimétrica Estática de modelo Fulltest FT 17002 – 50 kN (ASTM, 2020). A Figura 3.4 apresenta as etapas do ensaio triaxial estático.

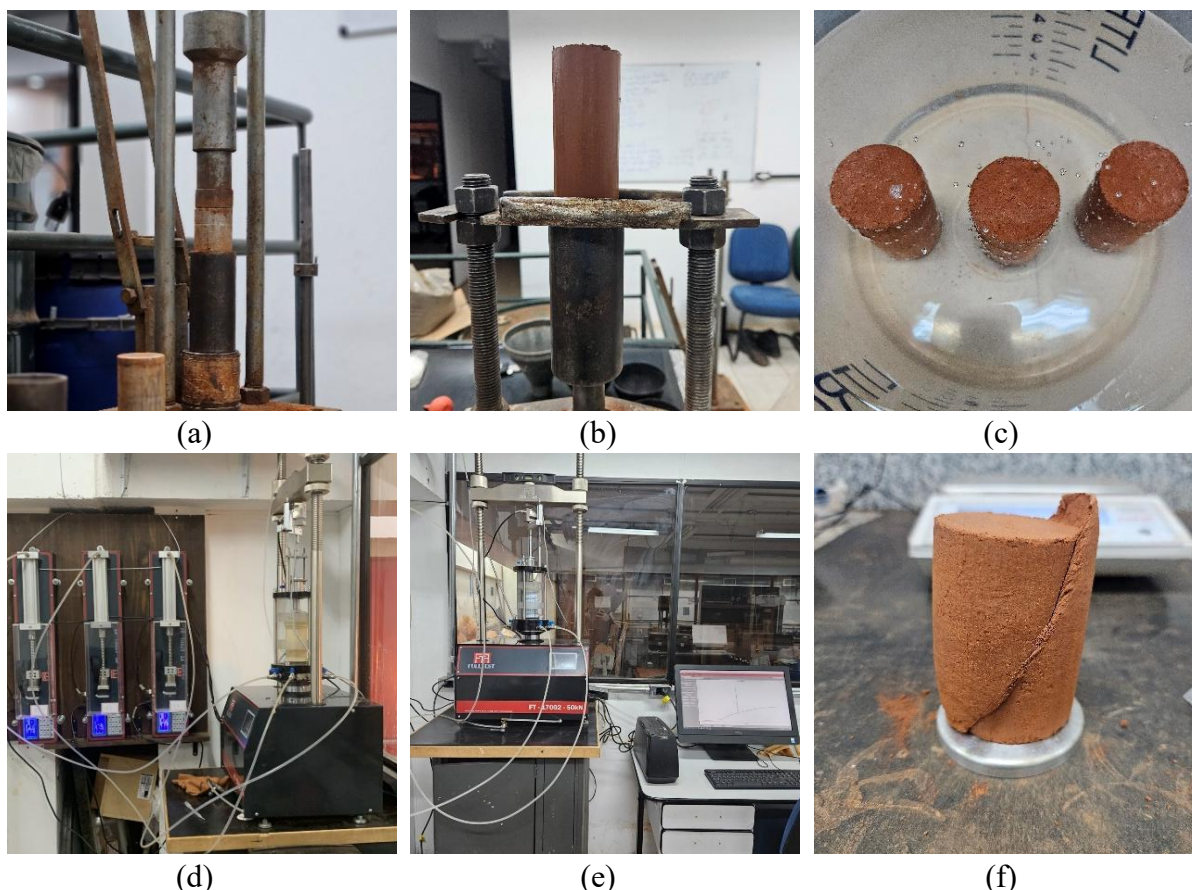


Figura 3.4 – Etapas dos ensaios triaxiais estáticos. (a) moldagem em cilindro Mini-MCV; (b) extrusão do CP; (c) imersão do CP para aumentar grau de saturação; (d) Prensa Triaxial Axissimétrica Estática de modelo Fulltest FT 17002 – 50 kN; (e) etapa de saturação, adensamento e cisalhamento; (f) CP após cisalhamento.

O procedimento de preparo das amostras para os ensaios triaxiais estáticos foi similar ao apresentado para os ensaios de resistência à compressão simples. Os CPs de solo compactado na energia intermediária foram moldados utilizando-se o cilindro Mini-MCV (Figura 3.4a e 3.4b). No caso do solo estabilizado com 50% de polímero em relação a massa de água, os compósitos foram submetidos à cura ao ar pelo período inicial de 14 dias, em ambiente com temperatura e umidade controladas.

A saturação das amostras de solo estabilizado foi executada em duas etapas. Na primeira, os CPs foram imersos em água por, no mínimo, 4h e envolvidos em plástico filme, em ambiente com temperatura controlada. Decorrido este tempo, foram submetidos à saturação

por contrapressão na câmara triaxial. Para cada corpo de prova, mediu-se o parâmetro B de Skempton ao longo do tempo, de forma que o valor resultante fosse igual ou superior a 0,95. Para o solo puro, a primeira etapa de saturação foi realizada por meio de gotejamento contínuo no topo, com drenagem ao fundo do CP, durante 12 horas.

Para a etapa de adensamento, aplicou-se a tensão confinante desejada para cada estágio na câmara triaxial, apresentados na Tabela 3.1, definidos de acordo com a possibilidade de utilização do solo estabilizado em pequenos aterros e estruturas de estabilização de encostas. Manteve-se aberta a válvula da base do CP, de forma que fossem dissipados os excessos de poropressão e, após atingido o  $t_{100}$ , avançou-se para o estágio de cisalhamento, com a velocidade de cisalhamento de 0,04 mm/min, calculada de tal forma que não ocorresse geração significativa de poropressão durante o cisalhamento, conforme definido por Head (1998).

Tabela 3.1 – Tensões confinantes utilizadas nos ensaios triaxiais estáticos.

<b>Condições Experimentais</b>	<b>Simbologia</b>	<b>Tensões confinantes (kPa)</b>
Solo puro	SP	50, 100, 200, 400, 800
Solo estabilizado – 14 dias de cura	SE14d	25, 50, 100, 200, 400, 800

### 3.2.4 ENSAIOS PARA PAVIMENTAÇÃO

Foram realizados ensaios triaxiais cíclicos, com o objetivo de determinar os parâmetros de deslocamento recuperável e plástico, isto é, módulo de resiliência e de deformação permanente, do solo tropical e estabilizado, em Prensa Triaxial Cíclica de modelo Owntec MS 161 (DNIT, 2018a, DNIT, 2018b).

Para os ensaios triaxiais cíclicos, a moldagem dos corpos de prova foi realizada por meio de molde tripartido e compactação sob a energia de Proctor Intermediária e teor de polímero de 50% em relação a massa de água. Após a compactação e verificação do cumprimento do controle de compactação, o solo puro foi imediatamente submetido aos ensaios, ao passo que o solo estabilizado foi submetido à cura ao ar por 14 dias.

Considerando o solo estabilizado com polímero, os CPs se encontravam com umidades gravimétricas da ordem de 3% pós-cura. Logo, o Módulo de Resiliência foi determinado para o compósito na condição seco ao ar e, com o objetivo de minimizar os efeitos da sucção matricial no desempenho dos materiais sob solicitações cíclicas, realizou-se a correção da umidade, por meio de imersão controlada, até que fosse atingida a massa equivalente à umidade ótima de compactação, imediatamente antes da realização do ensaio. A Figura 3.5 apresenta as etapas do ensaio triaxial cíclico.

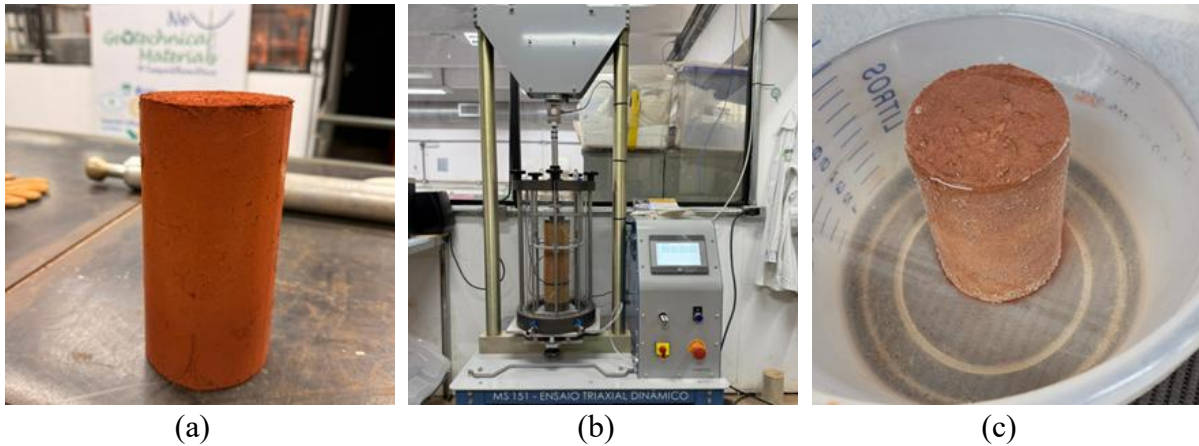


Figura 3.5 – Etapas dos ensaios triaxiais cíclicos. (a) CP após moldagem; (b) Prensa Triaxial Cíclica de modelo Owntec MS 161; (c) imersão do CP para correção de umidade.

O ensaio para a determinação do Módulo de Resiliência ( $M_r$ ) consiste na aplicação repetida de pares de tensões confinante ( $\sigma_3$ ) e desvio ( $\sigma_d$ ). As tensões confinantes são aplicadas na câmara triaxial por meio de um sistema de ar comprimido e a tensão desvio é aplicada por meio da solicitação vertical de um pistão, colocado no topo da amostra, com medição realizadas por meio de célula de carga.

A aplicação das tensões desvio ocorre na frequência de 1 Hz, correspondente a uma aplicação de carga de 0,1 segundo e tempo de repouso de 0,9 segundos, enquanto os deslocamentos verticais são medidos por meio de dois LVDTs. Previamente ao início do ensaio, uma etapa de condicionamento foi realizada, consistindo na aplicação de 500 repetições de cada par de tensões definidos pela norma DNIT 181/2018 (DNIT, 2018a).

O Módulo de resiliência é definido como a relação entre a tensão desvio ( $\sigma_d$ ) e a deformação vertical recuperável ou resiliente ( $\epsilon_r$ ), conforme a equação 3.3.

$$M_r = \sigma_d / \epsilon_r \quad \text{(Equação 3.3)}$$

A determinação do módulo de resiliência se dá a partir da aplicação sequencial de 18 pares de tensão. Para cada par, aplicou-se, no mínimo 10 ciclos de carga, de forma que fosse garantida a constância das leituras, com diferença entre as leituras de, no máximo, 5%.

Os procedimentos de ensaio para a determinação da Deformação Permanente (DP) são similares aos utilizados para a determinação do Módulo de Resiliência. A frequência de aplicação de carga adotada foi de 2 Hz, equivalente a um pulso de 0,1 segundo de carregamento seguido por um tempo de repouso de 0,4 segundos. Inicialmente, aplicou-se 50 ciclos de carga iniciais para garantir total contato entre o pistão e o *top-cap*, denominada de fase de condicionamento.

Após o procedimento inicial, foram aplicados 150.000 ciclos para cada par de tensões fixos ao longo de todo o ensaio, com leituras intermediárias de deformação nos intervalos sugeridos pela norma DNIT 179/2018 (DNIT, 2018b). Foram ensaiados 6 corpos de prova para cada condição experimental, nos pares de tensão propostos por Lima (2020). A autora testou todas as combinações de pares de tensão, para diferentes solos, de acordo com a classificação MCT, e concluiu que a combinação dos 6 pares de tensão apresentados na Tabela 3.2, e utilizados nesta pesquisa, foram os que mais se aproximaram dos resultados quando comparados aos 9 corpos de prova da metodologia tradicional.

A Deformação Permanente ( $\varepsilon_p$ ) é definida como a relação entre o deslocamento plástico ou permanente ( $\delta_p$ ) e a altura de referência do deslocamento ( $H_0$ ), conforme a equação 3.4.

$$\varepsilon_p = \delta_p / H_0 \quad (\text{Equação 3.4})$$

Tabela 3.2 – Estados de tensão utilizados para a determinação da Deformação Permanente.

<b>Tensão Confinante</b> $\sigma_3$ (MPa)	<b>Tensão Confinante</b> $\sigma_d$ (MPa)	<b>Razão de Tensões</b> $\sigma_d / \sigma_3$	<b>Número de Ciclos</b>
0,040	0,040	1	150.000
0,040	0,120	3	150.000
0,080	0,080	1	150.000
0,080	0,240	3	150.000
0,120	0,240	2	150.000
0,120	0,360	3	150.000

O modelo matemático para a deformação permanente em solos descrito por norma do DNIT (2018b) foi desenvolvido por Guimarães (2009) e é calculado conforme Equação 3.5, onde  $\sigma_3$  é a tensão confinante aplicada no ensaio (em MPa),  $\sigma_d$  é a tensão desviadora aplicada (em MPa),  $N$  é o número de ciclos de aplicação de carga,  $\rho_0$  é a tensão de referência (pressão atmosférica) e  $\psi_1$ ,  $\psi_2$ ,  $\psi_3$  e  $\psi_4$  são os coeficientes de regressão do modelo.

$$\varepsilon_p (\%) = \psi_1 \cdot \left(\frac{\sigma_3}{\rho_0}\right)^{\psi_2} \cdot \left(\frac{\sigma_d}{\rho_0}\right)^{\psi_3} \cdot N^{\psi_4} \quad (\text{Equação 3.5})$$

Mota *et al.* (2024) apresentaram o conceito de Curva Mestre para a modelagem da Deformação Permanente, com objetivos de otimizar a etapa experimental de determinação da DP. O procedimento para a determinação da Curva Mestre baseia-se na definição de um fator de tensão global (S) e, em seguida, calcula-se o ajuste da curva (PD S).

O Parâmetro S sintetiza o estado de tensões agindo sobre o material sob um único valor escalar e é calculado conforme a Equação 3.6, onde  $\sigma_3$  é a tensão confinante aplicada no ensaio (em MPa),  $\sigma_d$  é a tensão desviadora aplicada (em MPa), k é uma tensão de normalização igual a 0,040 MPa, equivalente à menor tensão desviadora aplicada na etapa experimental,  $s_1$  e  $s_2$  são coeficientes de regressão.

$$S = \left(\frac{\sigma_3}{k}\right)^{s_1} \cdot \left(\frac{\sigma_d}{\sigma_3}\right)^{s_2} \quad (\text{Equação 3.6})$$

A partir da definição do Parâmetro S, a deformação permanente pode ser determinada por meio da função de potência apresentada na Equação 3.7, onde N é o número de ciclos de carga aplicados,  $a_1$ ,  $a_2$  e  $a_3$  são coeficientes de regressão.

$$PD S = a_1 \cdot S^{a_2} \cdot N^{a_3} \quad (\text{Equação 3.7})$$

Por fim, ajustou-se os dados obtidos por meio de um par de tensões de referência, gerando-se a Curva Mestre, definida por uma função de potência, descrita pela Equação 3.8. O Parâmetro S de referência ( $S_{ref}$ ) equivale à um ajuste para o par de tensões 0,080/0,240 ( $\sigma_3/\sigma_d$ , MPa/MPa), que gerou maiores deformações no solo, apresentado na Equação 3.9 e o Número Reduzido de Ciclos ( $N_{red}$ ) é apresentado na Equação 3.10.

$$PD S = a_1 \cdot S_{ref}^{a_2} \cdot N_{red}^{a_3} \quad (\text{Equação 3.8})$$

$$S_{ref} = \left(\frac{0.080}{0.040}\right)^{s_1} \cdot \left(\frac{0.240}{0.040}\right)^{s_2} \quad (\text{Equação 3.9})$$

$$N_{red} = N \cdot SF \quad (\text{Equação 3.10})$$

O Parâmetro SF foi obtido após o ajuste e definição dos parâmetros  $s_1$ ,  $s_2$ ,  $a_1$ ,  $a_2$  e  $a_3$ , igualando-se as Equações 3-7 e 3-8, resultando na Equação 3.11.

$$SF = \left(\frac{S}{S_{ref}}\right)^{a_2/a_3} \quad (\text{Equação 3.11})$$

Ainda, dada a escassez de trabalhos que investigaram a influência da estabilização polimérica de solo tropical em ensaios de MR e DP, realizou-se ensaios de Índice de Suporte Califórnia (ISC), conforme NBR 9895 (ABNT, 2025e), a fim de possibilitar a comparação com

estudos disponíveis na literatura. Após a moldagem, a cura dos corpos de prova estabilizados ocorreu dentro do molde, com as fases em contato com ar, a fim de permitir as reações de estabilização, ainda que de forma restrita.

Findo o período de cura de 14 dias, os CPs foram imersos em água por um período de 96 horas a fim de analisar o potencial de expansão. Na sequência, foi conduzida a etapa de penetração, com velocidade constante de 1,27 mm/min, a fim de obter o ISC.

### **3.2.5 ANÁLISES MICROESTRUTURAIS**

A análise microestrutural do solo puro e estabilizado com polímero foi realizada a fim de identificar alterações dos vazios inter-agregados e efeitos de cimentantes causados pela inserção do polímero no solo tropical, compactado e após períodos de cura, envolvendo duas técnicas distintas.

Primeiramente realizou-se o ensaio de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), com avaliação de Espectroscopia por Energia Dispersiva (EDS), permitindo a avaliação dos principais elementos, de forma semi-qualitativa. Essas análises foram realizadas no equipamento JEOL JSM 7001F, operado sob a tensão de aproximação de 15 kV, no Laboratório de Microscopia e Microanálise do Instituto de Biologia da Universidade de Brasília (LMM-UnB). As amostras para o MEV foram metalizadas em um dispositivo de revestimento por pulverização catódica a alto vácuo, de modelo Leica EMSCD-500. No caso das amostras de solo estabilizado com polímero, foi avaliado o tempo de cura de 14 dias, para a avaliação de alterações microestruturais do solo estabilizado.

Em continuidade, foram realizados ensaios de Porosimetria por Intrusão de Mercúrio (PIM) no laboratório de Física da Universidade de São Paulo (USP) em São Carlos, a fim de avaliar os efeitos das reações poliméricas na frequência e distribuição do diâmetro dos poros na matriz de solo, conforme norma ASTM 4404-25 (ASTM, 2025). Para isso, moldou-se amostra de solo natural compactado e solo estabilizado (seco ao ar por 14 dias) com dimensões de, aproximadamente, 1 cm<sup>3</sup>, as quais foram inseridas em porosímetro por intrusão de mercúrio modelo Autopore II 9320, fabricado pela Micromeritics Instruments Corporation, capaz de realizar a leitura de poros entre 360 e 0,003 μm, a partir da aplicação de pressão de até 60.000 psi.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA E CLASSIFICAÇÃO DO SOLO

A Figura 4.1 apresenta a curva de distribuição granulométrica do solo, enquanto a Tabela 4.1 apresenta os valores numéricos das faixas granulométricas, obtidas com e sem o uso de defloculante.

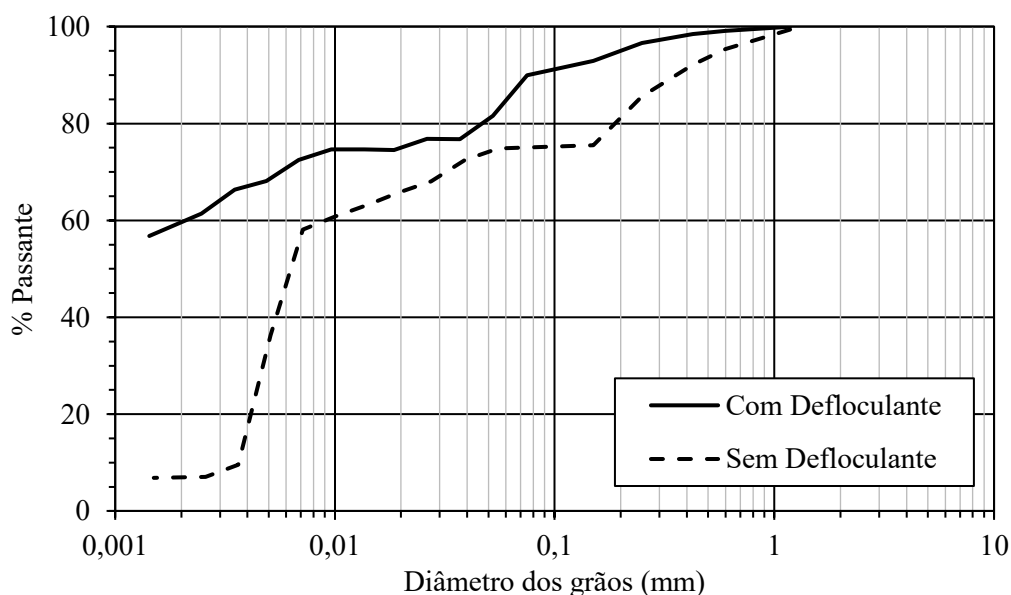


Figura 4.1 – Curva de Distribuição Granulométrica.

Tabela 4.1 – Faixas granulométricas do solo – com e sem o uso de defloculante.

Parâmetro	Unidade	Com Defl.	Sem Defl.
Pedregulho médio (6 – 20 mm)	%	0	0
Pedregulho fino (2 – 6 mm)	%	1	1
Areia grossa (0,6 – 2 mm)	%	4	4
Areia média (0,2 – 0,6 mm)	%	8	15
Areia fina (0,06 – 0,2 mm)	%	17	5
Silte (0,002 – 0,06 mm)	%	10	67
Argila (<0,002 mm)	%	60	8

Os resultados da caracterização física do solo e do solo estabilizado com polímero são apresentados na Tabela 4.2. Para o solo, os resultados de LL e IP indicam um solo pouco plástico e sensível a variações de umidade. De acordo com o Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS) e *American Association of State Highway and Transportation Officials* (AASHTO), o material é classificado como silte de baixa plasticidade (ML) e A-5, respectivamente, demonstrando que mesmo com 60% de argila, o comportamento físico do solo se aproxima de um silte pouco argiloso. Por fim, obteve-se coeficiente de argilosidade ( $c'$ ) igual

a 2,3 e coeficiente de laterização ( $e'$ ) igual a 1,05, por meio dos quais classificou-se o solo pela metodologia MCT como LG', isto é, solo argiloso de comportamento laterítico.

Tabela 4.2 – Caracterização física do solo.

Parâmetro	Unidade	Solo	Compósito
Massa Real dos Grãos	g/cm <sup>3</sup>	2,61	2,38
Limite de Liquidez – LL	%	44	44
Limite de Plasticidade – LP	%	40	38
Índice de Plasticidade – IP	%	4	6
pH em KCl	-	6,07	8,20
pH em H <sub>2</sub> O	-	7,04	8,13

Observa-se, portanto, que as características físicas do solo são mantidas sob o ponto de vista geotécnico, mesmo após a inserção do polímero na mistura, mantendo-se o valor de limite de liquidez e reduzindo-se o limite de plasticidade, levando a um índice de plasticidade de 6%. Ocorreu, no entanto, grande alteração no valor obtido para a massa real dos grãos, saindo de 2,61 g/cm<sup>3</sup> para 2,38 g/cm<sup>3</sup>. Ao aderir-se aos grãos e partículas do solo, a emulsão polimérica preenche espaços vazios e, por ser proporcionalmente mais leve que os grãos, causa redução nos valores de massa específica.

## 4.2 MINERALOGIA

A Figura 4.2 apresenta o difratograma do solo, em que identifica-se a composição mineralógica do solo predominantemente formada pelo mineral quartzo, argilomineral caulinita e os óxi-hidróxidos de alumínio e ferro gibbsita, hematita e maghemita.

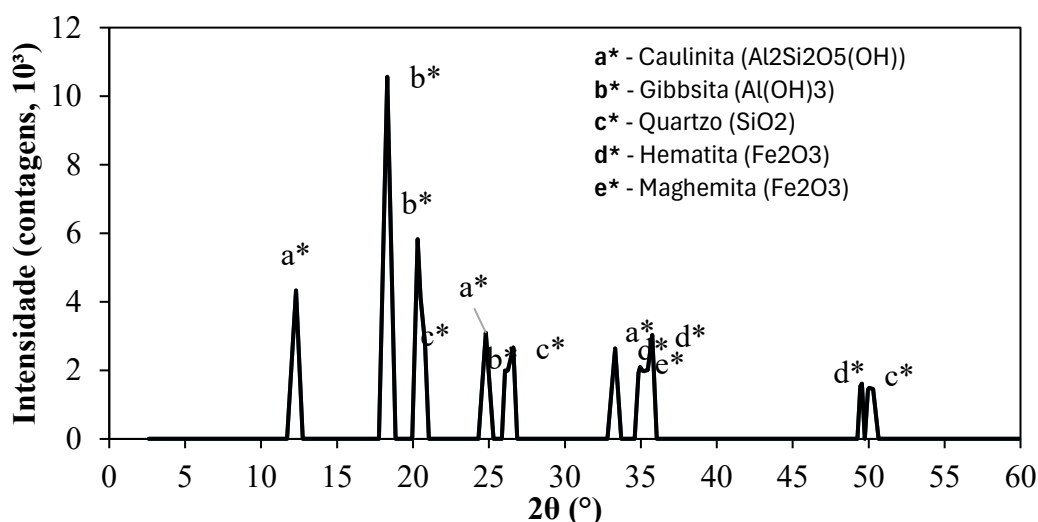


Figura 4.2 – Resultados da Difração de Raios-X.

A partir dos resultados, calculou-se o índice de Hinckley (IH), que é utilizado para avaliar a cristalinidade da caulinita, e é calculado como uma relação entre a intensidade de dois

picos identificados de caulinita, localizados quando o ângulo de  $2\theta$  é de aproximadamente  $12,4^\circ$  e  $24,9^\circ$ . Obteve-se índice IH de 0,45, o que indica uma menor cristalinidade da caulinita. Na prática, este baixo valor para o IH representa caulinitas típicas com maiores superfícies específicas (TOLEDO *et al.*, 2002). Conforme observado por Coelho e Santos (2007), o solo em análise, rico em caulinita, apresenta-se com características adequadas para o recebimento de estabilização polimérica, especialmente devido ao desbalanceamento natural de cargas elétricas.

### 4.3 FTIR

A análise de Espectroscopia de Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR) permitiu identificar a presença de picos de transmitância para o solo e polímero, compreendidos na faixa de espectro entre  $4000\text{ cm}^{-1}$  e  $500\text{ cm}^{-1}$ , conforme visualizados na Figura 4.3. Na região compreendida entre  $3698$  e  $3620\text{ cm}^{-1}$  existe uma região característica da presença de caulinita, demonstrando o estiramento de grupos de hidroxila (OH) estruturais, enquanto o grande pico próximo a  $3430\text{ cm}^{-1}$  representa as vibrações de água adsorvida ou de hidratação (MADEJOVÁ, 2003). Próximo à faixa de espectro de  $1630\text{ cm}^{-1}$  existe uma banda associada à deformação molecular da molécula de água.

Madejová (2003) ainda fornece a base para a identificação de silicatos presentes na cela unitária dos argilominerais. Para o caso em análise, a ocorrência de bandas bem definidas próximos a  $1000\text{ cm}^{-1}$  é o principal indicativo da sílica presente na folha tetraédrica da caulinita, definido pelo alongamento Si-O-Si. Ainda, segundo o autor, a presença de um pico próximo a  $915\text{ cm}^{-1}$  é típica dos hidróxidos de alumínio, também presentes na folha octaédrica da caulinita.

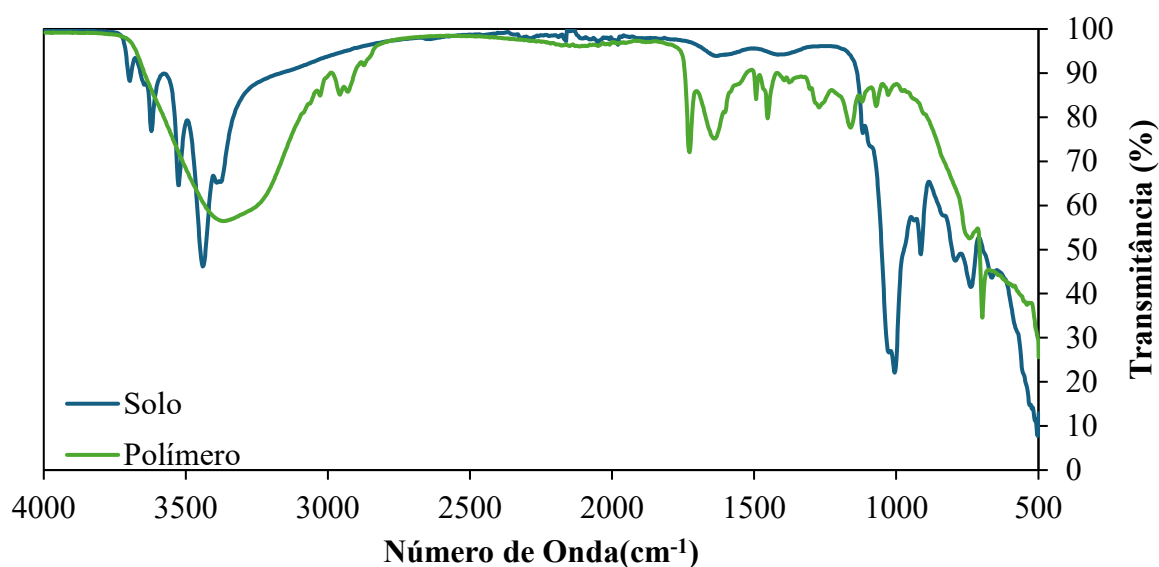


Figura 4.3 – Resultado da Análise FTIR.

A banda próxima a  $790\text{ cm}^{-1}$  indica a presença de quartzo, enquanto a banda inferior a  $600\text{ cm}^{-1}$  representa vibrações de deformação angular, denominadas *bending*, e vibrações da rede cristalina da caulinita.

Quanto ao polímero, a análise do espectro de infravermelho revela as principais bandas que definem sua estrutura orgânica e cadeia principal. Observam-se estiramentos do tipo C-H alifáticos em  $2900\text{ cm}^{-1}$  e  $2850\text{ cm}^{-1}$ , correspondentes às vibrações assimétricas e simétricas de grupos metileno ( $\text{CH}_2$ ) e metila ( $\text{CH}_3$ ), conforme detalhado por Silverstein, Webster *et al.* (2005). Adicionalmente, a banda larga com pico em, aproximadamente,  $3300\text{ cm}^{-1}$  sugere a presença de grupos hidroxila (OH), associados especialmente pelas ligações por pontes de hidrogênio, dadas pela natureza aquosa da amostra, que mesmo após a secagem, preservou uma quantidade elevada de água residual. Nesta zona, é possível a identificação de grupos amina (N-H), que diferentemente do observado, se apresentam de forma mais definida, conforme os autores.

A banda definida próxima a  $1727\text{ cm}^{-1}$  é responsável pela identificação do polímero. De acordo com Silverstein *et al.* (2005), enquanto ésteres alifáticos comuns apresentam estiramentos de carbonila (C=O) em frequências mais elevadas, a frequência registrada nessa zona registrada é característica de ésteres acrílicos, nos quais o efeito de ressonância da conjugação reduz a constante de força da ligação C=O, evidenciando a natureza acrílica da amostra analisada.

#### 4.4 ANÁLISES ELEMENTARES

A Tabela 4.3 reúne os resultados dos óxidos maiores identificados no solo via FRX. Os resultados confirmaram a elevada quantidade de óxidos de alumínio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) e óxidos de ferro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), além de dióxido de silício ( $\text{SiO}_2$ ). Estas quantidades são coerentes com solos altamente intemperizados, no qual a hidrólise avançada promoveu a concentração de  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  e óxido de titânio ( $\text{TiO}_2$ ), por meio da lixiviação dos demais óxidos. A presença de CaO está associada a contaminação durante a preparação da amostra em almofariz e mão de gral.

Tabela 4.3 – Análise química dos óxidos maiores do solo analisados via FRX.

Óxidos analisados	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{SiO}_2$	$\text{TiO}_2$	CaO	K <sub>2</sub> O	MgO	MnO	$\text{Na}_2\text{O}$	$\text{P}_2\text{O}_5$	$\text{SO}_3$	LOI <sup>2</sup>	Soma (%)
Valor (%)	41,40	15,17	14,63	2,23	1,86	0,22	<LQ <sup>1</sup>	<LQ <sup>1</sup>	<LQ <sup>1</sup>	<LQ <sup>1</sup>	<LQ <sup>1</sup>	23,65	99,15

<sup>1</sup> abaixo do limite de quantificação; <sup>2</sup> perda ao fogo

Dessa forma, o Ki calculado, conforme Equação 3.1, é de 0,6, indicativo de solo altamente intemperizado. A razão sílica-sesquióxidos, conforme apresentada por Gidigas (1976), contempla a relação direta entre a quantidade percentual de sílica no numerador e a soma dos óxidos de alumínio e ferro no denominador da expressão. Assim, a relação calculada é de 0,25. O valor de CIA, calculado conforme a Equação 3.2 é de 99,4%, equivalente a argilas residuais, altamente intemperizadas, confirmando todas as observações feitas quanto à evolução pedogenética do solo em estudo.

A Tabela 4.4 reúne o quantitativo dos elementos menores obtidos pela FRX. Com base nos resultados, observa-se que elementos químicos relativamente imóveis, dos grupos Al (Al, Ga), Ti (Ti, Zr, Hf) e elementos de terras raras (incluindo Y, Sc) apresentaram concentrações superiores ao limite de detecção mínimo do ensaio. Isso corrobora com as observações realizadas por Taylor e McLennan (1985), que ainda indica que elementos alcalinos e alcalino terrosos são altamente solúveis, razão pela qual a presença de Rb e Ba se encontram abaixo dos limites mínimos de detecção.

Tabela 4.4 – Análise química dos elementos menores analisados via FRX.

<b>Elementos analisados</b>	<b>Zr</b>	<b>V</b>	<b>Cr</b>	<b>Ga</b>	<b>Sc</b>	<b>Th</b>	<b>Nb</b>	<b>Ni</b>	<b>Sr</b>	<b>Y</b>	<b>Cu</b>	<b>As</b>
Valor (ppm)	488	311	192	52	37	36	34	26	26	26	24	22
<b>Elementos analisados</b>	<b>Zn</b>	<b>Co</b>	<b>Rb</b>	<b>Mo</b>	<b>Cd</b>	<b>Sn</b>	<b>Sb</b>	<b>Ba</b>	<b>La</b>	<b>Ce</b>	<b>Pb</b>	<b>U</b>
Valor (ppm)	19	< LQ <sup>1</sup>	< LQ <sup>1</sup>	< LQ <sup>1</sup>	< LQ <sup>1</sup>	< LQ <sup>1</sup>	< LQ <sup>1</sup>	< LQ <sup>1</sup>	< LQ <sup>1</sup>	< LQ <sup>1</sup>	< LQ <sup>1</sup>	< LQ <sup>1</sup>

<sup>1</sup> abaixo do limite de quantificação.

A Tabela 4.5 apresenta as concentrações percentuais dos principais óxidos presentes no solo puro (SP), solo estabilizado (SE) e no polímero, avaliados pela técnica de ICP-OES. No solo, observa-se a confirmação da predominância de alumínio, ferro e sílica, demonstrando a quantidade elevada óxidos e hidróxidos de ferro e de alumínio. Esses indicativos corroboram com a característica de solo altamente intemperizado, constatando a permanência de titânio e a baixa disponibilidade de outros elementos, devido à lixiviação. Novamente, observa-se a presença de óxido de cálcio, bastante pronunciada no solo natural, associado, especialmente à contaminação durante o preparo da amostra, conforme previamente indicado no ensaio de FRX.

De acordo com Carre e Schultz (1983), a alta presença de alumínio no solo, previamente à estabilização, pode interferir nas ligações do polímero com o solo devido às dificuldades associadas à adsorção polimérica em alumínio oxidado. Em ambiente básico, o alumínio apresenta-se em fases separadas, em contraste com a apresentação na forma de íons

trocáveis, quando em ambientes ácidos (GOLDBERG, 1989). Dessa forma, permite-se inferir que o polímero com pH básico pode reduzir a reatividade direta com solos ricos em hidróxido de alumínio.

Tabela 4.5 – Análise química dos elementos presentes no solo analisados via ICP-OES.

<b>Óxidos analisados</b>	<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (%)</b>	<b>SiO<sub>2</sub> (%)</b>	<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (%)</b>	<b>K<sub>2</sub>O (%)</b>	<b>CaO (%)</b>	<b>TiO<sub>2</sub> (%)</b>	<b>Na<sub>2</sub>O (%)</b>	<b>MgO (%)</b>
<b>SP</b>	42,85	18,84	14,46	2,49	2,33	2,01	0,81	0,25
<b>SE</b>	41,63	14,72	14,15	1,81	0,28	1,95	0,59	0,09
<b>Polímero</b>	0,09	1,00	0,38	0,88	0,15	0,00	0,13	0,02

No polímero, observou-se a confirmação da relativa inexistência de minerais inorgânicos, dada a baixa presença dos elementos identificáveis por essa técnica na amostra. Permite-se, então, confirmar a natureza orgânica do polímero utilizado.

Boaventura (2025), avaliando outro polímero comercial, observou que ao realizar a análise elementar pela técnica de ICP-OES não foram identificados sinais significativos, associando esta ausência com a implicação de que o material é predominantemente baseado em cadeias poliméricas formadas por elementos leves não quantificados por ICP-OES, como carbono, hidrogênio, oxigênio e, eventualmente, nitrogênio.

Portanto, foi realizada para o polímero uma análise elementar de carbono, hidrogênio e nitrogênio (CHN), os quais são apresentados na Tabela 4.6, comprovando a elevada quantidade de carbono na composição química do polímero identificada na análise de FTIR. Comparativamente, Boaventura (2025) obteve resultados similares para a análise CHN, com 69,03% de carbono, 7,01% de hidrogênio e 0,52% de nitrogênio. A alta presença de carbono no polímero condiz, também, com as observações apresentadas por Vinod, *et al* (2010), no qual um polímero lignosulfonado apresentou estrutura com predominância de carbono, oxigênio, enxofre e sódio.

Tabela 4.6 – Análise elementar do polímero (CHN).

<b>Elementos analisados</b>	<b>C (%)</b>	<b>H (%)</b>	<b>N (%)</b>
<b>Valor</b>	71,96	8,56	0,76

De acordo com Boaventura (2025), espera-se que, dadas as similaridades dos polímeros sintéticos, não são esperadas mudanças na composição e no balanço inorgânico do solo após a adição. Os possíveis ganhos de resistência e comportamento são, portanto, associados aos efeitos químicos de ligação e reorganização entre partículas, especialmente após a secagem, conforme propostos por Vinod *et al.* (2010), Liu *et al.* (2011) e Boaventura *et al.* (2023).

## 4.5 TG/DSC

A Figura 4.4 demonstra os resultados da análise térmica (TG/DSC), evidenciando os principais picos de perda de massa e os resultados da curva de desidratação do solo tropical avaliado em comparação com curvas típicas, apresentadas por Gidigasu (1976). Observa-se semelhança entre os materiais de base e o solo analisado, com o formato das curvas aparentando um híbrido entre caulinita e gibbsita.

Para o solo, a perda de massa total calculada ao final do ensaio é de 25,3%, valor muito próximo ao encontrado na avaliação de perda na ignição (LOI) do ensaio de FRX (23,65%). Isolando-se o polímero, a perda de massa total calculada ao final do ensaio é de 99,7%, confirmando a virtual inexistência de minerais inorgânicos, uma vez que praticamente todo o material se volatilizou, como característica de polímeros orgânicos.

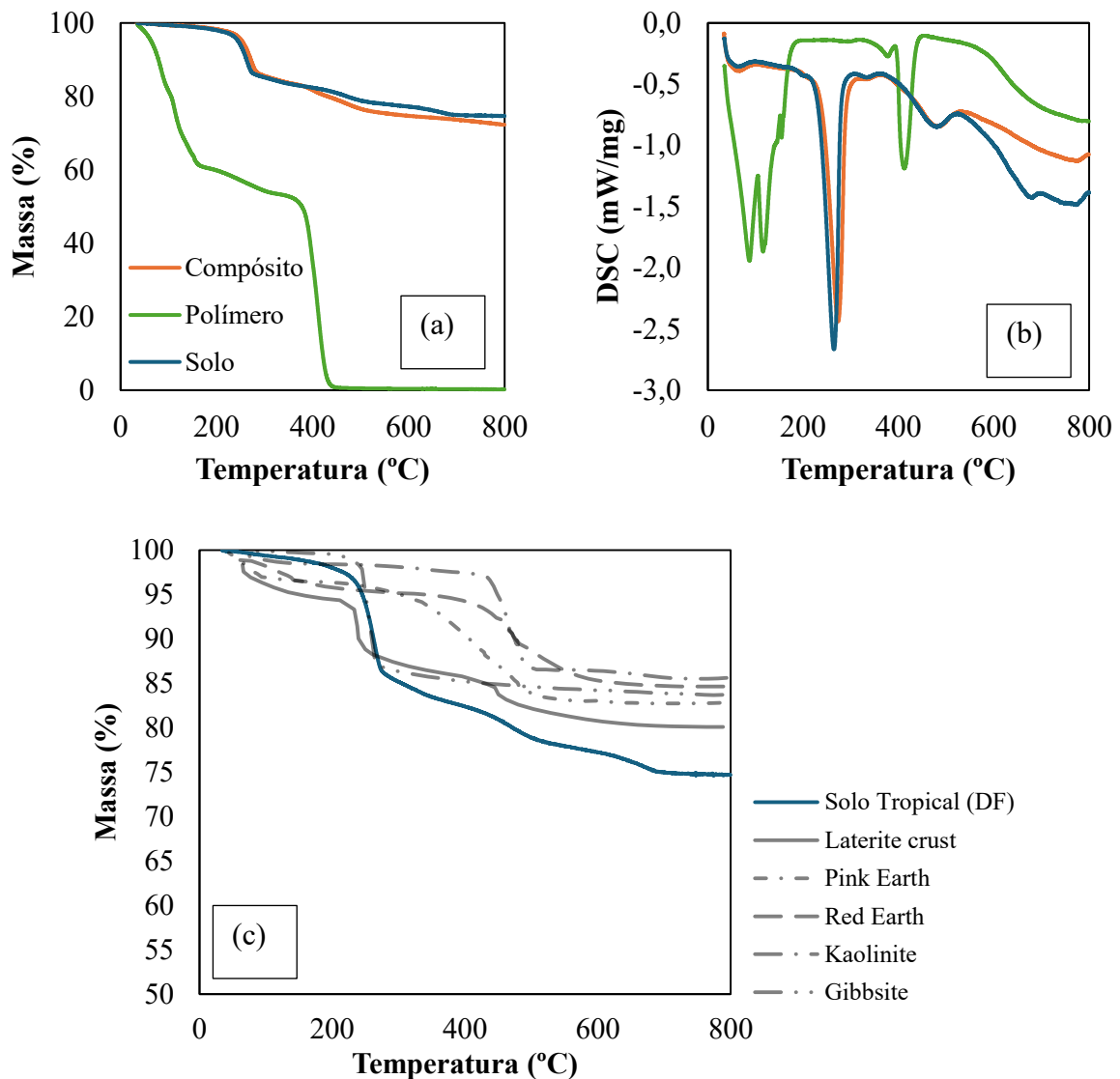


Figura 4.4 – Resultados da análise térmica do solo, polímero e compósito. (a) TG; (b) DSC; (c) comparação com curvas de referência, conforme Gidigasu, 1976.

Por fim, avaliando-se o compósito solo-polímero, nota-se pouca alteração no formato da curva entre o solo puro e compósito, evidenciando que a matriz de solo, pela maior quantidade presente, governa o comportamento termogravimétrico. A perda de massa total da mistura foi de 27,7%. O ligeiro aumento na perda de massa tem relação direta com a dosagem do aditivo, uma vez que o polímero é volatilizado por completo sob elevação de temperatura.

A Figura 4.5 apresenta a curva de Termogravimetria Derivada (DTG) do solo, do polímero e da mistura solo-polímero, evidenciando os principais picos de perda de massa. Observa-se a presença do mesmo pico, em torno de 275°C, definido como indicador da presença de gibbsita e de goethita, tanto na curva de solo quanto na curva do solo estabilizado. O novo pico próximo a 400°C criado na mistura pode ser associado à inserção do polímero, no ponto em que ocorre a degradação polimérica, contrastando com a matriz, que não apresentou tal comportamento.

Além disso, é possível identificar, no solo, uma grande perda de massa compreendida entre 235°C e 275°C, com pico em 265°C, com perda de massa total de 13%, associada à desidroxilação da gibbsita e goethita, de acordo com resultados apresentados por Földvári (2011) e Ferreira et al. (2022). Ainda conforme os autores, a segunda perda de massa compreendida entre 403°C e 511°C, com pico em 480°C, pode ser associada a desidroxilação da caulinita. Por fim, uma terceira perda de massa compreendida entre 626 e 689°C, com pico em 679°C, pode ser associado ao ponto de Curie da hematita, isto é, a temperatura que um mineral ferromagnético se torna paramagnético sob aquecimento.

Já para o polímero, a porção inicial dos resultados, com temperaturas entre 70 e 150°C, indica a volatilização de água residual ou outras impurezas presentes na emulsão polimérica. Na sequência, o restante de material é volatilizado quase por completo, confirmando as observações de Hirschler e Morgan (2008), que estabeleceram que o mecanismo de queima de materiais poliméricos ocorre com a quebra das longas cadeias de moléculas que formam os polímeros em fragmentos menores, acelerando, assim, o processo de volatilização. Os autores apresentam uma série de curvas Termogravimétricas Derivadas (DTG) características para diversos polímeros, que indicam picos na mesma região do polímero em estudo, próximo a 400°C. Os resultados apresentados pela análise do polímero são, também, consistentes com os obtidos por Malhotra *et al.* (1975), que atribuíram a rápida volatilização de um poliestireno à segmentação das cadeias poliméricas.

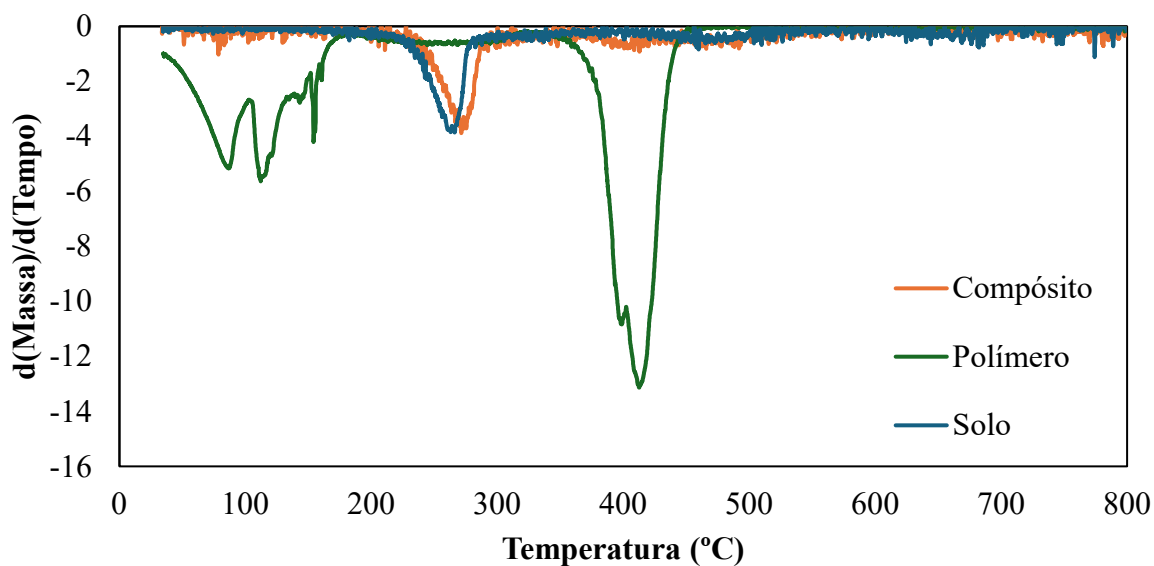


Figura 4.5 – Curva de Termogravimetria Derivada (DTG) do solo, polímero e composto.

## 4.6 DEFINIÇÃO DAS CONDIÇÕES EXPERIMENTAIS

### 4.6.1 PARÂMETROS DE COMPACTAÇÃO DO SOLO PURO

As curvas de compactação para o solo na energia de Proctor Normal e Intermediária estão apresentadas na Figura 4.6a. Observa-se aumento da massa específica seca máxima com o aumento da energia de Proctor Normal para Intermediária, de 1,342 g/cm<sup>3</sup> para 1,431 g/cm<sup>3</sup>, ao mesmo tempo em que ocorre diminuição do teor de umidade ótima. ambos os fenômenos relacionados à maior aproximação das partículas que resulta em maior densificação do meio e reduz os vazios a serem preenchidos por água.

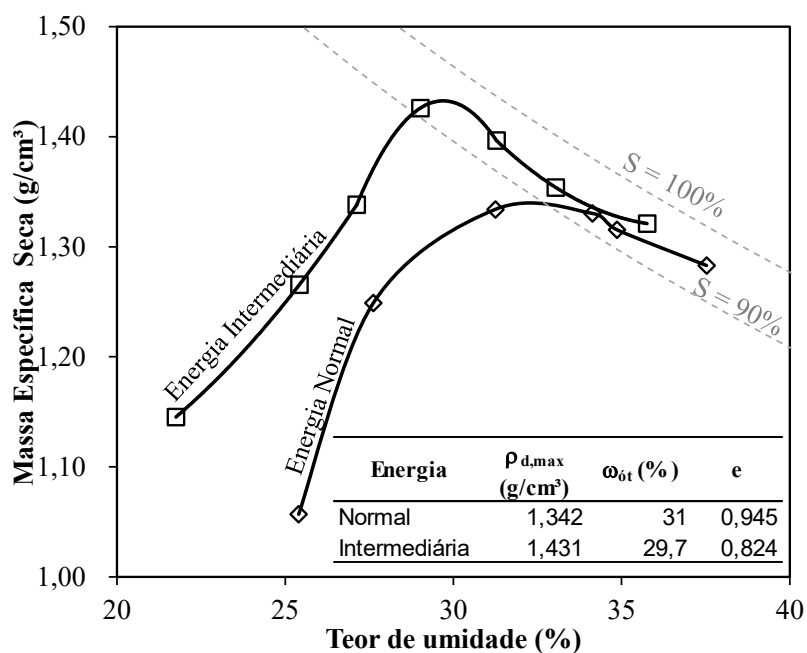


Figura 4.6 – Curvas e parâmetros de Compactação do solo compactado nas Energias Proctor Normal e Intermediária.

#### 4.6.2 DOSAGEM

As curvas de tensão *versus* deformação oriundas da resistência à compressão simples (RCS) para definição do teor de polímero em massa de água na condição não imersa e imersa aos 14 dias de cura são apresentados na Figura 4.7. O formato das curvas demonstra um comportamento dúctil do tipo *strain-softening*, observando-se um rápido incremento de resistência seguido de uma rápida queda de resistência. Liu *et al.* (2011) observaram comportamento similar com a evolução do tempo de secagem. No entanto, os autores constataram que a resistência residual também era maior conforme o aumento do tempo de cura. Tal fenômeno também foi observado aos 14 dias de cura, de forma que o SE-50 produziu tensão pós pico de ruptura de 300 kPa, na condição imersa, e 1680 kPa, na condição não imersa. Os valores obtidos são, inclusive superiores à resistência de pico do solo puro, de 290 kPa.

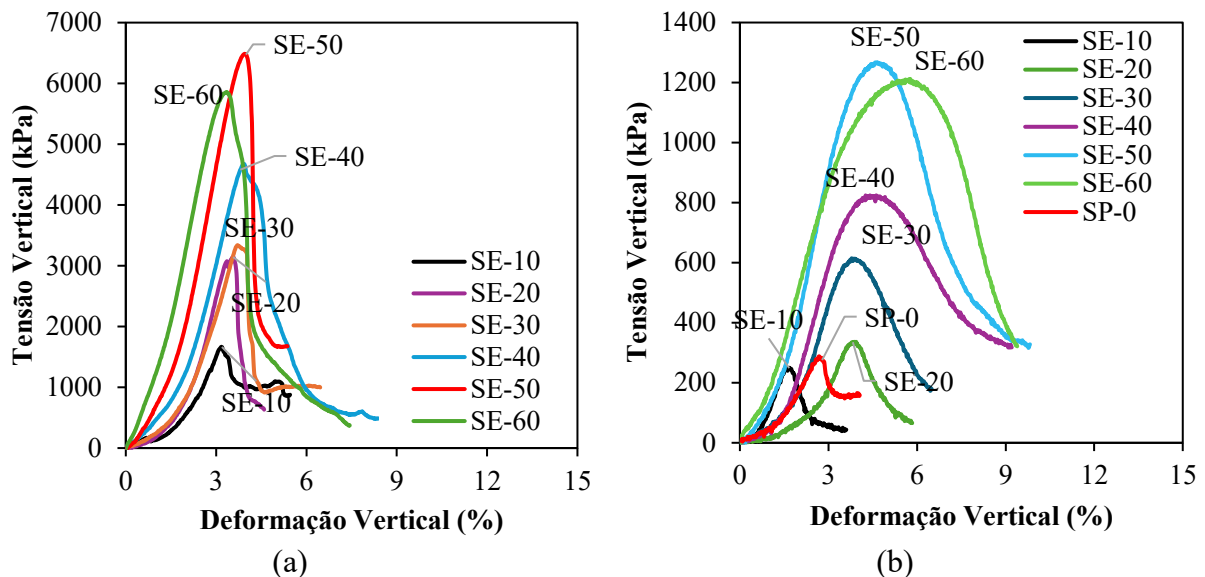


Figura 4.7 – Curvas de tensão *versus* deformação do solo: (a) não imerso e (b) pós-imersão.

O valor médio de RCS para as diversas condições experimentais investigadas é apresentado na Figura 4.8. Observa-se que a RCS apresentou valores máximos para o teor de 50% do polímero em massa de água, para ambas as condições de análise. O acréscimo de resistência comparado ao solo puro foi de 800%, diferentemente do observado por Tingle e Santoni (2003), que obtiveram redução na resistência à compressão simples maior que 50% para solos argilosos estabilizados com polímeros após a imersão em água.

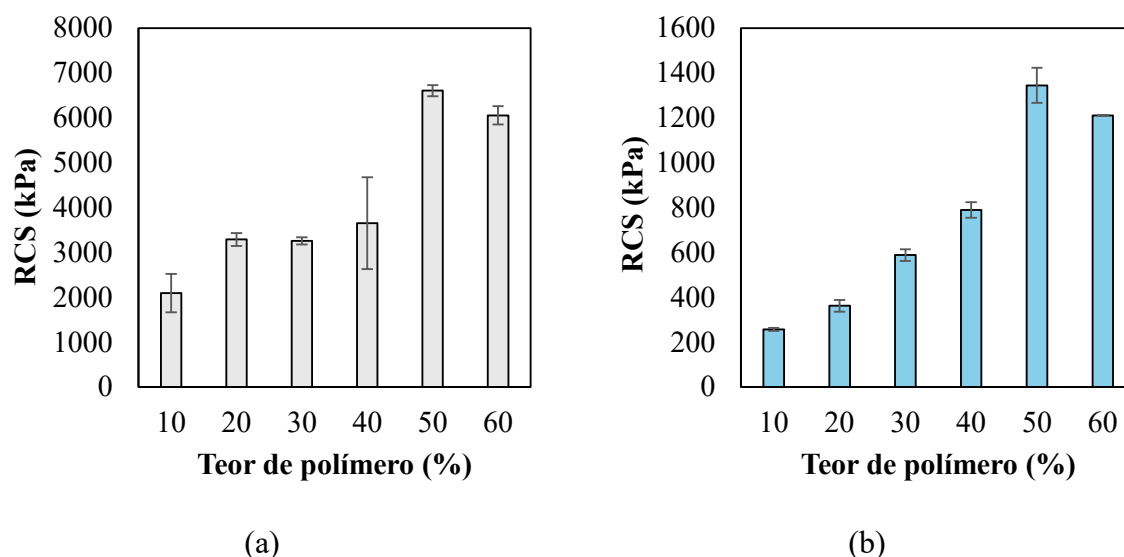


Figura 4.8 –Resistência a Compressão Simples para solo estabilizado: (a) não imerso e (b) imerso.

Ressalta-se que a resistência média do solo estabilizado demonstrou-se constante com teores mais baixos de polímero em massa de água, apresentando maiores valores quando avaliado o teor de concentração de 50% (SE-50). Após esta, ocorreu redução na tensão vertical suportada, indicando que, para este solo, nesta condição de compactação, o teor ideal de polímero é de 50% da quantidade de água adicionada. Avaliando teores de polímero de estireno para estabilização, Arasan et al. (2023) demonstraram ganhos crescentes na resistência à compressão simples em areias, porém não observaram redução na tensão vertical suportada, especialmente dado que a maior concentração estudada na referida pesquisa foi de 30%.

A diferença expressiva entre as resistências nas condições não imersa e pós imersão indicam que parte significativa da resistência inicial está associada à sucção matricial e sua redução após imersão confirma a perda da contribuição da sucção. No entanto, as misturas com maior teor de polímero em massa de água mantiveram resistência residual superior, sugerindo que o polímero promove mecanismos adicionais de ligação interpartícula independentes da sucção.

Analisando os resultados obtidos de RCS de acordo com a *Road Note 31*, que estabelece RCS mínima pós-imersão de 1,5 MPa para utilização de solo estabilizado em camadas de base de pavimento (ROLT et al., 2022), e com a ABNT NBR 12.253, que estabelece RCS mínima de 2,1 MPa para camada de pavimento constituída por solo-cimento (ABNT, 2012), observa-se que mesmo com a concentração que forneceu a maior RCS, os resultados na condição imersa foram menores que os preconizados tanto pela normativa britânica quanto pela brasileira.

### 4.6.3 PARÂMETROS DE COMPACTAÇÃO DO SOLO-POLÍMERO

A partir da definição do teor ótimo de polímero em massa de água, construiu-se a curva de compactação para o solo estabilizado na Energia Intermediária, a qual é apresentada na Figura 4.9. A partir da inserção de polímero, observou-se redução na massa específica seca máxima de 1,431 g/cm<sup>3</sup> do solo puro para 1,313 g/cm<sup>3</sup> quando estabilizado com polímero. Acredita-se que a estabilização com polímero ocupa espaços que seriam preenchidos por solo durante a compactação e, por ser menos denso que este, culmina na redução da massa específica seca máxima. Enquanto isso, o índice de vazios obtido é similar, uma vez que a massa específica dos sólidos, na condição de solo estabilizado é reduzida de 2,61 g/cm<sup>3</sup> para 2,38 g/cm<sup>3</sup>.

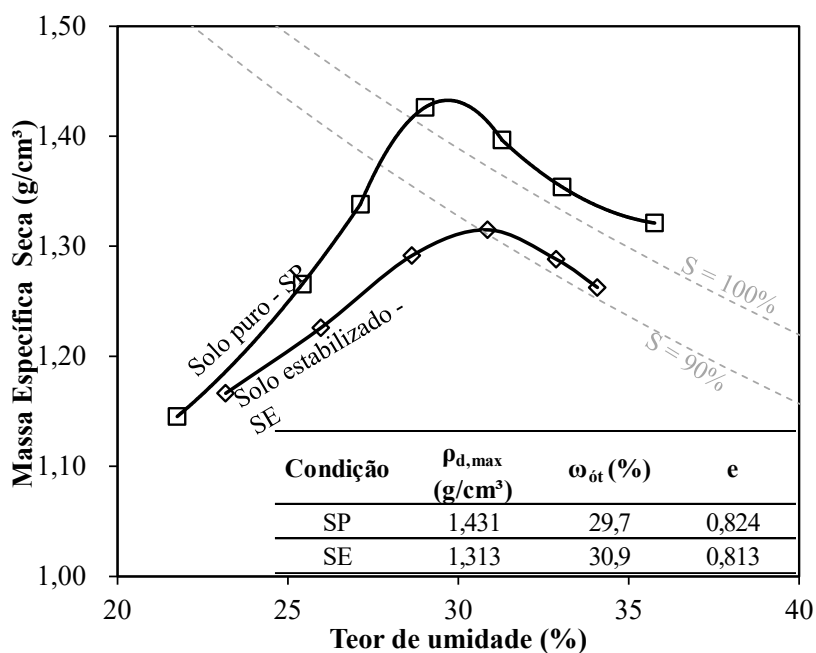


Figura 4.9 – Curvas e parâmetros de Compactação do solo estabilizado compactado na Energia Proctor Intermediária em comparação com o solo puro.

De forma similar, o teor de umidade ótimo também é alterado, quando comparadas as situações de solo natural compactado e de solo estabilizado, saindo de 29,7% para 30,9%. Com a estabilização, além da água utilizada para lubrificação do solo, uma parcela é utilizada pelas reações de cimentação, justificando o aumento marginal. Tingle e Santoni (2003) observaram fenômeno similar para solos argilosos, com a redução da massa específica seca máxima, cuja redução demonstrou-se crescente com o aumento da concentração de aditivos, mantendo-se constante a umidade ótima.

#### 4.6.4 TEMPO DE CURA

Com a definição dos parâmetros de compactação do solo estabilizado com 50% de polímero, avaliou-se o efeito do tempo de cura na resistência à compressão simples do compósito, considerando as condições não imersa e imersa (Figura 4.10).

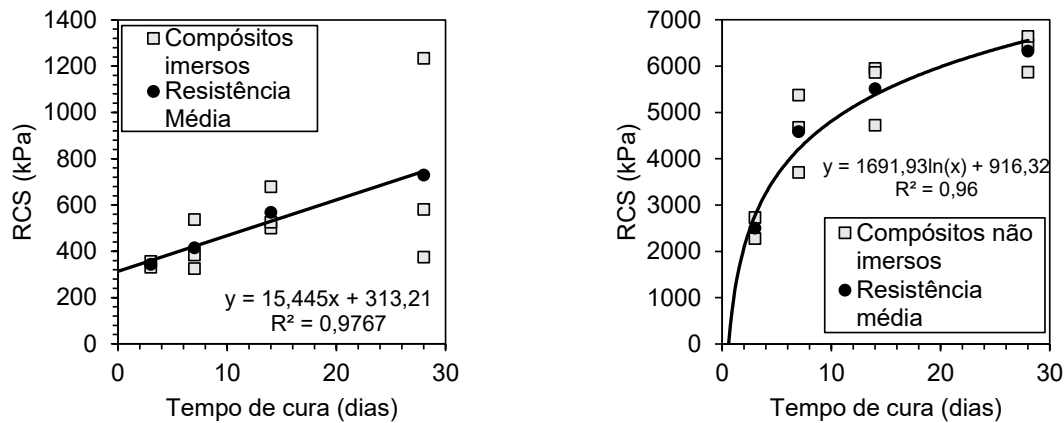


Figura 4.10 –RCS em função do tempo de cura do solo estabilizado.

Para a situação não imersa, obteve-se ajuste logarítmico para a previsão do ganho de resistência ao longo do tempo, indicando crescente ganho de resistência. Além disso, nota-se elevada dispersão dos valores, com tendência de redução com o aumento do tempo de cura. Por outro lado, o melhor ajuste para a previsão do ganho de resistência para a condição dos compósitos imersos foi linear ( $R^2 = 0,98$ ), com ganhos crescentes nos valores de resistência, embora tenha sido observada relativa variância entre os resultados de rompimento, especialmente com 28 dias de secagem.

A situação sem imersão anteriormente à ruptura, mais estudada, apresentou tendência similar à encontrada em estudos. Liu *et al.* (2011) avaliaram a adição de polímero orgânico em solo de proteção de encostas, demonstrando que, apesar do aumento da resistência à compressão simples ao longo do tempo, os maiores ganhos são apresentados nas primeiras horas de secagem. O efeito pode estar associado à natureza não saturada, onde os ganhos de resistência são dados por aumento da sucção, em conjunto com o efeito cola do polímero. Gilazghi *et al.* (2016) demonstraram para uma argila de alta plasticidade que o efeito do tempo de cura não foi relevante após 4 dias, a partir do qual a resistência à compressão simples atingiu um *platô*.

Observa-se, portanto, a influência do tipo de solo na tendência de ganho de resistência, com o solo tropical apresentando comportamento similar ao do solo arenoso, especialmente devido às suas concreções lateríticas. O aumento da resistência proporcional ao tempo de cura também foi reportado por Alelvan *et al.* (2022), Luan *et al.* (2023), Boaventura *et al.* (2023) e Lopes *et al.* (2025), trabalhando com areia e rejeitos de mineração estabilizados com polímeros.

Dessa forma, considerando a menor variabilidade nos resultados de RCS, a tendência à estabilização dos ganhos de resistência com maiores períodos de cura e, para fins práticos, a redução dos prazos para liberação de obras, estabeleceu-se o período de cura padrão de 14 dias para a realização dos ensaios.

#### 4.7 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO TRIAXIAL

A Tabela 4.7 apresenta a deformação axial e a tensão desviadora na ruptura para cada CP ensaiado do solo natural e do compósito solo-polímero com tempo de cura de 14 dias. Vale dizer que o critério adotado na ruptura foi o de tensão desviadora máxima. A Figura 4.11 apresenta as curvas de tensão desviadora *versus* deformação axial e deformação volumétrica *versus* deformação axial do solo puro (SP) e do solo estabilizado com 14 dias de cura (SE-14d).

Observa-se que a inclusão de polímero provou alterações no comportamento tensão-deformação do solo, sendo que estas diferem quando analisado para baixas (50-200 kPa) e médias tensões (200-800 kPa). Quando considerados os baixos níveis de tensão (entre 50 e 100 kPa), o solo estabilizado suportou níveis de tensão desviadora maiores que o solo natural compactado. Isso indica uma maior eficácia da estabilização polimérica e o efeito cola sob baixas tensões confinantes.

Tabela 4.7 – Tensões na ruptura para o solo natural e estabilizado com polímero.

Condição Experimental	Tensão Confinante (kPa)	Deformação Axial na Ruptura (%)	Tensão Desviadora na Ruptura (kPa)
SP (Solo puro)	50	3,0	398,2
	100	1,4	426,9
	200	5,8	561,5
	400	11,0	990,3
	800	18,0	1439,5
SE-14d (Solo Estabilizado após 14 dias de cura)	25	4,8	292,1
	50	4,5	417,7
	100	4,4	435,9
	200	19,3	559,9
	400	19,6	795,7
	800	10	1403,2

Quando comparado com resultados de ensaios de compressão triaxial de mistura solo-cimento, é comum a redução da dependência da tensão confinante na resistência ao cisalhamento do material (GE *et al.*, 2018). Comparativamente, os maiores níveis de tensão desviadora atingidos para baixas tensões ilustram o paralelismo das condições, embora sob

maiores confinamentos a tendência se inverte, com uma redução na tensão de ruptura acentuada sob a tensão confinante de 400 kPa, saindo de 990,3 kPa no solo natural compactado para 795,7 kPa no solo estabilizado. Este comportamento sugere que, no tempo de cura de 14 dias, o polímero atua lubrificando os agregados e partículas do solo sob altas pressões, facilitando maiores deformações durante o ensaio, comprovado na análise da deformação volumétrica total dos CPs de 400 kPa e 800 kPa, que apresentaram comportamento contrativo superior ao do solo natural compactado.

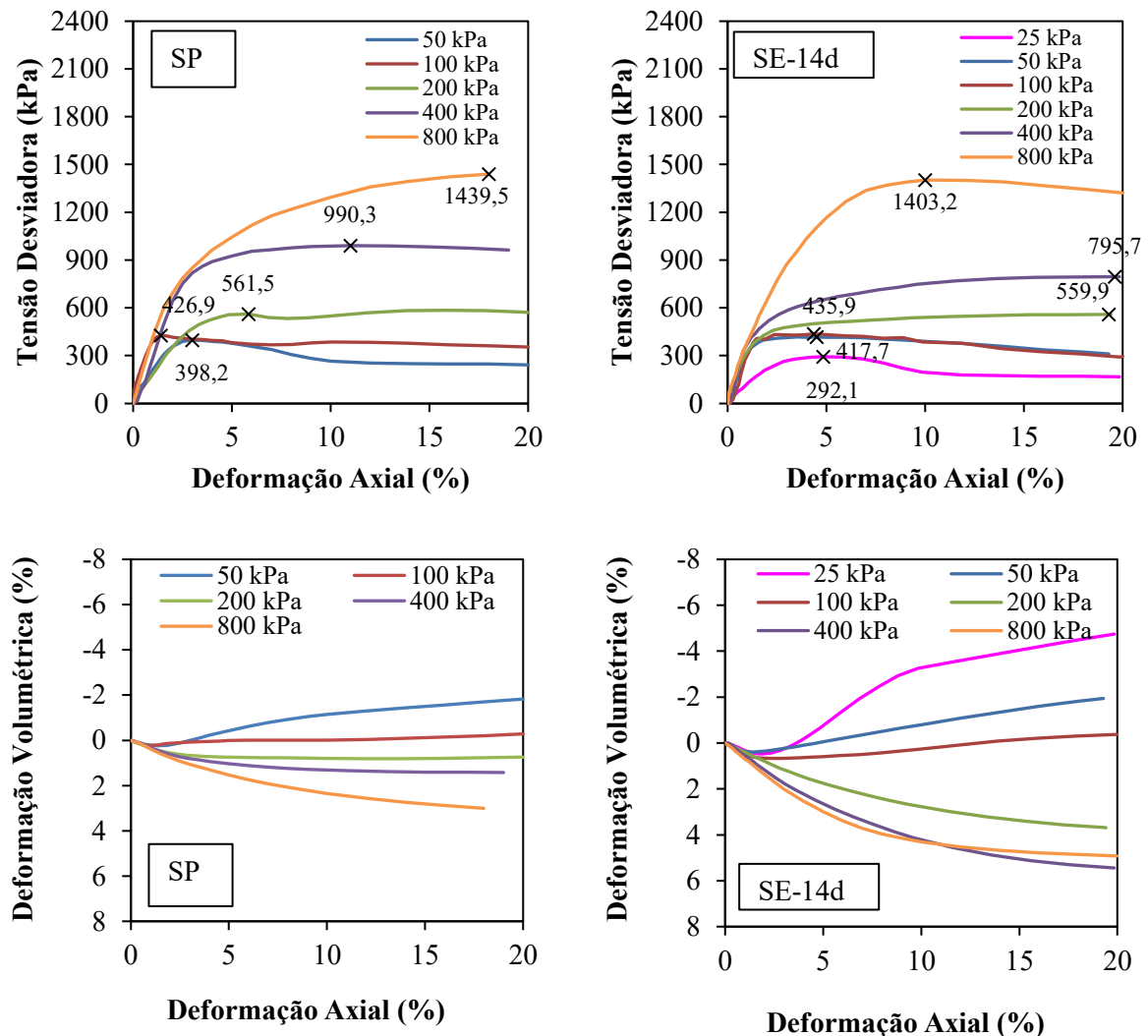


Figura 4.11 – Resultados do ensaio de compressão triaxial para o solo puro (SP) e solo estabilizado com 14 dias de cura (SE-14d).

A deformação volumétrica do solo natural foi de, aproximadamente, 1,4% e 3,0% para as tensões confinantes de 400 kPa e 800 kPa, respectivamente. Para o solo estabilizado, atingiu-se deformações volumétricas de 5,4% e 5,0%, para os mesmos níveis de tensão. Comparativamente, para baixas tensões, o solo apresentou comportamento dilatante, com maior tendência de dilatação no solo estabilizado, no qual a deformação volumétrica foi de 1,9% para

o CP com tensão confinante de 50 kPa e 1,7% no CP com mesma tensão confinante no solo natural compactado. A adição do polímero gerou um ganho de rigidez ainda maior, mantendo os valores de tensão na ruptura muito próximos aos obtidos sob a cura de 14 dias, porém ocorrendo de forma antecipada, com menores deformações axiais. Além disso, o CP ensaiado com a menor tensão confinante neste conjunto de ensaios gerou uma dilatação da ordem de 5%, obtendo ganhos expressivos quando comparado aos resultados dos conjuntos de ensaios anteriores.

A Figura 4.12 apresenta as trajetórias de tensões efetivas no espaço  $p'$ - $q$ , considerando todos as tensões confinantes ensaiadas para o solo natural e estabilizado. Os parâmetros de resistência obtidos para o solo natural foram de ângulo de atrito de  $24,9^\circ$  e intercepto coesivo de 101,45 kPa. Para o solo estabilizado com 14 dias de cura, os parâmetros de resistência obtidos foram ângulo de atrito de  $24,0^\circ$  e intercepto coesivo de 94,73 kPa. Embora os valores se apresentem bastante próximos entre si, estes não refletem o comportamento geral da resistência desses materiais, uma vez que a dependência da tensão confinante se sobressaiu, gerando envoltórias bilineares.

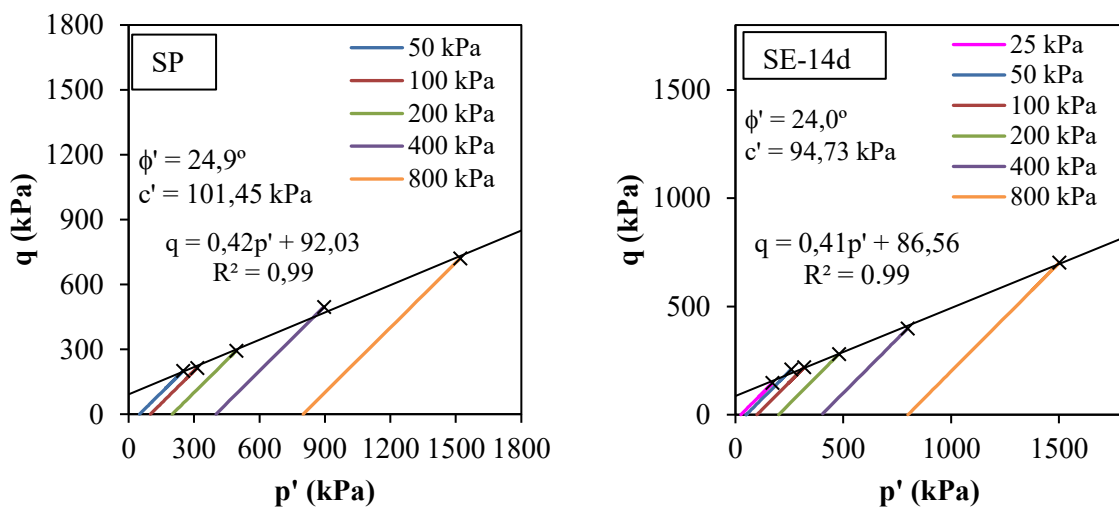


Figura 4.12 – Parâmetros de resistência ao cisalhamento gerais obtidos para o solo puro (SP) e solo estabilizado com 14 dias de cura (SE-14d).

Desta forma, os parâmetros de resistência foram avaliados de forma isolada, para baixas e médias tensões de confinamento, conforme apresentado na Figura 4.13. Sob baixas tensões confinantes – 50, 100 e 200 kPa (Figura 4.13a), os parâmetros de resistência obtidos para o solo puro foram parecidos com os obtidos no ajuste realizado considerando todas as tensões confinantes, gerando ângulo de atrito de  $23,4^\circ$  e intercepto coesivo de 104,08 kPa. No caso do solo estabilizado com 14 dias de cura, ocorreu redução acentuada no ângulo de atrito e ganho na coesão, em consonância com os resultados obtidos por Latifi *et al.* (2016) e Huang *et*

al. (2021). Para o caso em análise, o ângulo de atrito reduziu para 19,5° e a coesão aumentou para 124,94 kPa.

Quando avaliados apenas sob médias tensões confinantes (200, 400 e 800 kPa), o comportamento do solo estabilizado apresentou-se próximo ao comportamento observado no solo puro, apresentando aumento sutil do ângulo de atrito, de 24,3° para 24,5° na condição estabilizada e leve decréscimo de intercepto coesivo de 114,34 kPa para 81,97 kPa.

Assim, entende-se que as maiores mudanças ocorreram no comportamento do solo estabilizado sob baixas tensões de confinamento, gerando ganhos reais de resistência nesta faixa analisada. Conforme ocorre o aumento na sollicitação, a performance do solo estabilizado aproxima-se do comportamento do solo puro, com a parcela de intercepto coesivo reduzida e incremento de ângulo de atrito.

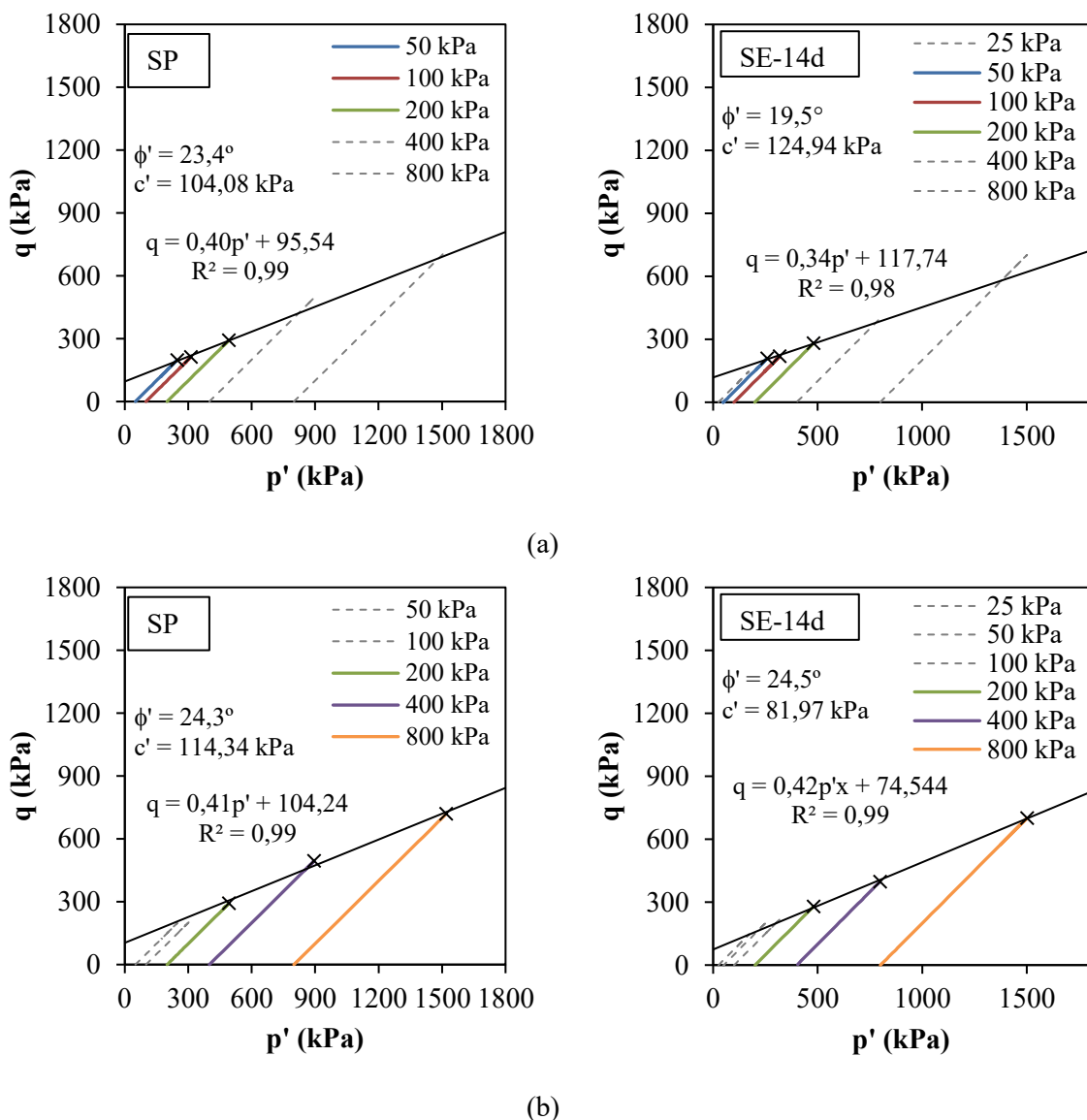


Figura 4.13 – Parâmetros de resistência ao cisalhamento obtidos para o solo puro (SP) e solo estabilizado com 14 dias de cura (SE-14d) sob: (a) baixas tensões; (b) médias tensões.

#### 4.8 ÍNDICE DE SUPORTE CALIFÓRNIA (ISC)

Os resultados de expansão e Índice de Suporte Califórnia (ISC) para o solo tropical em condição natural e estabilizado são apresentados na Tabela 4.8. A expansão medida ao final do período de imersão foi de 0,08%, para o solo-polímero, enquanto, para o solo natural compactado, foi de 0,03%. O ISC determinado para o solo puro foi de 21,9%, alinhado com os resultados de Owoyemi e Adeyemi (2017), que obtiveram, para um solo argiloso camaronês de classificação A-7-A, um ISC de 18%.

Tabela 4.8 – Valores de expansão e ISC do SP e SE-14d

<b>Condição Experimental</b>	<b>Expansão (%)</b>	<b>ISC (%)</b>
SP (Solo puro)	0,03	21,9
SE-14d (Solo Estabilizado após 14 dias de cura)	0,08	24,2

Observou-se aumento de 10% no resultado de Índice de Suporte Califórnia, quando avaliado pós imersão. Na prática, esta condição retrata um caso extremo, em que o ISC atingido foi superior ao mínimo exigido pela normativa do DNIT ( $ISC \geq 20\%$ ) para ambas as condições experimentais. O ganho de resistência medido pelo Índice de Suporte Califórnia está superior ao reportado por Georges *et al.* (2016), cujo solo granular estabilizado com polímero à base de poliamida forneceu ganhos marginais quando considerada a condição de ensaio inundada. Ainda, Batista e Kakuda (2018) avaliaram que a estabilização polimérica em solos tropicais não gerou ganho de resistência medido no ISC.

#### 4.9 MÓDULO DE RESILIÊNCIA

Os resultados de Módulo de Resiliência obtidos para o solo puro e estabilizado foram analisados por meio de distintos modelos matemáticos que levassem em consideração as condições de tensão e os resultados medidos em laboratório. Os coeficientes de regressão obtidos a partir dos modelos são apresentados na Tabela 4.9. Os gráficos obtidos para os modelos avaliados são apresentados na Figura 4.14 e na Figura 4.15.

De forma geral, observou-se que, conforme ocorria aumento na tensão desviadora e no somatório de tensões, os valores de MR aumentavam. Este comportamento está intrinsecamente ligado com a natureza laterítica do solo tropical avaliado, conforme observado por Silva (2003) e Oliveira (2022). Os autores indicaram que a cimentação dos solos lateríticos levam a comportamento similar ao de materiais granulares.

Tabela 4.9 – Coeficientes de Regressão – Solo Natural Compactado.

Amostra	Modelo dependente do somatório de tensões (MPa)			Modelo dependente da tensão desvio (MPa)			Modelo composto (MPa)			
	k <sub>1</sub>	k <sub>2</sub>	R <sup>2</sup>	k <sub>1</sub>	k <sub>2</sub>	R <sup>2</sup>	k <sub>1</sub>	k <sub>2</sub>	k <sub>3</sub>	R <sup>2</sup>
	Solo Puro	498,2	0,57	0,94	643,2	0,43	0,76	448,8	0,72	-0,13
SE-14d-N	493,6	0,34	0,92	584,7	0,27	0,77	471,2	0,40	-0,05	0,93
SE-14d-I	369,3	0,17	0,57	387,8	0,11	0,37	327,1	0,32	-0,14	0,65

Desta forma, observa-se que, apesar de a granulometria do solo avaliado ser majoritariamente formada por partículas finas, os modelos cujos ajustes obtiveram maior  $R^2$  foram os modelos compostos ( $R^2 > 0,94$ ) e o dependente do somatório de tensões ( $R^2 > 0,93$ ). O coeficiente  $k_2$  (referente a  $\theta$ ) apresentou forte influência positiva, enquanto o coeficiente  $k_3$  (referente a  $\sigma_d$ ) apresentou valores negativos próximos de zero. Isso indica que a rigidez do solo é governada pelo estado de tensões globais, sendo pouco sensível à perda de rigidez por aumento da tensão desviadora, característica típica da estabilidade estrutural de solos laterizados.

O comportamento geral do Módulo de Resiliência após a cura de 14 dias foi, de certa forma, similar ao do solo compactado pré-estabilização, observando-se crescimento nos valores de MR à medida que ocorria aumento na tensão desviadora e no somatório de tensões. Repetiu-se a superioridade estatística dos modelos composto ( $R^2 > 0,92$ ) e dependente do somatório de tensões ( $R^2 > 0,91$ ), em detrimento do modelo dependente da tensão desviadora ( $R^2 > 0,77$ ).

De forma similar ao observado no solo natural compactado, a formação de ligações interfaciais proporcionadas pela estabilização polimérica promoveu uma maior aglutinação de partículas finas em agregados estáveis, replicando o comportamento de materiais granulares. Os elevados valores do parâmetro  $k_1$  (na ordem de 471,2 MPa no ajuste global) indicaram aumento no suporte estrutural. O coeficiente  $k_3$  apresentou valores ainda menores, quando comparados ao solo pré-estabilização, indicando que o material estabilizado é fortemente governado pelo estado de tensões globais, ainda menos sensível à perda de rigidez por aumento da tensão desviadora.

Por fim, avaliou-se o Módulo de Resiliência (MR) para o solo estabilizado após 14 dias de cura e com subsequente correção de umidade. Em conformidade com as análises anteriores, a resposta global do solo estabilizado apresentou maior aderência estatística aos modelos composto ( $R^2 > 0,65$ ) e dependente do somatório de tensões ( $R^2 > 0,57$ ), quando comparados ao modelo dependente de tensões desviadoras ( $R^2 > 0,37$ ). Contudo, observou-se

reduções drásticas nos coeficientes quando comparados ao solo estabilizado em baixas umidades, sinalizando uma resposta resiliente mais instável e sensível às variações na poropressão. No modelo composto, o intercepto  $k_1$  global sofreu uma redução de aproximadamente 27%, enquanto o parâmetro  $k_2$  (relativo ao somatório de tensões) regrediu de 0,40 para 0,32.

O teor de umidade torna-se, portanto, um fator limitante para a manutenção da rigidez estrutural conferida pelo tratamento polimérico, conforme verificado por Mota *et al.* (2025). Contudo, a grande maioria das pesquisas que avaliam a adição de estabilizantes químicos não realiza a correção da umidade, tais como os estudos realizados por Povuação *et al.* (2025) e Georges *et al.* (2018).

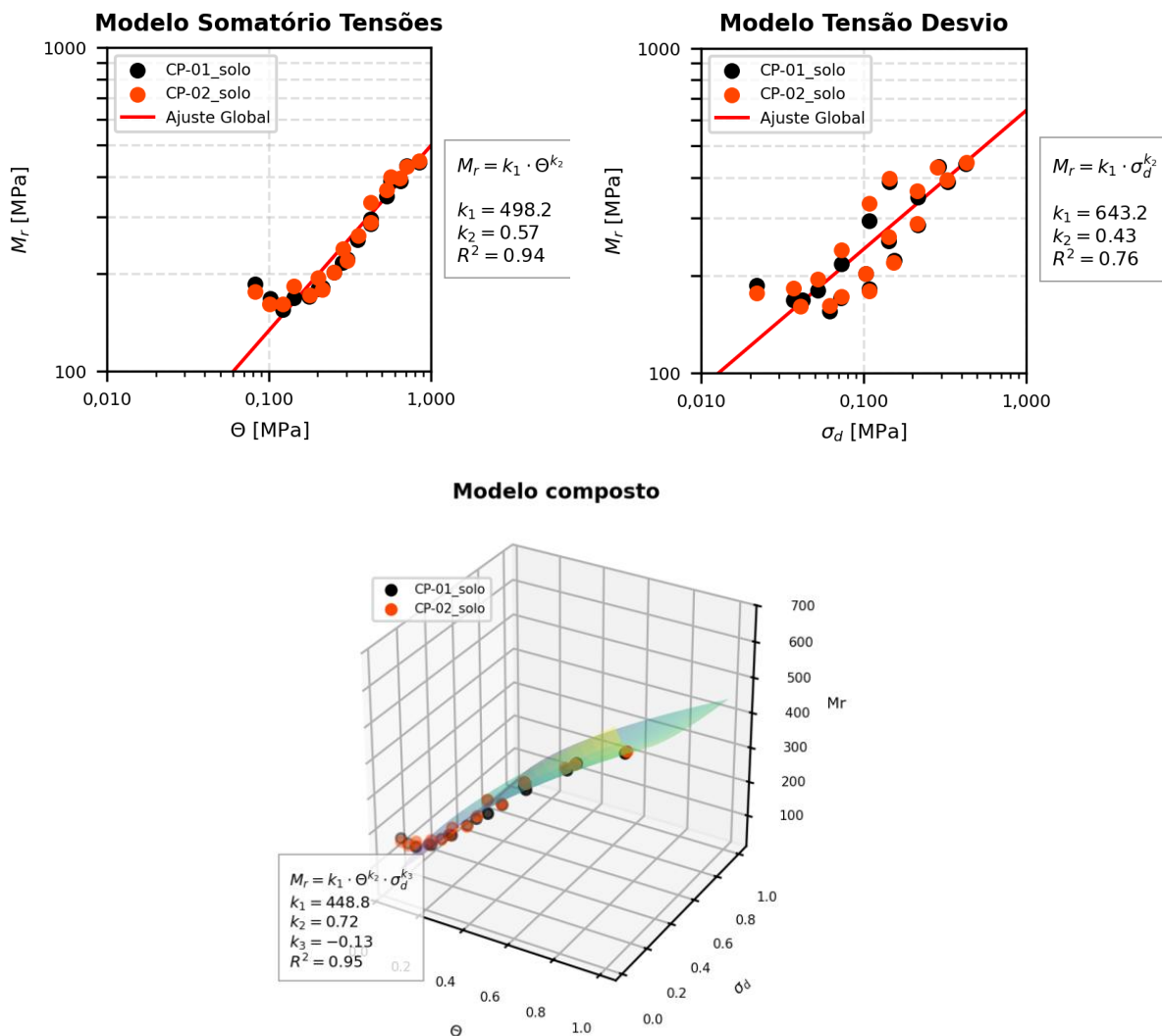


Figura 4.14 – Ajustes globais obtidos para os ensaios em solo natural.

Adicionalmente, observou-se elevada variabilidade nos resultados de Módulo de Resiliência para a condição ensaiada após imersão. Dessa forma, apesar de estarem sob a mesma umidade total, a distribuição de umidade não ocorreu de forma homogênea, resultando

em um gradiente de umidade concentrado nas porções periféricas das amostras. Diante dessa inconsistência na correção da umidade, recomenda-se que, após a etapa de imersão, mantenha-se os CPs envolvidos em plástico filme, em ambiente com temperatura controlada, por prazo superior a 24h, visando a dissipação de gradientes internos antes da execução do ensaio.

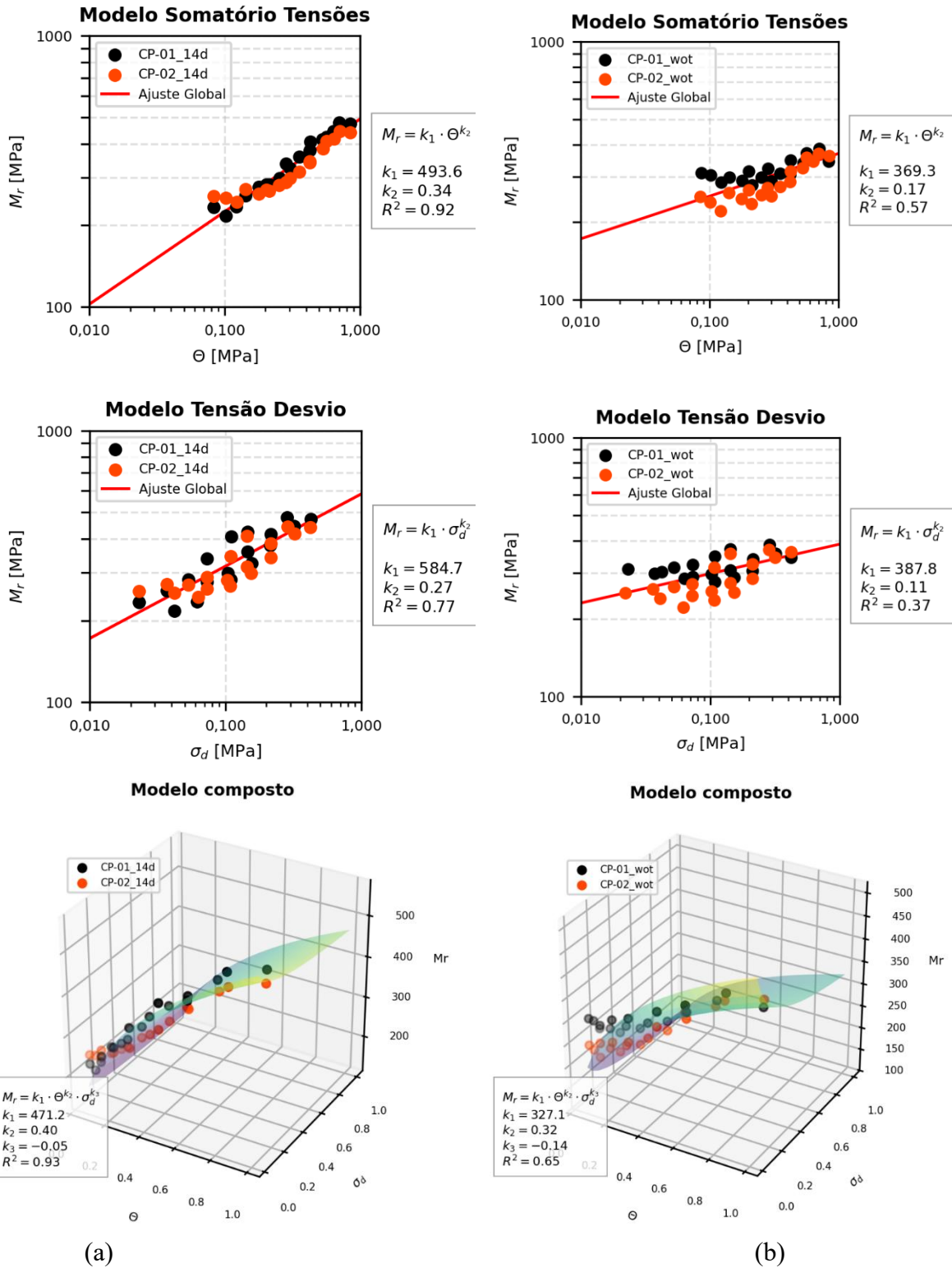


Figura 4.15 – Ajustes globais obtidos para os ensaios em solo estabilizado, seco, após cura de 14 dias. (a) sem correção de umidade; (b) com correção de umidade.

#### 4.10 DEFORMAÇÃO PERMANENTE

A Deformação Permanente foi avaliada por meio dos ensaios triaxiais cíclicos para o solo estabilizado e em condições naturais. A Figura 4.16 apresenta a evolução do deslocamento permanente acumulado em função do número de ciclos de carregamento, considerando o solo natural e estabilizado aos 14 dias de cura e com correção de umidade. Para o solo puro, observou-se um aumento abrupto da deformação permanente logo nos primeiros ciclos, seguido de uma estabilização quase imediata, de forma que, a partir dos 20.000 ciclos, as curvas se tornassem similares a retas horizontais. Desta forma, depreende-se que o solo não entrou em ruptura, uma vez que não foi constatada inflexão da curva para cima.

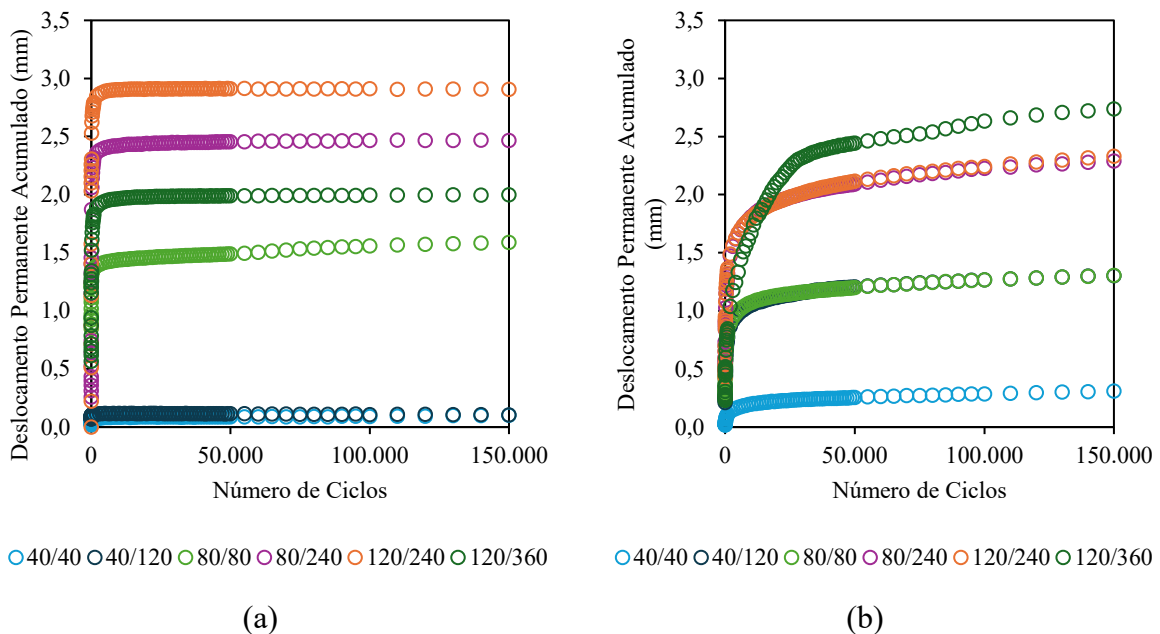


Figura 4.16 – Deslocamentos Permanentes Acumulados por número de ciclos, considerando: (a) solo puro; (b) solo estabilizado.

A magnitude da deformação medida é fortemente influenciada pelos níveis de tensão aplicados. Em baixas tensões, como 40/40 e 40/120 ( $\sigma_3/\sigma_d$ , kPa/kPa), a deformação é insignificante, indicando que, para estes casos, o solo não sofre afundamento permanente mensurável. Para tensões maiores, ocorreram saltos de deformação, observando-se maiores saltos ao variar a tensão confinante quando comparado a variações da tensão desvio.

No entanto, ao avaliar individualmente os resultados do solo sob maiores tensões, 120/240 e 120/360 ( $\sigma_3/\sigma_d$ , kPa/kMPa), ressalva-se comportamento atípico do solo, uma vez que, ao manter-se a tensão de confinamento em 120 kPa e aumentando a tensão desvio, esperava-se

que ocorressem maiores deformações. Contudo, o resultado obtido foi inverso, gerando redução na deformação medida para o CP de maior tensão desviadora.

Quanto ao solo estabilizado, observou-se a mesma tendência dos ensaios realizados em solo, com uma alta taxa de acréscimo de deformação nos primeiros ciclos e estabilização nos deslocamentos acumulados nos ciclos finais de carregamento. Acrescenta-se que o solo estabilizado apresentou maiores deformações sob baixas tensões, quando comparado ao solo natural compactado, permanecendo, porém, com baixos valores de deformações totais. Em médias tensões, a deformação obtida foi inferior à do solo natural compactado e as curvas assumiram formato logarítmico suave, alterando o comportamento obtido no solo natural compactado, que apresentou um rearranjo súbito das ligações entre as partículas. Na prática, o solo natural atinge a estabilidade com poucos ciclos, enquanto o compósito solo-polímero apresenta uma resistência à essa evolução, de forma que são necessários mais ciclos para se atingir a estabilidade de deslocamentos permanentes.

Para as altas tensões, o solo estabilizado apresentou, para o par de tensões 120/240 ( $\sigma_3/\sigma_d$ , kPa/kPa), valores de deslocamentos menores (2,3 mm) que os encontrados no solo puro compactado (2,9 mm), alterando, também, o formato da curva, para uma deformação mais suavizada ao longo dos ciclos de carregamento. Diferentemente do solo natural compactado, a amostra estabilizada submetida ao par 120/360 ( $\sigma_3/\sigma_d$ , kPa/kPa) apresentou a maior deformação do conjunto, seguindo a tendência esperada.

No solo estabilizado, foi observada a existência de curvas praticamente coincidentes, como nos casos dos pares de tensão 80/240 e 120/240 ( $\sigma_3/\sigma_d$ , kPa/kPa), para os quais depreende-se que a deformação permanente no caso do solo estabilizado possui maior correlação com a tensão desvio do que no caso do solo natural compactado.

De acordo com Werkmeister (2001), o conceito de *shakedown* pode ser utilizado para descrever o comportamento de materiais de pavimentação sob ação de carregamentos cíclicos repetidos. O conceito apresentou a divisão dos materiais em três categorias, ou faixas principais, diferenciadas com base na taxa de acúmulo de deformação permanente ao longo do tempo.

Na Faixa A (*Plastic Shakedown*), a resposta do material é plástica durante um número finito de aplicações de carga, após a qual a deformação torna-se inteiramente elástica e a taxa de deformação permanente decresce progressivamente até zero. Na Faixa B (*Plastic Creep*), a taxa de deformação permanente é, também, elevada nos primeiros ciclos de carregamento até atingir um nível baixo e relativamente constante, a partir da qual observa-se um crescimento aparentemente linear da deformação permanente com o número de ciclos. Por fim, na faixa C

(*Incremental collapse*), ocorre um incremento progressivo de deformação permanente em cada ciclo de carga, descrevendo, portanto, uma condição de instabilidade que leva à falha estrutural.

Para identificar o comportamento do solo e identificar a ocorrência do *shakedown* utilizou-se da metodologia proposta por Lima (2020), na qual é realizada uma análise conjunta dos gráficos de Deformação Permanente em função do Número de Ciclos (Figura 4.16) e de taxa de acréscimo da deformação permanente, conforme exibido na Figura 4.17.

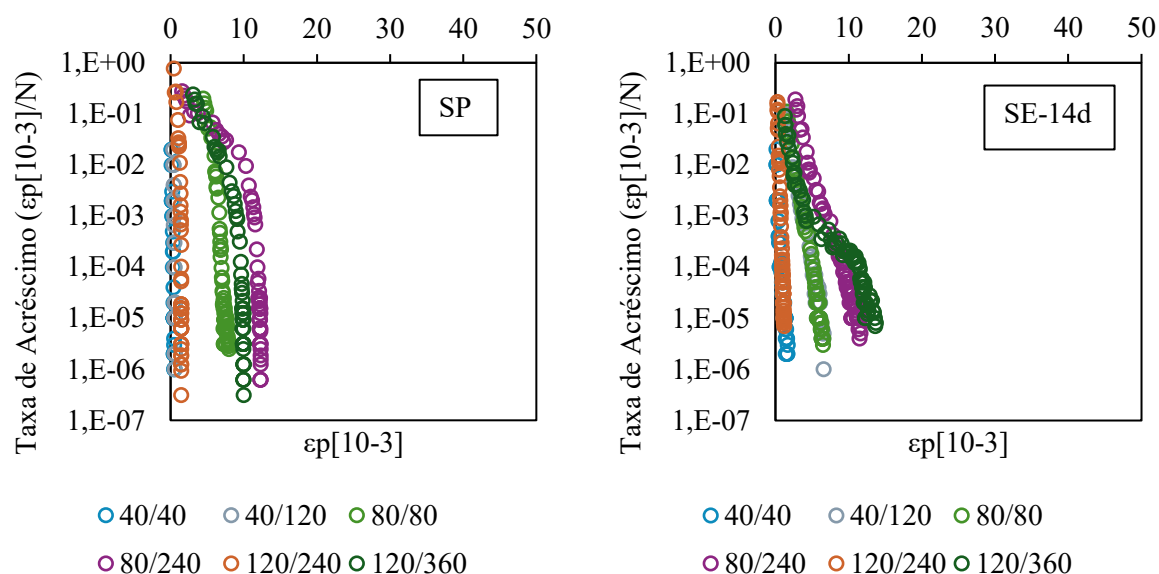


Figura 4.17 – Análise da ocorrência do *shakedown* para o solo puro (SP) e solo estabilizado com cura de 14 dias, após correção de umidade (SE-14d)

Com base nos resultados obtidos, portanto, é correto afirmar que, para todos os pares de tensão o comportamento tanto do solo puro quanto do solo estabilizado apresentou-se de acordo com solos da classificação do tipo A, isto é, *plastic shakedown*.

#### 4.10.1 MODELOS DE DEFORMAÇÃO PERMANENTE

A Tabela 4.10 apresenta os coeficientes de regressão obtidos para o solo puro e estabilizado, conforme metodologia proposta por Guimarães (2009) e incorporada à norma DNIT 179/2018 (DNIT, 2018b). Em linhas gerais, os parâmetros obtidos corroboram com as evidências visuais dos ensaios de cargas cíclicas. No entanto, o coeficiente de determinação ( $R^2$ ) apresentou valores abaixo do ideal para modelos laboratoriais no ajuste obtido para o solo puro ( $R^2 = 0,73$ ). O ajuste para o solo estabilizado, por outro lado, forneceu resultado satisfatório ( $R^2 = 0,91$ ), validando as observações anteriores.

Tabela 4.10 – Coeficientes de Regressão – modelo de Guimarães (2009).

Condição Experimental	$\psi_1$	$\psi_2$	$\psi_3$	$\psi_4$	$R^2$
Solo Puro - SP	0,459	1,429	-0,018	0,070	0,73
Solo estabilizado - SE-14d	0,116	0,132	0,557	0,153	0,91

Comparativamente, o coeficiente  $\psi_1$  foi reduzido drasticamente, saindo de 0,459, no solo natural, para 0,116 no solo estabilizado. Essa redução de, aproximadamente 75%, representa o ganho de rigidez estrutural obtido após a estabilização. O material estabilizado apresentou-se menos deformável, exigindo níveis de energia superiores para atingir os mesmos patamares de deslocamentos do solo natural compactado. Com relação ao coeficiente  $\psi_2$ , referente à sensibilidade às tensões confinantes, uma nova redução drástica ocorreu, saindo de 1,429 (altamente dependente da tensão confinante) no solo natural compactado para 0,132 no solo estabilizado, reforçando a observação de menor dependência das tensões confinantes na deformação permanente no solo estabilizado.

O coeficiente  $\psi_3$ , referente à sensibilidade à tensão desviadora, se apresentou muito próximo de zero no solo natural compactado (-0,018), valor que reflete o comportamento observado nos ensaios, especialmente pelo fato de o CP de maior carga (120/360 kPa/kPa) ter apresentado menor deformação permanente que um CP de carga intermediária, cuja razão  $\sigma_3/\sigma_d$  era de 1/2 (120/240 kPa/kPa). Com a estabilização, no entanto, o coeficiente  $\psi_3$  apresentou valor de 0,557, demonstrando um comportamento em que a deformação cresce com o aumento da tensão desviadora.

Por fim, o coeficiente  $\psi_4$  recebeu um incremento na condição estabilizada. Este acréscimo reflete a mudança no formato da curva de deformação permanente em função do número de ciclos. Enquanto no solo natural ocorreu um salto abrupto seguido de uma constância imediata nas taxas de deformação permanente, no solo estabilizado essa mudança se deu de forma logarítmica e progressiva, simulando o comportamento conhecido por *strain-hardening*, mais estável e previsível.

Um avanço apresentado por Mota *et al.* (2024, 2026) é a possibilidade de redução no número de ciclos necessários para a obtenção de parâmetros. A Tabela 4.11 apresenta os coeficientes de regressão obtidos para o solo puro e estabilizado, após cura de 14 dias e a Figura 4.18 e a Figura 4.19, as Curvas Mestras construídas para 10.000, 20.000 e 150.000 ciclos, mantendo os eixos de acordo com o apresentado nos artigos. Apesar de os autores indicarem boa convergência do modelo matemático com 10.000 ciclos, foi avaliada uma condição

intermediária, com 20.000 ciclos, na tentativa de refletir o comportamento do solo estabilizado, que apresentou deformações mais suaves ao longo dos ciclos.

Tabela 4.11 – Coeficientes de Regressão – PD S para 10.000 e 150.000 ciclos.

<b>Condição Experimental</b>	<b>Nº Ciclos</b>	<b>s<sub>1</sub></b>	<b>s<sub>2</sub></b>	<b>a<sub>1</sub></b>	<b>a<sub>2</sub></b>	<b>a<sub>3</sub></b>	<b>R<sup>2</sup></b>
Solo Puro - SP	10.000	1,241	-0,054	0,105	1,164	0,120	0,75
	20.000	1,518	-0,045	0,115	0,906	0,099	0,75
	150.000	1,203	-0,015	0,136	1,173	0,070	0,74
Solo estabilizado - SE-14d	10.000	0,567	0,403	0,069	0,986	0,172	0,77
	20.000	0,761	0,552	0,063	0,829	0,171	0,84
	150.000	0,639	0,516	0,062	1,080	0,153	0,91

A definição dos coeficientes de regressão foi realizada de forma que esses fossem obtidos utilizando-se todos os dados dos CPs ensaiados. Dessa forma, os parâmetros obtidos são constantes únicas que descrevem o comportamento do material sob as diferentes solicitações.

No solo puro, observou-se que os coeficientes de regressão ( $R^2$ ) obtidos para as três condições foram semelhantes, com a precisão do modelo limitada pela variabilidade natural do solo tropical. O parâmetro  $s_1$  alto, em conjunto com  $s_2$  baixo (próximo a zero), reforça a ideia de que o comportamento do solo avaliado é altamente dependente da tensão confinante e que a razão entre as tensões ( $\sigma_d/\sigma_3$ ) tem pouca influência na evolução da deformação. No entanto, observa-se uma queda progressiva no valor obtido para  $a_3$  quando avaliadas as regressões com maior número de ciclos. Fisicamente, esta redução reflete os resultados medidos de deformação permanente, indicando que, com maior quantidade de ciclos, existe uma tendência de estabilização da deformação.

A tendência de atingir maiores deformações com menos ciclos no ajuste de 10.000 ciclos do que no de 150.000 ciclos se repete para o solo estabilizado e, contrastando com o observado para o solo puro, o coeficiente de regressão ( $R^2$ ) é fortemente influenciado, neste caso, pela quantidade de ciclos utilizados para o ajuste, principalmente devido ao fato de que, com 10.000 ciclos, a deformação permanente ainda não tenha se estabilizado, conforme apresentado no gráfico da Figura 4.16. Na situação intermediária de 20.000 ciclos, o ajuste matemático obteve um comportamento melhor, embora o valor de  $R^2$  (0,84) permanecesse menor que o encontrado para 150.000 ciclos (0,91).

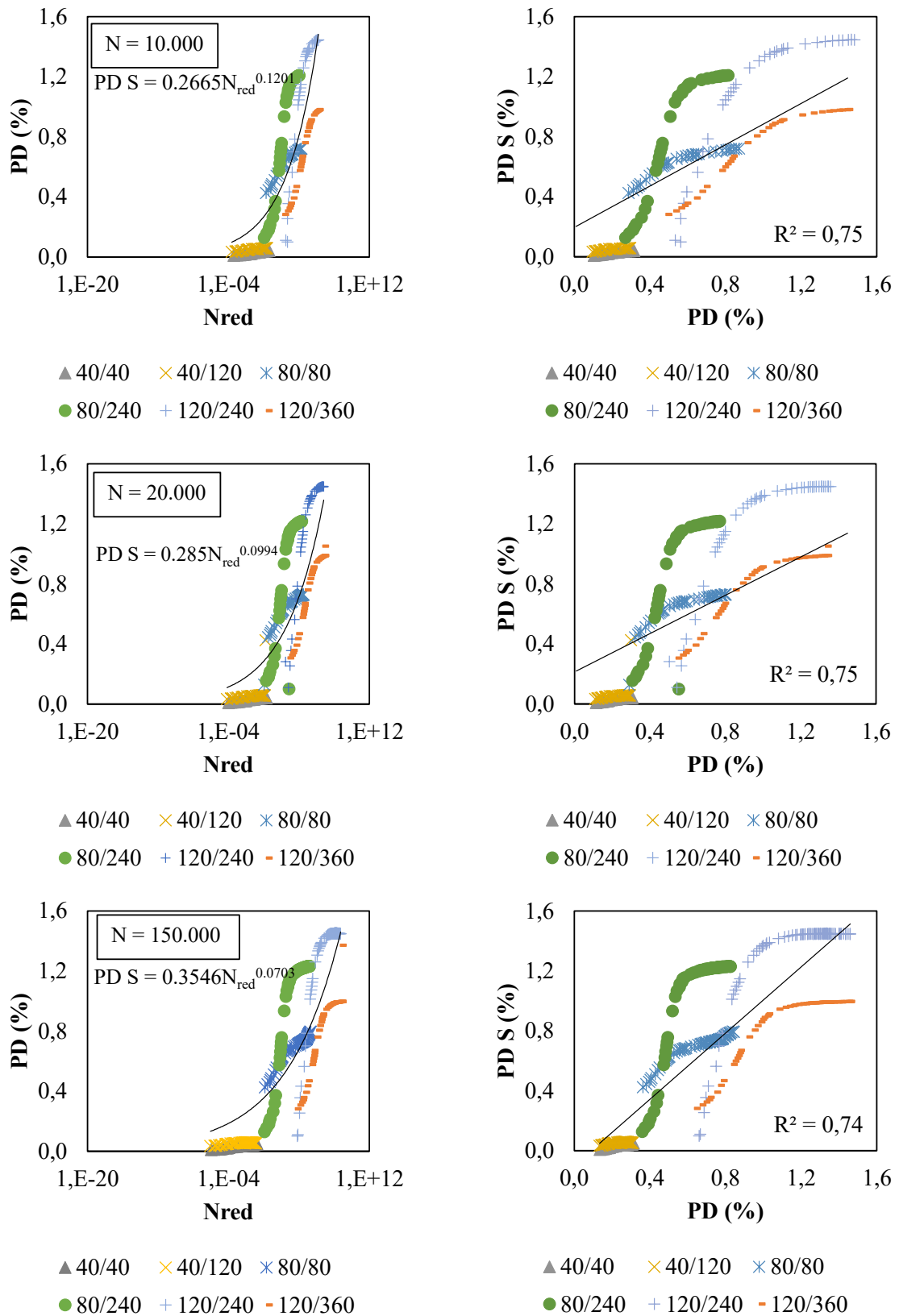


Figura 4.18 – Curva Mestre do Solo Puro, utilizando-se 10.000, 20.000 e 150.000 ciclos.

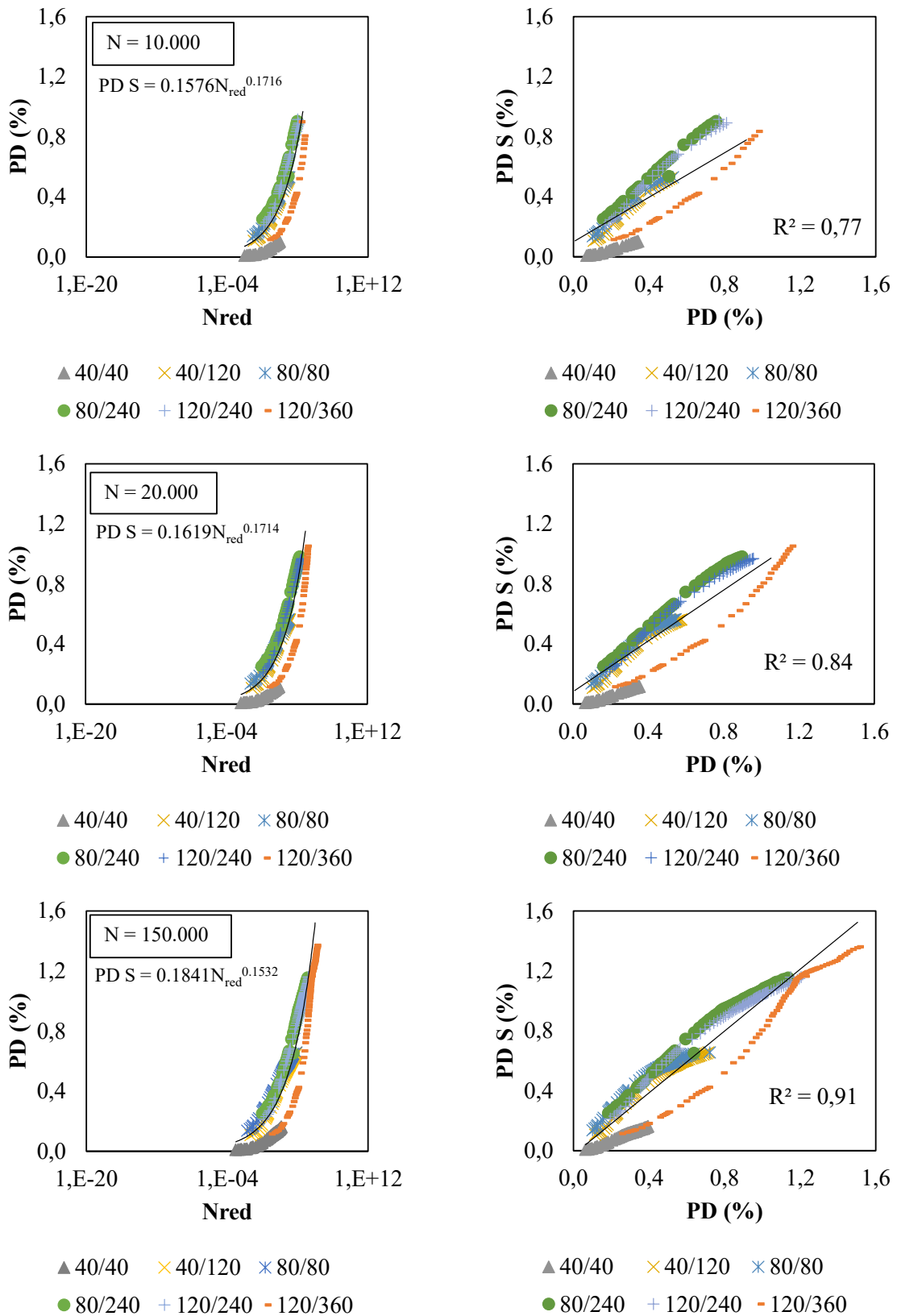


Figura 4.19 – Curva Mestre do Solo Estabilizado, utilizando-se 10.000, 20.000 e 150.000 ciclos.

O parâmetro  $s_1$  (0,639) é significativamente menor que o obtido para o solo puro (1,203), ao passo que o parâmetro  $s_2$  tornou-se positivo e relevante. Em linhas gerais, essas alterações indicam que a estabilização reduziu a dependência do solo em relação à tensão confinante ( $\sigma_3$ ), tornando-se mais próximo do comportamento de solos de maior coesão, estabelecendo uma relação com o ganho de coesão gerado pela ação do polímero.

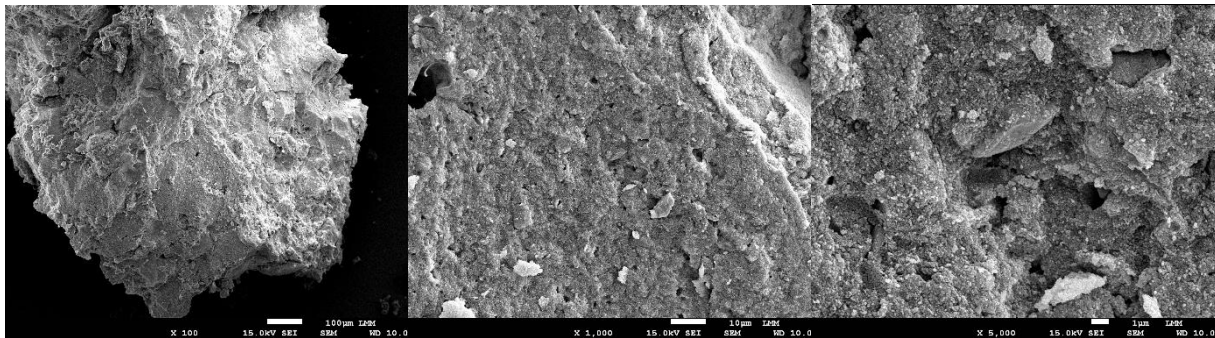
Ao avaliar estritamente a magnitude da deformação total calculada pelo modelo para o par de tensão de referência (80/240 kPa/kPa), nota-se que a DP calculada pelo modelo PD S indicou um melhor comportamento frente à deformação permanente no solo estabilizado, em que a inserção de polímero tornou o material mais previsível e mecanicamente estável, refletindo em coeficientes de regressão mais elevados. Não obstante a isso, embora o solo estabilizado apresente maior resistência à deformação permanente nos ciclos iniciais, o compósito apresenta uma taxa de evolução do dano maior que o solo puro.

É válido destacar os compósitos ensaiados na DP passaram pelo processo de correção de umidade e, conforme observado para o MR, há significativa sensibilidade do compósito para essa condição experimental, justificando a sensibilidade de ajuste dos dados ao modelo matemático. Não obstante a isso, os valores de DP acumulados até 150.000 ciclos apresentarem menor magnitude quando comparados aos do solo puro e, conseqüentemente, sem a correção de umidade, é de se supor menores magnitudes de deslocamento plástico acumulado.

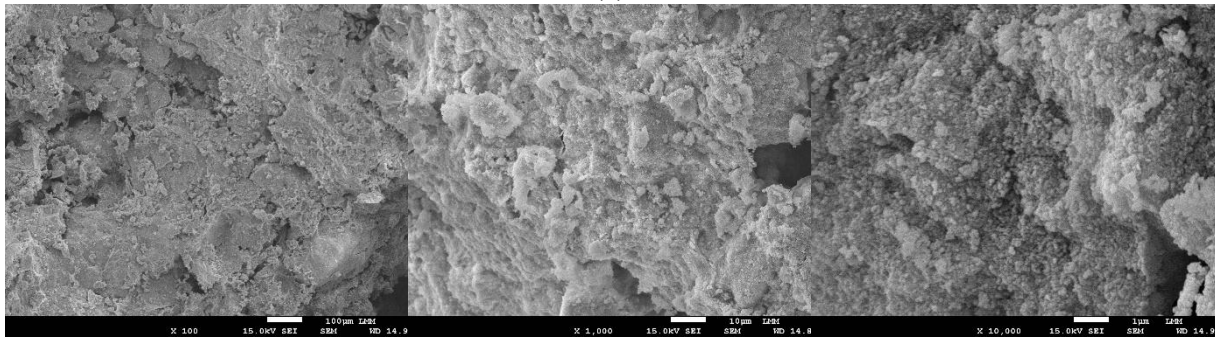
#### **4.11 MICROESTRUTURAL**

A Figura 4.20 mostra a organização da microestrutura do solo puro e quando submetido a estabilização polimérica após o tempo de secagem. Para o solo puro, observou-se maior densificação do solo, com redução dos poros de maior dimensão e permanência dos microporos. Os microporos permanecem presentes na fábrica do solo, fato já comprovado por Oliveira *et al.* (2022).

Na análise do solo estabilizado, foi possível identificar a formação de novas ligações decorrentes da adesividade do polímero aos grãos e aos agregados do solo. Observou-se, ainda, a incorporação do polímero à estrutura do solo, incorporando-se à matriz, formando filmes semi-contínuos que revestem superficialmente os grãos. As evidências experimentais obtidas corroboram os resultados reportados por Liu *et al.* (2011) e Georgees *et al.* (2020).



(a)



(b)

Figura 4.20 – MEV do solo: (a) puro; (b) estabilizado com 14 dias de cura.

Em conjunto às imagens de MEV, foi realizada avaliação de Espectroscopia por Energia Dispersiva (EDS), permitindo a avaliação dos principais elementos, de forma semi-qualitativa, para o solo puro e com polímero. Os resultados desta análise são apresentados na Figura 4.21 e Tabela 4.12.

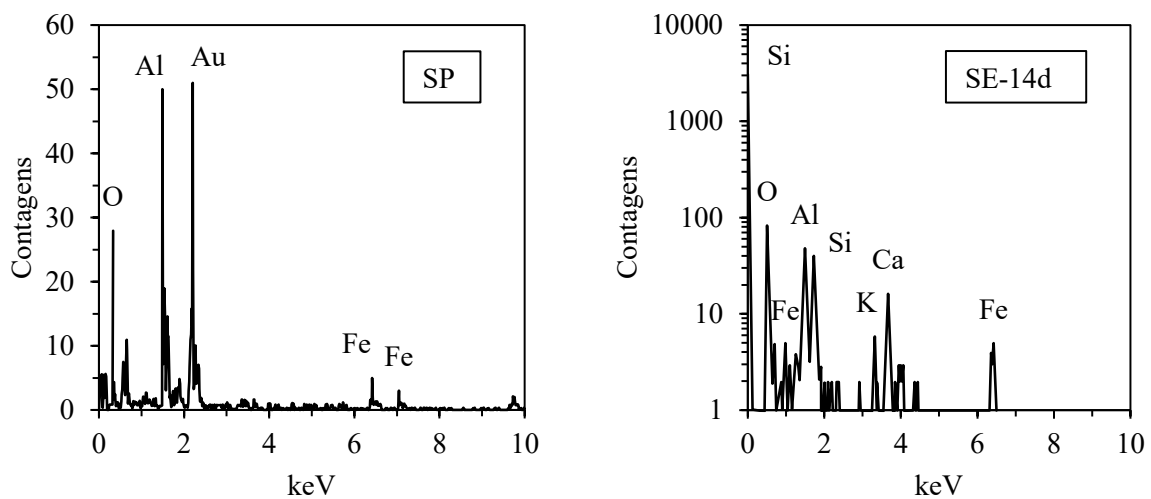


Figura 4.21 – Espectroscopia por Energia Dispersiva (EDS) do solo puro (SP) e estabilizado com cura de 14 dias (SE-14d).

No caso da análise do solo puro, esta atividade foi conduzida após a metalização, resultando em alta quantidade de ouro. Apesar disso, os principais elementos identificados

foram alumínio, oxigênio, silício e ferro, com alguns traços de potássio. No solo estabilizado, os principais elementos identificados permaneceram similares à situação inicial.

Tabela 4.12 – Quantitativos obtidos por elemento na análise de Espectroscopia por Energia Dispersiva (EDS)

Elemento	Percentual em peso (%)		Percentual atômico (%)	
	SP	SE-14d	SP	SE-14d
O	21,15	48,48	55,80	66,75
Al	13,53	13,20	21,17	10,78
Si	3,28	13,72	4,93	10,76
K	0,59	3,05	0,64	1,72
Ca	0,00	9,56	0,00	5,25
Fe	7,91	11,99	5,98	4,73
Au	53,54	0,00	11,48	0,00
Total	100,00	100,00	100,00	100,00

Esperava-se que fosse identificada a presença de carbono, especialmente no solo estabilizado, dada à natureza orgânica do polímero, porém não foram identificados picos referentes ao elemento carbono no solo puro ou no estabilizado. Este fenômeno pode estar ligado à faixa operada pelo equipamento. Para a identificação de carbono, deve-se buscar uma maior discretização dos dados, especialmente entre 0 e 1 keV, como o realizado por Vinod *et al.* (2010).

A distribuição de poros no solo, avaliada pela técnica de porosimetria por intrusão de mercúrio, é apresentada na Figura 4.22.

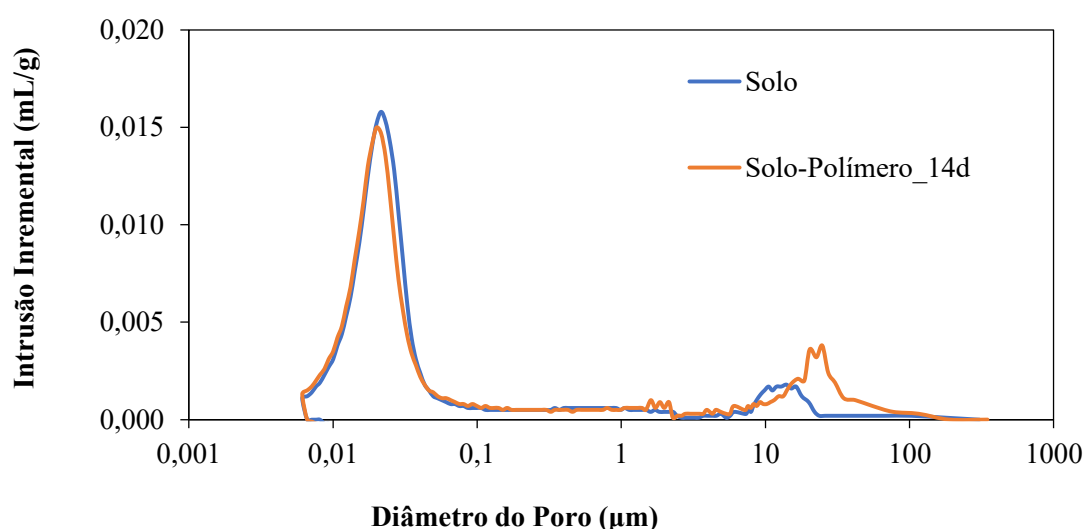


Figura 4.22 – Resultados da análise de porosimetria por intrusão de mercúrio do solo e do compósito solo-polímero após 14 dias de cura.

Observa-se a confirmação da hipótese levantada por Oliveira *et al.* (2022) e Crippa *et al.* (2025), de forma que após a compactação na energia Proctor Intermediária, a presença de

macroporos é significativamente reduzida, não havendo, no entanto, alterações na quantidade de microporos, uma vez que estes se encontram enclausurados dentro das agregações que não são afetadas pelos esforços da compactação ou pela ação do polímero.

Ao ser avaliada a distribuição dos poros no solo após a estabilização e cura do compósito solo-polímero, observou-se que a parcela de microporos permaneceu inalterada, independentemente da presença do polímero, indicando que a emulsão polimérica foi incapaz de penetrar, interagir ou promover modificações significativas nessa faixa. Contudo, verificou-se aumento na parcela de macroporos, a partir da qual permite-se inferir que a polimérica conseguiu promover a formação de ligações interpartículas. Durante o processo de secagem, a evaporação da água da emulsão resultou na geração de vazios adicionais, assim como percebido por meio da microscopia eletrônica de varredura.

## 5 CONCLUSÕES

A partir do extenso programa experimental desenvolvido, permitiu-se entender os mecanismos de estabilização química de um solo tropical argiloso da região do Distrito Federal com polímero, quando submetido a carregamentos estáticos e cíclicos. A partir da análise global dos resultados, pode-se concluir que:

- A caracterização dos materiais indicou que o solo é pouco plástico e sensível a variações de umidade, de comportamento laterítico e mineralogia composta por quartzo, e dos óxi-hidróxidos de alumínio e ferro, principalmente gibbsita, ao passo que via FTIR identificou-se o polímero como um poliestireno acrílico, composto por 71,96% de carbono e suscetível a degradação térmica. Dado o caráter básico do pH do solo e predominância de óxidos de alumínio, observou-se a redução da interação e da adesão polimérica;
- A partir do estudo de dosagem, observou-se a sensibilidade da RCS do compósito quando analisado pós-imersão. Ainda assim, considerou-se o teor de 50% de polímero em massa de água como o teor ótimo de concentração do aditivo, a partir do qual obteve-se quedas de resistência. Quando ao período de cura, percebeu-se ajustes diferentes na regressão da evolução de resistência ao se considerar condição não imersa e pós imersão, definindo-se 14 dias como período ideal;
- Sob solicitações estáticas, observou-se bilinearidade na envoltória de resistência, tornando-se necessária a avaliação dos parâmetros de resistência de forma isolada, para baixas e médias tensões confinantes. Quando sujeito a baixas tensões confinantes, percebe-se queda no ângulo de atrito e incremento no intercepto coesivo, ao passo que em tensões médias, ocorre processo contrário;
- Os resultados de módulo de resiliência indicaram ajuste significativo do modelo composto para todas as condições experimentais. Ao ensaiar o compósito após cura, percebeu-se aumento na resiliência do compósito quando comparado ao solo puro, entretanto, ao realizar correção de umidade, ocorre diminuição nesse parâmetro mecanicista, sinalizando elevada sensibilidade às variações de umidade;
- Quanto a deformação permanente, observou-se aumento rápido da deformação permanente para o solo puro, seguido de uma estabilização, para todos os pares

de tensão avaliados, enquanto o solo estabilizado com polímero demonstrou uma menor taxa de acréscimo de deformação nos primeiros ciclos e estabilização dos deslocamentos nos ciclos finais de carregamento, além de menores valores de deslocamentos totais em comparação ao solo puro;

- A partir dos ajustes de modelos matemáticos para prever a DP, percebeu-se que o modelo de Guimarães (2009) apresentou melhor ajuste para o solo estabilizado, o qual apresentou-se menos deformável, necessitando níveis de energia superiores para atingir os mesmos patamares de deslocamentos do solo natural compactado. Em relação ao modelo de Mota *et al.* (2024), observou-se sensibilidade do ajuste do solo estabilizado em função do número de ciclos considerados, em virtude do formato das curvas de deslocamento permanente, os quais não seguiram o comportamento convencional da literatura;
- Em relação ao efeito do polímero na microestrutura do solo, verificou-se por PIM que o elevado índice de vazios do solo se deve a elevada presença de microporos que permanecem na fábrica do solo mesmo após compactação. Após a estabilização, inferiu-se que a polimérica promoveu ligações entre as partículas e, durante o processo de cura por secagem, a evaporação da água da solução resultou na geração de vazios adicionais, hipótese confirmada pelas imagens de microscopia eletrônica de varredura.

Finalmente, por meio das análises físicas, químicas, mineralógicas e ensaios mecânicos estáticos e cíclicos, conclui-se que o presente trabalho contribui com o entendimento dos solos tropicais lateríticos com e sem estabilização, ao avaliar um solo típico da região de Brasília. O polímero avaliado ocasionou alterações relevantes na resposta do solo para aplicações em obras geotécnicas de carregamentos estáticos, como estabilização de aterros e encostas, e cíclicos, como a construção de estradas.

Indica-se como lacunas a serem preenchidas pelos trabalhos futuros ensaios e análises complementares no que se tange ao comportamento bimodal típico dos solos tropicais e ao comportamento dos solos tropicais estabilizados sob condições não saturadas. Ainda, sugere-se a realização de ensaios de LWT (adaptados para solo) e avaliação do escopo do presente estudo em menor energia de compactação.

## 6 REFERÊNCIAS

- ABNT (2012). NBR 12253: Solo-Cimento – Dosagem para Emprego como Camada de Pavimento - Procedimento. ABNT, Rio de Janeiro, RJ.
- ABNT (2022). NBR 12770: Solo – Determinação da Resistência à Compressão Não Confinada de Solo Coesivo. ABNT, Rio de Janeiro, RJ.
- ABNT (2024). NBR 6457: Amostras de Solo – Preparação para Ensaios de Compactação e Ensaios de Caracterização. ABNT, Rio de Janeiro, RJ.
- ABNT (2025a). NBR 6459: Solo – Determinação do Limite de Liquidez. ABNT, Rio de Janeiro, RJ.
- ABNT (2025b). NBR 7180: Solo – Determinação do Limite de Plasticidade. ABNT, Rio de Janeiro, RJ.
- ABNT (2025c). NBR 7181: Solo – Análise Granulométrica. ABNT, Rio de Janeiro, RJ.
- ABNT (2025d). NBR 7182: Solos – Ensaio de Compactação. ABNT, Rio de Janeiro, RJ.
- ABNT (2025e). NBR 9895: Solo – Índice de Suporte Califórnia (ISC) – Método de Ensaio. ABNT, Rio de Janeiro, RJ.
- ABNT (2025f). NBR 17212: Solos — Determinação da Massa Específica dos Sólidos da Fração Passante na Peneira com Abertura de 2,0 mm. ABNT, Rio de Janeiro, RJ.
- ADASKA, W.S. & LUHR, D.R. (2004). Control of reflective cracking in cement-stabilized pavements. 5th International RILEM Conference: Cracking in Pavements – Mitigation, Risk Assessment and Prevention, Limoges, France.
- AFRIN, H. (2017). A review on different types of soil stabilization techniques. *International Journal of Transportation Engineering and Technology*, 3 (2).
- AGGREBIND (2025). Soluções de Solo Sustentáveis para um Futuro Mais Forte. AggreBind. Disponível em: <<https://aggrebind.com/pt/>>. Acesso em: 12 maio 2025.
- ALELVAN, G.M., FERREIRA, J.W.S., CASAGRANDE, M.D.T. & CONSOLI, N.C. (2022). Proposal of new construction material: polymer-stabilized gold ore tailings composite. *Sustainability*, 14(13648).
- ALMAJED, A., LEMBOYE, K. & MOGHAL, A.A.B. (2022). A critical review on the feasibility of synthetic polymers inclusion in enhancing the geotechnical behavior of soils. *Polymers*, 14(22).
- ALNEDAWI, A. ULLAH, S., AZAM, A., MOUSA, E., OBAID, I. & YOSRI, A. (2022). Integrated and holistic knowledge map of resilient modulus studies for pavement materials: a scientometric analysis and bibliometric review of research frontiers and prospects. *Transportation Geotechnics*, 33: 100711.
- ANDRADE, P.V.Q. (2017). Estudo do Comportamento Mecânico de Microestruturas de Materiais Compósitos com Matriz Metálica. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, GO.
- ASTM (2020). D7181-20: Standard Test Method for Consolidated Drained Triaxial Compression Test for Soils. ASTM International, West Conshohocken, PA, USA.
- ASTM (2025). D4404-25: Standard Test Method for Determination of Pore Volume and Pore Volume Distribution of Soil and Rock by Mercury Intrusion Porosimetry. ASTM International, West Conshohocken, USA.
- BATISTA, L. P., KAKUDA, F. M., (2018). Avaliação do comportamento mecânico de solos estabilizados com polímero para utilização em camadas granulares. 32º Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes (ANPET), Gramado, RS.

- BERNUCCI, L.L.B., MOTTA, L.M.G., CERATTI, J.A.P. & SOARES, J.B. (2022). Pavimentação Asfáltica: Formação Básica para Engenheiros. 2. ed., Petrobras/ABEDA, Rio de Janeiro, RJ.
- BOAVENTURA, N.F. (2025). Avaliação do Comportamento Mecânico e Microestrutural de Compósitos Solo-Polímero: Estudo Experimental em Solo Arenoso e Bentonita. Tese de Doutorado, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF.
- BOAVENTURA, N.F., SOUSA, T.F.P. & CASAGRANDE, M.D.T. (2023). The application of an eco-friendly synthetic polymer as a sandy soil stabilizer. *Polymers*, 15(24).
- BOYCE, J.R. (1976). The Behaviour of a Granular Material Under Repeated Loading. PhD Thesis, University of Nottingham, Nottingham, UK.
- BROWN, S. (1996). Soil mechanics in pavement engineering. *Géotechnique*, 46(3), 383-426.
- CARRE, A. & SCHULTZ, J. (1983). Polymer–aluminium adhesion 1. The surface energy of aluminium in relation to its surface treatment. *Journal of Adhesion*, 15.
- CARVALHO, J.C. & GITIRANA JR., G.F.N. (2021). Unsaturated soils in the context of tropical soils. *Soils and Rocks*, 44(3), e2021068121.
- CARVALHO, J.C., GITIRANA JUNIOR, G.F.N., MACHADO, S.L., MASCARENHA, M.M.A. & SILVA FILHO, F.C.S. (2023). Solos Não Saturados no Contexto Geotécnico. 2. ed., Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica - ABMS, São Paulo, SP.
- CERATTI, J., GEHLING, W. & NÚÑEZ, W. (2004). Seasonal variations of a subgrade soil resilient modulus in Southern Brazil. *Transportation Research Record*, 1874(1), 165-173.
- CNT (2024). Pesquisa CNT de Rodovias 2024. Confederação Nacional do Transporte, Brasília, DF.
- COELHO, A.C.V. & SANTOS, P.S. (2007). Argilas especiais: argilas quimicamente modificadas - uma revisão. *Química Nova*, 30(5).
- CRIPPA, M.T., VENDRAME, P.R.S., FERREIRA, J.W.S. & TEIXEIRA, R.S. (2025). Hydro-mechanical behavior of tropical soils reinforced with recycled PET fibers: influence of weathering on fiber-matrix interaction. *Geotechnical and Geological Engineering*, 43(91).
- DNIT (2018a). Pavimentação - Material Estabilizado Quimicamente - Determinação do Módulo de Resiliência - Método de Ensaio. Instituto de Pesquisas Rodoviárias, Rio de Janeiro, RJ.
- DNIT (2018b). Pavimentação - Solos - Determinação da Deformação Permanente - Instrução de Ensaio. Instituto de Pesquisas Rodoviárias, Rio de Janeiro, RJ.
- DNIT (2023). DNIT 259/2023 - CLA: Classificação de Solos Tropicais Usando a Metodologia MCT – Classificação. Instituto de Pesquisas Rodoviárias, Rio de Janeiro, RJ.
- DONAYRE, A., SANCHEZ, L.F., KIM, S., AGUILAR, R. & NAKAMATSU, J. (2018). Eco-friendly improvement of water erosion resistance of unstable soils with biodegradable polymers. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 416, 012044.
- ETIM, R.K., ATTAH, I.C. & YOHANNA, P. (2020). Experimental study on potential of oyster shell ash in structural strength improvement of lateritic soil for road construction. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 13, 341-351.
- FERREIRA, J.W., MARROQUIN, J. F.R., FELIX, J.F., FARIAS, M.M. & CASAGRANDE, M.D.T. (2022). The feasibility of recycled micro polyethylene terephthalate (PET) replacing natural sand in hot-mix asphalt. *Construction and Building Materials*, 330: 127276.

- FIROOZI, A.A., OLGUN, C.G., FIROOZI, A.A. & BAGHINI, M.S. (2017). Fundamentals of soil stabilization. *International Journal of Geo-Engineering*, 8(26).
- FÖLDVÁRI, M. (2011). *Handbook of Thermogravimetric System of Minerals and its Use in Geological Practice*. Geological Institute of Hungary, Budapest, Hungary.
- GE, L., WANG, C., HUNG, C., LIAO, W. & ZHAO, H.(2018). Assesment of strength development of slag cement stabilized kaolinite. *Construction and Building Materials*, 184, 492-501.
- GEORGEES, R.N., HASSAN, R.A., EVANS, R.P. & JEGATHEESAN, P. (2016). Performance improvement of granular pavement materials using a polyacrylamide-based additive. *Geo-China 2016: Advances in Pavement Engineering and Ground Improvement*, GSP 258.
- GEORGEES, R.N., HASSAN, R.A., EVANS, R.P. & JEGATHEESAN, P. (2018a). Resilient response characterization of pavement foundation materials using a polyacrylamide-based stabilizer. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 30(1).
- GEORGEES, R.N., HASSAN, R.A. & EVANS, R.P. (2018b). Permanent deformation response of polymer-treated pavement foundation material under transmitted stress pulses. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 30(9).
- GEORGEES, R.N., HASSAN, R.A. & HASAN, F. (2020). Characterization of stabilization mechanism of pavement foundation material using polyacrylamide additive. *Journal of Transportation Engineering, Part B: Pavements*, 146(2).
- GIDIGASU, M.D. (1976). *Laterite Soil Engineering: Pedogenesis and Engineering Principles*. Elsevier, Amsterdam, Netherlands.
- GOLDBERG, S. (1989). Interaction of aluminum and iron oxides and clay minerals and their effect on soil physical properties: a review. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 20.
- GUIMARÃES, A.C.R. (2009). *Um Método Mecânico-Empírico para a Previsão da Deformação Permanente em Solos Tropicais Constituintes de Pavimentos*. Tese de Doutorado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ.
- GUIMARÃES, A.C.R., POVUAÇÃO, A.M., NASCIMENTO, G.C., MONTEIRO, S.N. & COELHO, L.M. (2025). Assessing the potential of lateritic clayey soils for road infrastructure in tropical regions. *Materials*, 18(8).
- HEAD, K.H. (1998). *Manual of Soil Laboratory Testing, Volume 3: Effective Stress Tests*. 2. ed., John Wiley & Sons, Chichester, UK.
- HEFER, A.W., LITTLE, D.N. & LYTTON, R.L. (2005). Synthesis of theories and mechanisms of bitumen-aggregate adhesion including recent advances in quantifying the effects of water. *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists: Proceedings of the Technical Sessions*, 74.
- HIRSCHLER, M.M. & MORGAN, A.B. (2008). Thermal decomposition of polymers. In: *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*. National Fire Protection Association, Quincy, EUA.
- HUANG, J., KOGBARA, R.B., HARIHARAN, N., MASAD, E.A. & LITTLE, D.N. (2021). A state of the art review of polymers used in soil stabilization. *Construction and Building Materials*, 305: 124685.
- HUANG, Y.H. (2004). *Pavement Analysis and Design*. Pearson/Prentice Hall, Englewood Cliffs, USA.
- HUAT, B.B.K., SEE-SEW, G. & ALI, F.H. (2004). *Tropical Residual Soils Engineering*. CRC Press, London, UK.

- HUAT, B.B.K., TOLL, G. & PRASSAD, A. (2012). Handbook of Tropical Residual Soils Engineering. 1. ed., CRC Press, London, UK.
- HUGGETT, R.J. (2011). Fundamentals of Geomorphology. Routledge, London, UK.
- KHASAWNEH, M.A. (2019). Investigation of factors affecting the behaviour of subgrade soils resilient modulus using robust statistical methods. *International Journal of Pavement Engineering*, 20(10), 1193-1206.
- LATIFI, N., HORPIBULSUK, S., MEEHAN, C.L., MAJID, M.Z.A., TAHIR, M.M. & MOHAMAD, E.T. (2016). Improvement of problematic soils with biopolymer - an environmentally friendly soil stabilizer. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 29(2).
- LÉKARP, F., ISACSSON, U. & DAWSON, A. (2000). State of the art I: resilient response of unbound aggregates. *Journal of Transportation Engineering*, 126(1).
- LIBÂNIO, B.F.S. (2024). Estudo do Comportamento Geomecânico de um Solo Laterítico da Província do Pará. Dissertação de Mestrado em Geotecnia, Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG.
- LIMA, C.A. (2020). Avaliação da Deformação Permanente de Materiais de Pavimentação a Partir de Ensaio Triaxiais de Cargas Repetidas. Tese de Doutorado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ.
- LIMA, C.A., ARAGÃO, F.T.S. & GUIMARÃES, A.C.R., (2018). Contribution to the study of Brazilian tropical soils as pavement materials. 13th ISAP Conference on Asphalt Pavements, Fortaleza, CE.
- LIU, J., SHI, B., JIANG, H., HUANG, H., WANG, G. & KAMAI, T. (2011). Research on the stabilization treatment of clay slope topsoil by organic polymer soil stabilizer. *Engineering Geology*, 117 (1-2).
- LOPES, B.C.F.L., KÜHN, V. O., QUEIROZ, A.C.G., CAICEDO, B. & CORDÃO NETO, M.P., (2022). Structure evaluation of a tropical residual soil under wide range of compaction conditions. *Géotechnique Letters*, 12(2).
- LOPES, M.M., FERREIRA, J.W.S. & CASAGRANDE, M.D.T. (2025). Stabilization of ultrafine iron tailings with acrylic–styrene copolymer for sustainable geotechnical applications. *Polymers*, 17(19), 2624.
- LUAN, Y. MA, X., MA, Y., LIU, X., JIANG, S. & JIANMING, Z. (2023). Research on strength improvement and stabilization mechanism of organic polymer stabilizer for clay soil of subgrade. *Case Studies in Construction Materials*, 19.
- MADEJOVÁ, J. (2003). FTIR techniques in clay mineral studies. *Vibrational Spectroscopy*, 31(1).
- MALHOTRA, S.L., HESSE, J. & BLANCHARD, L.P. (1975). Thermal decomposition of polystyrene. *Polymer*, 16(2).
- MEDINA, J. & MOTTA, L.M.G. (2015). Mecânica dos Pavimentos. Interciência, Rio de Janeiro, RJ.
- MELO, V.F. & ALLEONI, L.R.F. (2019). Química e Mineralogia do Solo. SBCS, Viçosa, MG.
- MENGUE, E., MROUEH, H., LANCELOT, L. & MEDJO EKO, R. (2018). Design and parametric study of a pavement foundation layer made of cement-treated fine-grained lateritic soil. *Soils and Foundations*, 58(3), 666-677.
- MORALES, D.P. SALDANHA, R.B., AGUADA, J.M. & CONSOLI, N.C. (2024). Alkali-activation of agro-industrial waste for stabilization of lateritic soils. *Transportation Geotechnics*, 45, 101187.

- MOTA, B.C., UBALDO, M. O., LIMA, C., NASCIMENTO, L. & ARAGÃO, F. T. S. (2024). Optimized characterization of the permanent deformation of unbound soils and granular materials considering the master curve concept. *Transportation Geotechnics*, 47: 101291.
- MOTA, B.C., NASCIMENTO, M.A.M., CARVALHO, E.O., UBALDO, M.O., GUIMARÃES, D.M.D., NASCIMENTO, L. & ARAGÃO, F.T.S. (2025). Comportamento resiliente de solos finos frente à variação de umidade. 27º Encontro Nacional de Conservação Rodoviária (ENACOR) e 50ª Reunião Anual de Pavimentação (RAPv), Belo Horizonte, MG.
- MOTA, B.C, SILVA, G.V., UBALDO, M.O., LIMA, C., ESPÍNDOLA, R.P., NASCIMENTO, L.A.H. & ARAGÃO, F.T.S. (2026). A data-driven approach to optimize the permanent deformation analysis of soils and granular materials based on the construction of master curves. *SSRN Electronic Journal*.
- NGUYEN, B.T. & MOHAJERANI, A. (2016). Resilient modulus of fine-grained soil and a simple testing and calculation method for determining an average resilient modulus value for pavement design. *Transportation Geotechnics*, 7, 59-70.
- NOGAMI, J.S. & VILLIBOR, D.F. (1981). Uma nova classificação de solos para finalidades rodoviárias. Simpósio Brasileiro de Solos Tropicais em Engenharia, Rio de Janeiro, RJ.
- OLIVEIRA, A.D., PELAQUIM, F.G.P., ZANIN, R.F.B., MELO, T.R., TAVARES FILHO, J., ANDRELLO, A.C. & TEIXEIRA, R.S.(2022). The structure of tropical lateritic soils as an impacting factor in the shape of soil-water characteristic curves. *Soils and Rocks*, 45(2).
- OLIVEIRA, N.A.C. (2022). Estudo da Influência da Variação de Umidade Pós-Compactação no Comportamento de Três Solos Típicos de Subleitos Rodoviários Brasileiros. Dissertação de Mestrado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ.
- OSULA, D.O.A. (1989). Evaluation of admixture stabilization for problem laterite. *Journal of Transportation Engineering*, 115(6): 674-687.
- OSULA, D.O.A. (1993). Laboratory trial of soil–sodium chloride–cement stabilization for problem laterite. *Journal of Transportation Engineering*, 119(1), 149-158.
- OWOYEMI, O.O. & ADEYEMI, G.O. (2017). Variability in the highway geotechnical properties of two residual lateritic soils from central Nigeria. *Journal of Geology & Geophysics*, 6(3): 290.
- PAN, T., TUTUMLUER, E. & ANOCHIE-BOATENG, J. (2006). Aggregate morphology affecting resilient behavior of unbound granular materials. *Transportation Research Record*, 1952 (1).
- PELTIER, L.C. (1950). The geographic cycle in periglacial regions as it is related to climatic geomorphology. *Annals of the Association of American Geographers*, 40, 214-236.
- PEREIRA, T.T.C. et al. (2020). A mineralogia dos solos tropicais: estado da arte e relação com o uso e manejo. *Geonomos*, 28(1).
- PETERSON, J.R., FLANAGAN, D.C. & TISHMACK, J.K. (2002). Polyacrylamide and gypsiferous material effects on runoff and erosion under simulated rainfall. *Transactions of the ASAE*, 45(4).
- POVUAÇÃO, A.M., GUIMARÃES, A.C. M., MONTEIRO, S.N. (2025). Análise do comportamento de um solo arenoso reforçado com fibra de piaçava e cimento portland por meio de ensaios de deformação permanente e módulo de resiliência. 27º Encontro Nacional de Conservação Rodoviária (ENACOR) e 50ª Reunião Anual de Pavimentação (RAPv), Belo Horizonte, MG.

- PREUSSLER, E.S. (1983). Estudo da Deformação Resiliente de Pavimentos Flexíveis e Aplicação ao Projeto de Camadas de Reforço. Tese de Doutorado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ.
- ROLT, J. et al. (2022). RN 31: A Guide to the Structural Design of Surfaced Roads in Tropical and Sub-Tropical Regions. TRL Limited, London, UK.
- SAING, Z., SAMANG, L., HARIANTO, T. & PATANDUK, J. (2017). Mechanical characteristic of ferro laterite soil with cement stabilization as a subgrade material. *International Journal of Civil Engineering and Technology*, 8(3), 609-616.
- SANTOS, H.G. (2011). O Novo Mapa de Solos do Brasil: Legenda Atualizada. Embrapa Solos, Rio de Janeiro, RJ.
- SEED, H.B. et al. (1967). Prediction of Flexible Pavement Deflections from Laboratory Repeated-Load Tests. Transportation Research Board NCHRP Report, 35.
- SILVA, B.O. (2019). Estudo Comparativo entre Metodologias de Classificação e Caracterização Mecânica de Solos da Região Metropolitana de Belo Horizonte para Fins Rodoviários. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG.
- SILVERSTEIN, R.M., WEBSTER, F.X. & KIEMLE, D.J. (2005). Spectrometric Identification of Organic Compounds. 7. ed., John Wiley and Sons, New Jersey, USA.
- SVENSON, M. (1980). Ensaio Triaxiais Dinâmicos de Solos Argilosos. Dissertação de Mestrado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ.
- TAKEDA, M.C. (2006). A Influência na Variação da Umidade Pós-Compactação no Comportamento Mecânico de Solos de Rodovias do Interior Paulista. Tese de Doutorado, Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, SP.
- TAYLOR, S.R. & MCLENNAN, S.M. (1985). The Continental Crust: Its Composition and Evolution. Blackwell Scientific Publications, Oxford, UK.
- TEIXEIRA, P.C.; DONAGEMMA, G.K.; FONTANA, A. & TEIXEIRA, W.G. (2017). Manual de Métodos de Análise de Solo. Embrapa, Brasília, DF.
- TERZAGHI, K. & PECK, R. (1996). Soil Mechanics in Engineering Practice. 3. ed., John Wiley and Sons, New York, USA.
- THOMAS, M. (2019). Estudo de um Solo Argiloso Laterítico com Adições de Resíduos de PET em Pó e em Flocos. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Pampa, Alegrete, RS.
- TINGLE, J.S. & SANTONI, R.L. (2003). Stabilization of clay soils with nontraditional additives. *Transportation Research Record*, 1819(1).
- TOLEDO, S.P., SANTOS, H.L. & SANTOS, P.S. (2002). Clay mineral characterization in kaolins and ball-clays from Santa Catarina (2002). *Acta Microscopica*.
- UZAN, J. (1985). Characterization of granular material. *Transportation Research Record*, 1022, 52-59.
- WERKMEISTER, S., DAWSON, A.R. & WELLNER, F. (2001). Permanent deformation behavior of granular materials and the shakedown concept. *Transportation Research Record*, 1.
- XIA, C., CAO, X., WEN, J., LI, J., DAI, L. & GUAN, B. (2024). Effect of acrylate emulsion on the mechanical and microscopic properties of straw fiber-reinforced cement-magnesium slag stabilized soils. *Polymers*, 16(24).

- YANG, Z., SUN, J., ZHANG, Y., LIU, J., OH, E. & MA, Z. (2025). A systematic evaluation of the empirical relationships between the resilient modulus and permanent deformation of pavement materials. *Buildings*, 15 (5).
- ZAGO, J.P. (2016). Estudo da Deformação Permanente de Três Solos Típicos de Subleitos Roviários de Santa Maria - RS. Dissertação de Mestrado, UFSM, Santa Maria, RS.