

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

**DESAFIOS DA ESTABILIZAÇÃO ENZIMÁTICA NO
COMPORTAMENTO MECÂNICO DE SOLO TROPICAL PARA
APLICAÇÕES GEOTÉCNICAS**

FELIPHE AMARANTE ARAÚJO

ORIENTADOR: PROF. JOSÉ WILSON DOS SANTOS FERREIRA, DSc.

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM GEOTECNIA
PUBLICAÇÃO: G.DM-432/2026**

BRASÍLIA / DF, 06 DE FEVEREIRO DE 2026

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

**DESAFIOS DA ESTABILIZAÇÃO ENZIMÁTICA NO COMPORTAMENTO
MECÂNICO DE SOLO TROPICAL PARA APLICAÇÕES GEOTÉCNICAS**

FELIPHE AMARANTE ARAÚJO

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.

APROVADO POR:

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

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

**RAQUEL SOUZA TEIXEIRA, DSc. (UEL)
(EXAMINADORA EXTERNA)**

BRASÍLIA / DF, 06 DE FEVEREIRO DE 2026

ARAÚJO, FELIPHE AMARANTE

Desafios da estabilização enzimática no comportamento mecânico de solo tropical para aplicações geotécnicas (Distrito Federal) 2026

xviii, 111 p., 297 mm (ENC/FT/UnB, Mestre, Geotecnia, 2026)

Dissertação de Mestrado – Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

1. Estabilização Enzimática

2. Novos Materiais Geotécnicos

3. Obras Geotécnicas

4. Pavimentação

I. ENC/FT/UnB

II. Título (série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

ARAÚJO, F. A. (2026). Desafios da estabilização enzimática no comportamento mecânico de solo tropical para aplicações geotécnicas. Dissertação de Mestrado, Publicação G.DM-432/2026, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 111 p.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Felipe Amarante Araújo

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO: Desafios da estabilização enzimática no comportamento mecânico de solo tropical para aplicações geotécnicas

GRAU / ANO: Mestre / 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 a autorização por escrito do autor.

Felipe Amarante Araújo

José Aleixo, 254, Liberdade

69.309-030 – Boa Vista/RR – Brasil

*“It is the questions we can’t
answer that teach us the most.
They teach us how to think.”*

Patrick Rothfuss – The Wise Man’s Fear

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus, por ser sombra, refúgio e esconderijo.

À minha família, por todo o amor, apoio e encorajamento para que eu nunca desistisse dos meus sonhos. Vocês serão sempre meu exemplo de vida. Mesmo nos momentos de saudade, estiveram presentes por meio do apoio e das lembranças. Em especial, agradeço à minha mãe, Júlia, por todo o suporte incondicional, por sempre apoiar minhas decisões e por jamais impor obstáculos à realização dos meus sonhos.

Ao meu pai, tudo o que sinto são saudades e como queria mostrar até onde cheguei, agradeço pelos ensinamentos e pelo eterno apoio.

Ao meu orientador, Professor José Wilson, pelos ensinamentos transmitidos, pela confiança em meu potencial (muitas vezes maior do que eu mesmo acreditava) pela amizade e pelo apoio ao longo desta jornada. Serei eternamente grato pelas dúvidas sanadas e pelas inúmeras correções realizadas ao longo deste trabalho. Muito obrigado, professor.

Aos membros da banca examinadora, pelos comentários e apontamentos, que trouxeram contribuições significativas para o aprimoramento do trabalho final.

Aos amigos do Laboratório de Novos Materiais Geotécnicos, em especial Augusto e Lídia, agradeço por tornarem o ambiente de pesquisa tão acolhedor, leve e colaborativo, dentro e fora da universidade. Nos diversos momentos de dúvidas durante a realização dos ensaios, sempre pude contar com auxílio, companheirismo e bons momentos, que tornaram até os almoços no RU engraçados.

Ao DER-DF, pelo auxílio e pela disponibilidade na condução dos ensaios em suas instalações. Agradeço, em especial, ao engenheiro Mateus, pela oportunidade e pela parceria estabelecida.

Ao Laboratório de Novos Materiais Geotécnicos e ao Casagrande Research Group, agradeço pelo ambiente favorável e pelo suporte oferecido para a realização de grande parte dos ensaios desenvolvidos neste trabalho.

Aos laboratórios internos da Universidade de Brasília, agradeço o apoio na execução dos ensaios, em especial ao Instituto de Geociências (IG), ao Instituto de Química (IQ) e ao Instituto de Ciências Biológicas (IB).

Aos meus amigos de Roraima, sou imensamente grato pelo apoio constante e pelas palavras de incentivo, que sempre reforçaram minha confiança.

Às amigas formadas em Brasília, especialmente aos amigos da igreja, agradeço o apoio, as orações e o acolhimento ao longo dessa caminhada.

Aos professores da Universidade Federal de Roraima, que me apresentaram à Geotecnia, área pela qual sou profundamente apaixonado, agradeço pelos ensinamentos e pelas recomendações. Em especial, à Professora Mariana e ao Professor Adriano.

Às políticas de Demanda Social pelo fomento às bolsas de pós-graduação, em especial ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) sob Processo 405313/2025-0 do Projeto CNPq/MCTI/FNDCT – Chamada Universal nº 44/2024, à Fundação de Apoio à Pesquisa do Distrito Federal (FAP/DF) sob Projeto SEI-GDF nº 00193-00001386/2024-04, e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES).

Por fim, deixo meus sinceros agradecimentos a todos que, de forma direta ou indireta, contribuíram para a realização desta conquista.

RESUMO

A estabilização de solos tropicais argilosos constitui uma solução relevante para a melhoria do comportamento geotécnico de materiais empregados em obras de terra e pavimentação, especialmente em regiões onde a disponibilidade de materiais granulares é limitada. Nesse contexto, os estabilizantes enzimáticos surgem como uma tecnologia promissora; contudo, ainda existem lacunas na compreensão de seus mecanismos de atuação. Nesse contexto, o presente trabalho teve como objetivo entender o efeito da estabilização enzimática no comportamento mecânico de solo tropical argiloso do Distrito Federal, avaliando sua resposta sob carregamentos monotônicos e cíclicos. Para isso, foi desenvolvido extenso programa experimental, contemplando ensaios de caracterização física, química, mineralógica e térmica do solo e do estabilizante, nas dosagens de 0,5% à 18,1% em relação a massa seca de solo, compactação na energia intermediária, bem como ensaios de resistência à compressão simples considerando rompimento em amostras nas condições secas ao ar e imersas, triaxiais monotônicos drenados, Índice de Suporte Califórnia (ISC), triaxiais cíclicos de cargas repetidas, para determinação do módulo de resiliência (MR) e deformação permanente (DP), *Load Wheel Tracker* (LWT), além de ensaios complementares, como porosimetria por intrusão de mercúrio (PIM) e microscopia eletrônica de varredura (MEV). A partir do estudo da dosagem, e definidos os teores de enzima a serem trabalhados de 8,55% e 0,5%, observou-se que a etapa de imersão pós-cura afeta significativamente o comportamento mecânico dos compósitos com enzima. Aos 7 dias de cura, observou-se o incremento expressivo da resistência mecânica para ambos os teores, com aumento do intercepto coesivo e ângulo de atrito interno. Quanto à resposta sob carregamento cíclico, os solos estabilizados apresentaram maior recuperação elástica, tanto na condição seco ao ar quanto imerso, ao mesmo tempo que a presença da enzima reduziu as deformações permanentes acumuladas e, em determinadas condições de tensão, obteve comportamento mais favorável quanto ao fenômeno de *shakedown*, sobretudo para o teor de 8,55% de enzima. De maneira global, os resultados demonstram que a estabilização enzimática não promove alterações significativas na mineralogia do solo, atuando predominantemente por meio do rearranjo microestrutural e da intensificação das interações interparticulares, sendo corroborado pelas análises microestruturais e de permeabilidade. Pelo exposto, conclui-se que a estabilização enzimática se mostra uma técnica promissora para aplicação em solos tropicais argilosos destinados a obras geotécnicas e rodoviárias.

ABSTRACT

The stabilization of tropical clayey soils constitutes a relevant solution for improving the geotechnical behavior of materials used in earthworks and pavement construction, especially in regions where the availability of granular materials is limited. In this context, enzymatic stabilizers emerge as a promising technology; however, there are still gaps in the understanding of their mechanisms of action. Therefore, the present study aimed to understand the effect of enzymatic stabilization on the mechanical behavior of a tropical clayey soil from the Federal District, evaluating its response under monotonic and cyclic loading. To this end, an extensive experimental program was developed, including physical, chemical, mineralogical, and thermal characterization tests of both the soil and the stabilizer, at dosages ranging from 0.5% to 18.1% relative to the dry mass of soil, compaction at intermediate energy, as well as unconfined compressive strength tests considering failure in specimens under air-dried and immersed conditions, drained monotonic triaxial tests, California Bearing Ratio (CBR), repeated load cyclic triaxial tests for the determination of resilient modulus (MR) and permanent deformation (PD), Load Wheel Tracker (LWT) tests, in addition to complementary tests such as mercury intrusion porosimetry (MIP) and scanning electron microscopy (SEM). Based on the dosage study, and after defining the enzyme contents to be adopted (8.55% and 0.5%), it was observed that the post-curing immersion stage significantly affects the mechanical behavior of the enzyme-treated composites. After 7 days of curing, a significant increase in mechanical strength was observed for both dosages, with an increase in the cohesive intercept and internal friction angle. Regarding the response under cyclic loading, the stabilized soils exhibited greater elastic recovery, both in the air-dried and immersed conditions. At the same time, the presence of the enzyme reduced the accumulated permanent deformations and, under certain stress conditions, resulted in more favorable behavior with respect to the shakedown phenomenon, particularly for the 8.55% enzyme content. Overall, the results demonstrate that enzymatic stabilization does not promote significant changes in soil mineralogy, acting predominantly through microstructural rearrangement and the intensification of interparticle interactions, as corroborated by the microstructural and permeability analyses. Based on the findings, it can be concluded that enzymatic stabilization is a promising technique for application in tropical clayey soils intended for geotechnical and roadway works.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
1.1 CONTEXTO GERAL.....	1
1.2 OBJETIVOS.....	2
1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	3
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	4
2.1 SOLOS TROPICAIS E SUA CLASSIFICAÇÃO	4
2.1.1 SOLOS LATERÍTICOS	6
2.2 PAVIMENTAÇÃO	8
2.1.1 MÓDULO DE RESILIÊNCIA	8
2.1.2 DEFORMAÇÃO PERMANENTE	10
2.2 ESTABILIZAÇÃO DO SOLO	14
2.2.1 ESTABILIZANTE ENZIMÁTICO	15
2.2.2 ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS COM ENZIMAS.....	20
3 METODOLOGIA	24
3.1 MATERIAIS	24
3.2 DOSAGENS.....	26
3.3 PREPARAÇÃO DO SOLO	26
3.4 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO FÍSICA E CLASSIFICAÇÃO	27
3.5 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO AVANÇADA.....	28
3.6 MOLDAGEM DOS CORPOS DE PROVA.....	31
3.7 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES	34
3.8 TRIAXIAL MONOTÔNICO.....	35
3.9 CBR.....	39
3.10 TRIAXIAL CÍCLICO DE CARGAS REPETIDAS	39
3.11 <i>LOAD WHEEL TEST</i> (LWT).....	43
3.12 ENSAIOS PARA AVALIAÇÃO MICROESTRUTURAL	47
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	48
4.1 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA, CLASSIFICAÇÃO E COMPACTAÇÃO DO SOLO....	48
4.2 DIFRAÇÃO DE RAIOS-X (DRX)	51
4.3 ENSAIOS QUÍMICOS.....	52
4.3.1 FTIR.....	52
4.3.2 FLUORESCÊNCIA DE RAIOS-X (FRX).....	54

4.3.3 ICP/OES.....	56
4.3.4 ANÁLISE ELEMENTAR CNH	58
4.3.5 DSC/TG	59
4.4 TEORES DE DOSAGEM	60
4.5 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA E COMPACTAÇÃO DO SOLO ESTABILIZADO	64
4.6 INFLUÊNCIA DA CURA NA RCS	66
4.7 ENSAIO TRIAXIAL MONOTÔNICO.....	70
4.8 EXPANSÃO E CBR.....	75
4.9 MÓDULO DE RESILIÊNCIA	77
4.10 DEFORMAÇÃO PERMANENTE	80
4.10.1 MODELOS PROPOSTOS POR GUIMARÃES (2009) E MOTA (2024).....	91
4.11 LOAD WHEEL TEST (LWT).....	93
4.12 MICROESTRUTURA.....	96
5. CONCLUSÕES.....	100
5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	101
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	103

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 - Dados fornecidos da enzima (Modificado - Ecolink, s.d.).....	25
Tabela 3.2 - Ensaio químicos realizados.....	28
Tabela 3.3 - Corpo de prova dos ensaios mecânicos.....	33
Tabela 3.4 - Fator de correção para o tempo de ruptura (Adaptado de BS 1377-7/1990)	38
Tabela 3.5 - Tensões ensaiadas no ensaio de deformação permanente	42
Tabela 4.1 - Caracterização física do solo puro	48
Tabela 4.2 - Porcentagem passante nas peneiras e classificação do solo	49
Tabela 4.3 - Composição química presente no solo e na enzima pelo ensaio FRX.....	55
Tabela 4.4 - Análise química por FRX dos elementos menores no solo e na enzima	56
Tabela 4.5 - Composição química presente no solo e na enzima pelo ensaio ICP/OES	57
Tabela 4.6 - Análise elementar de Carbono, Hidrogênio e Nitrogênio	58
Tabela 4.7 - Dados dos CPs rompidos na compressão simples na condição seca ao ar.....	60
Tabela 4.8 - Dados dos CPs rompidos na compressão simples na condição imersa.....	61
Tabela 4.9 - Valores de resistência à compressão simples.	61
Tabela 4.10 - Caracterização física do solo estabilizado.....	64
Tabela 4.11 - Corpos de prova para SE-0.5	67
Tabela 4.12 - Corpos de prova para SE-8.55	67
Tabela 4.13 - Valores de resistência à compressão simples por dia de cura	69
Tabela 4.14 - Dados dos corpos de prova SP do ensaio triaxial.	71
Tabela 4.15 - Dados dos corpos de prova SE-0.5 do ensaio triaxial.....	71
Tabela 4.16 - Dados dos corpos de prova SE-8.55 do ensaio triaxial.....	71
Tabela 4.17 - Etapa de expansão no ensaio CBR.....	75
Tabela 4.18 - Parâmetros para modelos dependentes de tensão confinante e desviadora	77
Tabela 4.19 - Parâmetros do modelo composto de MR	78
Tabela 4.20 - Dados dos compósitos SE-0.5 e SE-8.55 para o ensaio DP	83
Tabela 4.21 - Modelo de deformação permanente de Guimarães.....	91
Tabela 4.22 - Afundamentos gerados pelo ensaio LWT	93
Tabela 4.23 - Elementos encontrados pela técnica de EDS.....	99

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) em solo: a) Solo não laterítico; b) Solo laterítico (Santos, 2006).....	7
Figura 2.2 - Tensões aplicadas e deslocamentos no ensaio triaxial cíclico (Adaptado de Bernucci et al., 2008).....	9
Figura 2.3 - Modelos de comportamento a deformação permanente de solos (Adaptado de DNIT-IE 179, 2018)	12
Figura 2.4 - Neutralização da enzima nas partículas de argila: a) Partículas de argila com alta afinidade por água; b) Partícula orgânica encapsulada diminuindo a dupla camada; c) Partículas de argilas estabilizadas (Modificado – Renjith et al. 2020).....	19
Figura 3.1 - Fluxograma das etapas experimentais	24
Figura 3.2 - Localização geográfica do local da coleta (Google Earth, 2025).	25
Figura 3.3 - Etapas de preparação do solo: a) transporte; b) secagem; c) destorroamento; d) armazenamento.	27
Figura 3.4 - Ensaio de perda de massa por imersão: a) Início do ensaio b) Final do ensaio. ...	28
Figura 3.5 - Preparação da enzima para os ensaios químicos: a) fase líquida; b) fase sólida; c) sólida pulverizada.....	29
Figura 3.6 - Correção de umidade para a solução enzimática: a) Partículas sólidas presentes na solução enzimática; b) Equação gerada.....	33
Figura 3.7 – Ensaio triaxial estático: a) Equipamentos utilizados; b) Ensaio montado	36
Figura 3.8 - Montagem do corpo de prova na câmara triaxial (Manual Owntec, s.d.)	41
Figura 3.9 - Equipamento para ensaio LWT (Solotest, s.d.)	43
Figura 3.10 - Equipamentos para moldagem de corpo de prova para ensaio LWT: a) Chapa metálica; b) Moldes metálicos; c) Distribuidor de carga metálico; d) Suporte.	44
Figura 3.11 - Compactação do corpo de prova do ensaio LWT: a) Sistema montado; b) Encaixe do soquete no molde; c) Escarificação da primeira camada; d) Término da compactação; e) Corpo de prova moldado.....	45
Figura 3.12 - Peças e partes do equipamento LWT (Solotest, s.d.)	46
Figura 4.1 - Curva granulométrica do solo.	48
Figura 4.2 - Curva de compactação do solo.....	50
Figura 4.3 - Difração de Raio-X do solo puro.	51
Figura 4.4 - Espectroscopia de infravermelho (FTIR) das amostras.....	52
Figura 4.5 - Gráficos do ensaio de DSC/TG: a) DSC; b) TG.....	59

Figura 4.6 - Compressão simples inicial, considerando condição seca ao ar e imersa.	62
Figura 4.7 - Ensaio de massa específica para o solo estabilizado.	64
Figura 4.8 - Curvas de compactação do solo estabilizado SE-0.5 e SE-8.55.	65
Figura 4.9 – Desenvolvimento da resistência à compressão simples ao longo do período de cura	68
Figura 4.10 - Acompanhamento do pH do solo estabilizado.....	69
Figura 4.11 – Curvas tensão desviadora <i>versus</i> deformação axial e deformação volumétrica <i>versus</i> deformação axial para: a) SP; b) SE-0.5; c) SE-8.55	73
Figura 4.12 - Trajetória de tensões efetivas ($q \times p'$)	75
Figura 4.13 - Representação do modelo composto para o solo e compósitos	79
Figura 4.14 - Resultados do ensaio de DP para SP	81
Figura 4.15 - Gráfico da taxa de DP para o solo puro	82
Figura 4.16 - Resultados de DP para os compósitos SE-0.5: a) Seco ao ar; b) Imerso.....	84
Figura 4.17 - Gráfico da taxa de DP para os compósitos SE-0.5: a) Seco ao ar; b) Imerso.	85
Figura 4.18 - Resultados de DP para os compósitos SE-8.55: a) Seco ao ar; b) Imerso.....	87
Figura 4.19 - Gráfico da taxa de DP para os compósitos SE-8.55: a) Seco ao ar; b) Imerso. ...	89
Figura 4.20 – Curvas mestres (PD-S) do solo puro e compósitos com 0,5% e 8,55% de enzima	93
Figura 4.21 - Gráfico de afundamento do ensaio LWT	94
Figura 4.22 - Ensaio LWT: a) SP-S; b) SE-0.5; c) SE-8.55; d) Ensaio interrompido por afundamento máximo no solo estabilizado para SE-0.5; e) SP-Wot	95
Figura 4.23 - Ensaio de Porosimetria por Intrusão de Mercúrio (PIM).	97
Figura 4.24 – Microscopia Eletrônica de Varredura para: a) SP; b) SE-0.5; c) SE-8.55	98

LISTA DE SÍMBOLOS

- B – Parâmetro de Skempton
c – Coesão do solo
c' – Coesão efetiva do solo
Cc – Coeficiente de classificação do solo
Cu – Coeficiente de uniformidade do solo
D10 – Diâmetro efetivo do solo
DP – Deformação permanente
d' – Coeficiente angular da reta de resistência efetiva
e – Índice de vazios
e' – Índice de classificação do solo (metodologia MCT)
 ϵ_p – Deformação permanente específica
GC – Grau de compactação
Sr – Grau de saturação
 γ_d – Massa específica seca
 $\gamma_{d,max}$ – Massa específica seca máxima
 $\gamma_{d,min}$ – Massa específica seca mínima
IP – Índice de plasticidade
LL – Limite de liquidez
LP – Limite de plasticidade
MR – Módulo de resiliência
n – Porosidade
N – Número de ciclos de carregamento
Nred – Número reduzido de ciclos
pH – Potencial hidrogeniônico
p' – Tensão média efetiva
p₀ – Pressão atmosférica de referência
q – Tensão desviadora
S – Parâmetro de tensão do modelo PD-S
SF – Fator de deslocamento
 σ_1 – Tensão principal maior
 σ_3 – Tensão confinante
 σ_d – Tensão desviadora

ϕ – Ângulo de atrito interno

ϕ' – Ângulo de atrito interno efetivo

$\psi_1, \psi_2, \psi_3, \psi_4$ – Parâmetros empíricos do modelo de deformação permanente de Guimarães

w – Teor de umidade

w_{ót} – Umidade ótima de compactação

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AASHTO – *American Association of State Highway and Transportation Officials*

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ASTM – *American Society for Testing and Materials*

ATR – Afundamento em trilha de roda

BET – Área superficial específica

CAIQ – Central Analítica do Instituto de Química

CBR – *California Bearing Ratio*

CP – Corpo de prova

DCP – *Dynamic Cone Penetrometer*

DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes

DER – Departamento de Estradas de Rodagem

DP – Deformação permanente

DRX – Difração de raios X

DSC/TG – Calorimetria diferencial de varredura / Termogravimetria

EDS – *Energy Dispersive Spectroscopy*

fRX – Fluorescência de raios X

FTIR – *Fourier Transform Infrared Spectroscopy*

IB – Instituto de Ciências Biológicas

ICP/OES – *Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectrometry*

IG – Instituto de Geociências

IQ – Instituto de Química

LWT – *Load Wheel Tracker*

MCT – Miniatura, Compactado, Tropical

MEV – Microscopia eletrônica de varredura

MR – Módulo de resiliência

PD-S – Modelo de deformação permanente por curvas mestras

PIM – Porosimetria por intrusão de mercúrio

RCS – Resistência à compressão simples

SE-0.5 – Solo estabilizado com 0,5% de enzima

SE-8.55 – Solo estabilizado com 8,55% de enzima

SEM – *Scanning Electron Microscopy*

SP – Solo puro

SUCS – *Unified Soil Classification System*

UnB – Universidade de Brasília

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 2.1 – Modelo de módulo de resiliência dependente da tensão desvio	10
Equação 2.2 – Modelo composto de módulo confinante	10
Equação 2.3 – Modelo composto de módulo de resiliência	10
Equação 2.4 – Modelo de Guimarães para estimativa da DP	13
Equação 2.5 – Modelo de Motta para estimativa da DP	14
Equação 2.6 – Influência das tensões na estimativa de DP	14
Equação 2.7 – Redução do número de ciclos	14
Equação 3.1 – Cálculo do parâmetro B de Skempton	37
Equação 3.2 – Cálculo da velocidade de cisalhamento pela BS 13777:1990	38

1. INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTO GERAL

A prática da engenharia geotécnica no Brasil é profundamente condicionada pela predominância de solos tropicais, cujo uso como material de construção e suporte apresenta desafios intrínsecos. Conforme destacado por Villibor et al. (2009), esses solos, em seu estado natural, são caracterizados por baixa capacidade de suporte, elevada deformabilidade e comportamento colapsível quando saturados sob carga, ainda que possuam boas condições de drenagem. Esse conjunto paradoxal de propriedades, associado a um alto potencial erosivo, requer a compactação desses materiais para aplicação direta em obras, frequentemente associada a adoção de técnicas de estabilização para garantir a segurança e a viabilidade técnica dos projetos.

A necessidade de estabilização é particularmente crítica no setor rodoviário, pilar estratégico da economia nacional. A malha viária brasileira apresenta uma grave deficiência de pavimentação, com apenas 12,4% de seus mais de 1,7 milhão de quilômetros sendo asfaltados, conforme dados da Confederação Nacional do Transporte - CNT (2024). As vias não pavimentadas, essenciais para o escoamento da produção agrícola em regiões interioranas, são submetidas a tráfego pesado e intempéries, o que demanda soluções eficazes de tratamento do subleito e da base. Neste cenário, técnicas de estabilização de solos emergem como uma alternativa técnica e econômica vital, conforme destacado por Malko (2015), Rocha e Rezende (2017), Ohadian et al. (2024), Kadlobicki et al. (2024).

Em contraponto a métodos tradicionais de estabilização, associados a custos elevados de transporte e elevada emissão de CO₂ em sua produção (SHUKLA et al., 2024), os aditivos enzimáticos patenteados surgem como uma tecnologia promissora. Embora seu uso ainda seja limitado frente às soluções convencionais em escala global, esse mercado experimenta um crescimento acelerado, impulsionado pelo desenvolvimento de formulações comerciais e por um setor em franca expansão (VERMA et al., 2021; MEKONNEN et al., 2020)

As principais vantagens atribuídas a esses estabilizantes são sua natureza orgânica, biodegradável e não tóxica. Seu mecanismo de ação envolve a modificação das interações entre partículas do solo através da neutralização de cargas superficiais e da reorganização da microestrutura, resultando em melhorias nas propriedades geotécnicas (RENJITH et al., 2020; BERIHA; SAHOO, 2022; O'DONNELL et al., 2023; KHANNA et al., 2024).

Apesar do sigilo industrial sobre as formulações, que limita a compreensão detalhada dos mecanismos, estudos independentes têm reportado ganhos significativos no comportamento mecânico e durabilidade (KUSHWAHA et al., 2018; POONI et al., 2019; KHANNA et al., 2022). Ainda assim, são escassos na literatura global estudos que investiguem a aplicação em solos tropicais argilosos, que avaliem a influência da umidade pós-cura, e que se proponham a investigar o comportamento mecânico para além da resistência à compressão simples.

Diante desse contexto, este estudo investiga a aplicação de estabilizante enzimático em solo tropical para fins geotécnicos, evidenciando seus potenciais e limitações frente a solicitações monotônicas e cíclicas, com o objetivo de aprimorar o comportamento mecânico de solos tropicais argilosos e contribuir para a mitigação de impactos ambientais.

1.2 OBJETIVOS

O objetivo geral desta pesquisa é entender o efeito da estabilização enzimática no comportamento mecânico de um solo tropical argiloso para aplicações em obras de terra e pavimentação. Para atingir esse fim, se estabelecem como objetivos específicos:

- a) Entender as características físico-químicas-mineralógicas do solo e enzima e seus reflexos nas interações entre os materiais;
- b) Estudar a influência de diferentes teores de dosagem da enzima no solo, a partir de ensaios de resistência à compressão simples para distintos períodos de cura e condições de saturação na ruptura;
- c) Analisar o impacto da estabilização enzimática em solicitações monotônicas, a partir de ensaios triaxiais drenados, considerando o solo puro compactado e os teores de 0,5% e 8,55% de enzima, com 7 dias de período de cura;
- d) Avaliar o efeito da enzima na deformação recuperável, plástico e desgaste superficial a partir de ensaios de módulo de resiliência, deformação permanente, CBR e LWT – *Loaded Wheel Tracker*, nos teores de 0,5% e 8,55% de enzima, com 7 dias de período de cura;
- e) Compreender as alterações microestruturais do solo com e sem a presença do estabilizante enzimático, mediante ensaios de porosimetria por intrusão de mercúrio (PIM) e microscopia eletrônica de varredura (MEV).

1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Este trabalho está estruturado em cinco seções principais, organizadas de forma a conduzir o leitor desde a contextualização do tema até a análise dos resultados e a apresentação das conclusões finais.

No Capítulo 1 - Introdução, é apresentado o contexto geral da pesquisa, destacando a relevância da estabilização de solos tropicais para aplicações geotécnicas e rodoviárias. Nessa seção são definidos o objetivo geral e os objetivos específicos do estudo, bem como a motivação científica e técnica que fundamenta o desenvolvimento da pesquisa.

O Capítulo 2 - Fundamentação Teórica reúne os principais conceitos necessários à compreensão do tema abordado. São discutidos os aspectos relacionados aos solos tropicais e lateríticos, os fundamentos da pavimentação, com ênfase no módulo de resiliência e na deformação permanente, além dos princípios e mecanismos associados à estabilização de solos, com destaque para a estabilização enzimática.

O Capítulo 3 - Metodologia, são descritos os materiais utilizados, os critérios de dosagem da solução enzimática, os procedimentos de preparação e moldagem dos corpos de prova e os métodos experimentais adotados. Apresentam-se, ainda, as normas técnicas seguidas e os equipamentos empregados nos ensaios de caracterização física, química, mineralógica, térmica e mecânica.

O Capítulo 4 - Resultados e Análises contempla a apresentação, interpretação e discussão dos resultados obtidos nos ensaios realizados. São analisados os resultados de caracterização do solo e da enzima, os ensaios de resistência à compressão simples, os ensaios triaxiais estáticos, os ensaios sob carregamento repetido (módulo de resiliência e deformação permanente), bem como os ensaios empíricos complementares aplicados à pavimentação, com discussão fundamentada na literatura técnica.

Por fim, o Capítulo 5 - Conclusões apresenta as principais conclusões do estudo, relacionando os resultados obtidos aos objetivos propostos, além de apontar as limitações identificadas e sugestões para trabalhos futuros.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A fundamentação teórica deste trabalho está estruturada de modo a contextualizar os principais conceitos relacionados às aplicações geotécnicas abordadas. Inicialmente, são apresentados os aspectos gerais dos solos tropicais e seus sistemas de classificação, com ênfase nos solos lateríticos, destacando suas particularidades geotécnicas. Em seguida, são discutidos os fundamentos da pavimentação, com foco no comportamento mecânico dos materiais constituintes das camadas do pavimento. Posteriormente, são abordados os conceitos relacionados ao módulo de resiliência e à deformação permanente, parâmetros essenciais para a avaliação do desempenho dos solos sob carregamento repetido. Por fim, são apresentados os princípios da estabilização de solos, com destaque para a estabilização enzimática e sua aplicação na melhoria do comportamento mecânico dos solos.

2.1 SOLOS TROPICAIS E SUA CLASSIFICAÇÃO

O solo é um material natural derivado da decomposição das rochas, resultante da ação intempérica de agentes físicos, químicos e biológicos. Esse processo origina um sistema trifásico, composto pelas fases sólida, líquida e gasosa, sendo a fase sólida formada por partículas e grãos, a fase líquida constituída principalmente por água, e a fase gasosa, predominantemente composta por ar, ocupando os espaços vazios entre as partículas sólidas.

A identificação e classificação do solo desempenham um papel crucial na engenharia, sendo essencial agrupar os solos em categorias com características semelhantes. Esse processo permite uma abordagem mais eficiente para a escolha de técnicas adequadas para o uso do solo, garantindo mais segurança e a eficácia nas obras.

Os sistemas de classificação tradicionalmente utilizados na engenharia geotécnica são o Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS), conforme descrito na norma americana ASTM D 2487:2017, e a *American Association of State Highway and Transportation Officials* (AASHTO) para fins rodoviários, desenvolvida pelo *Highway Research Board* (HRB), conforme a norma americana ASTM D 3282:2015.

Contudo, as classificações geotécnicas tradicionais foram desenvolvidas em países de clima temperado, sendo fundamentadas em características físicas, com base nos limites de Atterberg e na composição granulométrica dos solos. Porém, ao longo dos anos, observou-se que essas classificações apresentavam limitações e incompatibilidades ao serem aplicadas em

solos de regiões tropicais, especialmente em relação ao seu comportamento geotécnico em campo (GUIMARÃES et al., 2019).

Em regiões de clima tropical úmido, como o Brasil, Índia e no continente africano, os processos geológicos e pedológicos intensificados pelo intemperismo promovem a formação de solos tropicais (VILLIBOR et al., 2009).

A formação dos solos tropicais por meio da ação do intemperismo resulta em um conjunto de transformações físicas e químicas que envolvem processos de desintegração e decomposição mineral, os quais modificam significativamente as propriedades e a estrutura do solo, influenciando diretamente seu comportamento hidromecânico (LOPERA, 2016). A predominância dos mecanismos físicos ou químicos do intemperismo está associada às condições ambientais, como temperatura, disponibilidade de água, circulação de ar e variações de pressão. Em regiões tropicais, observa-se a dominância do intemperismo químico, no qual a água exerce papel fundamental ao promover reações como hidrólise, lixiviação, oxidação e processos de acumulação, responsáveis pela transformação mineralógica e estrutural do solo, culminando na formação dos solos lateríticos.

Nesse contexto, o intemperismo químico favorece a remoção progressiva de bases alcalinas e alcalino-terrosas, como potássio, magnésio, sódio e cálcio, enquanto permanecem e se concentram componentes ricos em alumínio, ferro e sílica. Parte dos materiais lixiviados pode se depositar em camadas inferiores, ao passo que os minerais remanescentes sofrem alterações estruturais, promovendo a cimentação entre partículas e argilominerais e a formação de agregados (ARAÚJO, 2022)

Como resultado da intensidade e duração da atuação desses processos, desenvolvem-se solos classificados em lateríticos e saprolíticos. Enquanto os solos saprolíticos conservam estruturas da rocha original e contêm argilominerais primários do tipo 2:1, os quais podem apresentar alta expansibilidade (CARVALHO et al. , 2015), os solos lateríticos são produto de forte intemperismo na camada superficial do subsolo, sendo marcados por altos teores de óxi-hidróxidos de alumínio e ferro, e argilominerais do tipo 1:1, como a caulinita, além da presença de quartzo, devido a elevada resistência desse mineral ao processo de intemperismo químico (VILLIBOR et al. , 2009).

A classificação correta desses solos é essencial, especialmente para aplicações na pavimentação, visto que envolvem a mobilização de serviços em distintas formações geológicas

e elevados volume de materiais. No entanto, quando avaliados por sistemas convencionais como o AASHTO, muitos solos tropicais são erroneamente classificados como materiais de baixo desempenho (SANTOS et al., 2016). Para contornar essa limitação, Nogami e Villibor (1996) propuseram a metodologia MCT (Miniatura, Compactado, Tropical), que se baseia em parâmetros mecânicos e hidráulicos específicos dos solos tropicais. Essa abordagem tem demonstrado maior eficácia na identificação do potencial desses materiais, revelando que muitos solos anteriormente reprovados pelas classificações geotécnicas tradicionais podem ser tecnicamente viáveis para uso em pavimentação.

A metodologia MCT, diferentemente das abordagens tradicionais, aplica-se a solos que passam integralmente na peneira de 2,0 mm e considera a estrutura compactada, sendo aplicada a partir de ensaios de compactação no Mini-MCV e perda de massa por imersão (RODRIGUES et al., 2024).

2.1.1 SOLOS LATERÍTICOS

Casanova (1988) define solo tropical como aquele cuja mineralogia é predominantemente composta por argilominerais do tipo 1:1, óxidos livres e sílica na forma de quartzo, podendo ocorrer pequenas quantidades de material paracristalino. Esses minerais apresentam carga superficial variável, dependente do pH, o que resulta em baixos valores de superfície específica, capacidade de troca catiônica e densidade superficial de carga.

Os sistemas lateríticos são resultantes do processo de laterização e dão origem aos solos lateríticos amplamente empregados em obras de Engenharia Civil. Esses solos caracterizam-se por um elevado grau de alteração dos minerais da rocha de origem, com remoção quase completa de bases alcalinas e alcalino-terrosas, além da lixiviação parcial da sílica e da intensa decomposição da matéria orgânica. Como consequência desse processo, observa-se a acumulação significativa de hidróxidos e óxidos de ferro, alumínio, titânio e manganês, podendo ainda ocorrer, em diferentes intensidades, processos secundários como lixiviação adicional, acúmulo de matéria orgânica e endurecimento do material (Rodrigues et al., 2024).

Nesse sentido, Villibor e Alves (2019) indicam que os solos lateríticos correspondem às camadas mais superficiais do subsolo em regiões bem drenadas, situadas acima do lençol freático. Caracterizam-se pela elevada homogeneidade e coloração típica, variando entre tons avermelhados, alaranjados e amarelados, formando geralmente um capeamento contínuo sobre as camadas subjacentes.

Do ponto de vista mineralógico, esses solos apresentam predominância de minerais resistentes ao intemperismo tropical. A fração areia é constituída principalmente por quartzo e outros minerais estáveis, enquanto a fração pedregulho pode conter concreções ferruginosas ou aluminosa, conhecidas como lateritas. A fração argila é formada essencialmente por argilominerais do grupo da família da caulinita e por óxidos hidratados de ferro e/ou alumínio, responsáveis pela microestrutura porosa característica desses materiais, assemelhando-se a uma microestrutura do tipo pipoca. A Figura 2.1 demonstra dois solos classificados pelo sistema AASHTO como A-2-6, evidenciando diferenças significativas tanto do ponto de vista químico-mineralógico quanto estrutural.

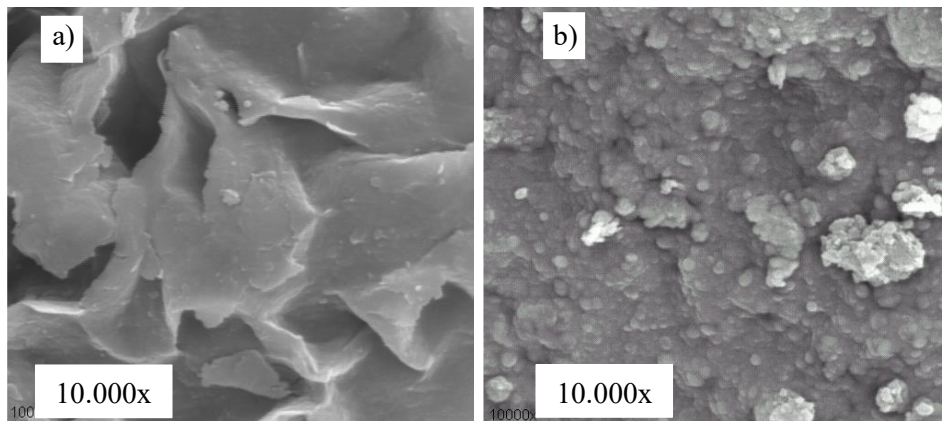


Figura 2.1 - Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) em solo: a) Solo não laterítico; b) Solo laterítico (Santos, 2006)

Dessa forma, em solos lateríticos, espera-se a observação de imagens com aspecto mais cimentado, conforme apresentado acima, enquanto nos solos não lateríticos é possível identificar com maior nitidez o contorno dos argilominerais que compõem a fração fina, apresentando uma morfologia distinta daquela observada nos solos lateríticos, conforme descrito por Takeda (2006). Além disso, devido à cimentação que existe entre os elementos, e a consequente formação de torrões, a granulometria resultante dos ensaios pode indicar elevada porcentagem de grãos maiores nas frações silte e areia (DELGADO, 2007).

Dado que os solos tropicais bem evoluídos compõem a camada mais superficial do perfil estratigráfico, a qual é frequentemente utilizada em obras rodoviárias, e que esses projetos envolvem elevado volume de material, discorre-se na sequência conceitos fundamentais de pavimentação e mecânica dos pavimentos aplicada a solos.

2.2 PAVIMENTAÇÃO

Historicamente, o Brasil consolidou o transporte rodoviário como o principal e mais abrangente modal logístico do país. A partir da década de 1950, esse predomínio foi impulsionado pelo fortalecimento da indústria automobilística e pela implementação de políticas públicas de incentivo e subsídios direcionadas ao setor (CNT, 2013). De acordo com o Boletim Estatístico (CNT, 2024), o transporte rodoviário é responsável por aproximadamente 65% da movimentação de cargas e por cerca de 95% do transporte de passageiros em território nacional.

Quanto à classificação das rodovias com base no tipo de revestimento, de acordo com a norma DNIT-ES 445/2023 essas são classificadas em rodovias com revestimento primário à medida que apresentam uma camada de material selecionado e/ou estabilizado aplicada sobre o subleito ou como reforço estrutural da via, rodovias não pavimentadas quando caracterizadas por superfícies de rolamento constituídas por solo natural ou material granular, sem qualquer tipo de revestimento técnico e rodovias pavimentadas, quando são constituídas por superfície de rolamento que recebeu revestimento contínuo de material resistente, como concreto asfáltico ou cimento Portland.

2.1.1 MÓDULO DE RESILIÊNCIA

Na Mecânica dos Pavimentos, o Módulo de Resiliência (MR) é definido como a relação entre a tensão cíclica aplicada e a deformação elástica, ou recuperável, desenvolvida pelo material. Esse parâmetro caracteriza o comportamento elástico de materiais como solos e agregados sob carregamentos repetidos, seja em condições laboratoriais controladas, seja em decorrência das ações sucessivas das cargas veiculares atuantes sobre a estrutura do pavimento. O MR constitui uma propriedade fundamental nos métodos mecanístico-empíricos de dimensionamento de pavimentos asfálticos, por permitir a representação mais realista do comportamento dos materiais ao longo da vida útil da via. Os efeitos dessas deformações repetidas refletem-se, sobretudo, nos revestimentos asfálticos, manifestando-se sob a forma de trincamentos, frequentemente de maneira prematura (RODRIGUES et al., 2024). A determinação do módulo de resiliência é realizada por meio de ensaios triaxiais de carga repetida em ciclos dinâmicos de carga e descarga, cujo objetivo é reproduzir, em laboratório, as condições de carregamento impostas pelo tráfego à estrutura do pavimento em campo, conforme exemplificado na Figura 2.2.

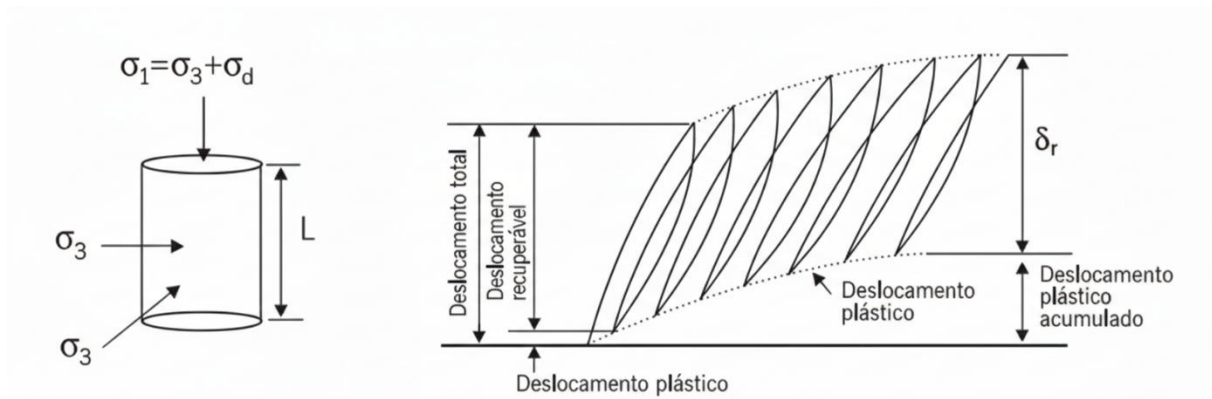


Figura 2.2 - Tensões aplicadas e deslocamentos no ensaio triaxial cíclico (Adaptado de Bernucci et al., 2006).

A compreensão da estrutura do pavimento como um sistema multicamadas, no qual cada camada apresenta propriedades elásticas próprias e responde à aplicação de cargas repetidas e dinâmicas, reforça a necessidade da adoção de metodologias de análise que considerem explicitamente essas características (MARANGON, 2004).

Conforme apresentado por Medina e Motta (2015) o módulo de resiliência é influenciado por diversos fatores, tais como a natureza do material, incluindo sua constituição mineralógica, textura e plasticidade da fração fina, além das condições de umidade, densidade e do estado de tensões atuante.

Mantidos constantes os demais parâmetros, o MR de um determinado solo depende do estado de tensões aplicadas, isto é, está relacionado à tensão desviadora (σ_d) e tensão confinante (σ_3), apresentando comportamentos distintos entre os solos considerados coesivos e granulares. Isso ocorre devido aos campos eletromagnéticos entre as partículas dos solos finos coesivos são vencidos por deformações cisalhantes, desse modo, a tensão de desvio é mais significativa. Da mesma forma, com o aumento das deformações volumétricas, aumenta o atrito entre as partículas nos solos granulares, explicando o aumento de MR com a tensão confinante. (GUIMARÃES, 2009).

A literatura apresenta diferentes modelos destinados a correlacionar as tensões aplicadas ao cálculo do módulo de resiliência dos solos, cujos parâmetros são obtidos a partir de ajustes experimentais. Entretanto, não há modelos que possam ser considerados intrínsecos ao comportamento do solo, uma vez que um mesmo conjunto de dados pode ser adequadamente representado por distintas formulações matemáticas, desde que os coeficientes de ajuste sejam convenientemente calibrados para o material e para as condições do ensaio considerados

(MEDINA e MOTTA, 2015). No caso de solos finos, utilizado nessa pesquisa, pesquisas indicam que o módulo depende majoritariamente da tensão desvio, Svenson (1980) apresenta um modelo desenvolvido em função da tensão desvio, apresentado na Equação 2.1.

$$MR = k_1 \sigma_d^{k_2} \quad (2.1)$$

Para solos granulares, o módulo depende sobretudo da tensão confinante, o qual cresce conforme o acréscimo da confinante, apresentado na Equação 2.2.

$$MR = k_1 \sigma_3^{k_2} \quad (2.2)$$

Ainda, nesse contexto, Macêdo (1996), demonstrou que, sob o ponto de vista estatístico, o modelo que considera as tensões desvio e confinante simultaneamente, apresentado na Equação 2.3 e denominado de modelo composto.

$$MR = k_1 \sigma_3^{k_2} \sigma_d^{k_2} \quad (2.3)$$

Onde: MR: módulo de resiliência, em MPa; σ_3 : tensão confinante, em MPa; σ_d : tensão desvio aplicada repetidamente, em MPa; k_1 , k_2 e k_3 : coeficientes de regressão.

Com relação a aplicação em solos lateríticos, Bernucci (1995) destaca que a natureza mineralógica exerce influência favorável sobre o comportamento resiliente, uma vez que os óxidos hidratados de ferro e de alumínio atuam como agentes cimentantes, promovendo maior resistência e estabilidade estrutural e, conseqüentemente, resultando em menor deformabilidade resiliente, expressa por valores mais elevados de módulo de resiliência.

2.1.2 DEFORMAÇÃO PERMANENTE

A deformação permanente corresponde ao acúmulo de deformações irreversíveis ao longo da aplicação de carregamentos repetidos, representando a tendência do material à consolidação progressiva e ao desenvolvimento de deformações residuais (DNIT 179, 2018). Nos pavimentos, esse mecanismo manifesta-se principalmente por meio do afundamento localizado, conhecido como trilha de roda, observado com maior intensidade em regiões submetidas a elevadas solicitações. A deformação permanente pode ter origem tanto no revestimento asfáltico, em decorrência da fluência da mistura, quanto nas camadas de base,

associada ao cisalhamento do material granular, à densificação da camada e/ou ao dano das partículas constituintes (DAWSON et al., 2004)

Lekarp e Dawson (1998) observaram que os corpos de prova tendem a apresentar estabilização da taxa de deformação permanente quando submetidos a baixos níveis de tensão, condição na qual o material passa a exibir um comportamento predominantemente resiliente. Isso foi relatado por Guimarães (2001), em que o carregamento cíclico pode conduzir o solo a dois comportamentos distintos: a ruptura por acúmulo excessivo de deformação plástica ou a tendência à estabilização da deformação permanente. Quando essa estabilização ocorre após a aplicação de um determinado número de ciclos de carga, geralmente superior a 100.000 repetições, o fenômeno é denominado *shakedown* ou acomodamento.

A teoria do *shakedown* foi originalmente desenvolvida para materiais metálicos submetidos a cargas rolantes e aplicada pela primeira vez ao estudo de pavimentos por Sharp e Booker (1984). Posteriormente, sua utilização foi ampliada no âmbito da engenharia de pavimentos, com destaque para pesquisas desenvolvidas na Inglaterra. No Brasil, um dos primeiros estudos a investigar a aplicabilidade do conceito de *shakedown* a solos utilizados em pavimentação rodoviária foi conduzido por Guimarães (2001), com aprofundamentos posteriores em Guimarães (2009).

De acordo com Guimarães (2009), na teoria do *shakedown*, tem-se que um material ou uma estrutura de pavimento que, estando na condição de *shakedown*, mantém constante a deformação permanente acumulada quando submetido à ação de cargas repetidas, ou seja, se acomoda em relação à deformação permanente. A condição de acomodamento das deformações plásticas está diretamente associada ao surgimento de tensões residuais, mais precisamente a um campo auto equilibrado de tensões residuais que surge em materiais submetidos à ação de cargas repetidas, e que passa a interagir com o carregamento aplicado. As tensões residuais tendem a aumentar ao longo do tempo, diminuindo o efeito da carga aplicada em cada ciclo de carregamento, até que a tensão atuante no material não atinja a condição de escoamento plástico e o material apresente apenas deformações elásticas.

Para a avaliação do acomodamento, a norma DNIT 179 (2018) adota como critério limite uma taxa de deformação permanente da ordem de 10^{-7} metros por ciclo de carga. A partir desse critério, são definidos diferentes tipos de comportamento, representados em gráficos que relacionam a deformação permanente acumulada à taxa de acréscimo da deformação

permanente por ciclo de carga, apresentados em escala logarítmica, conforme ilustrado na Figura 2.3.

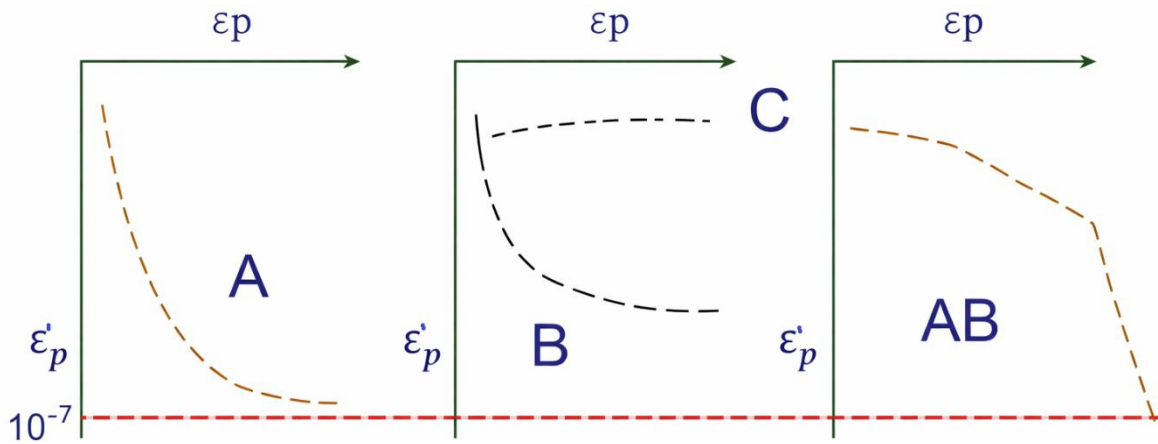


Figura 2.3 - Modelos de comportamento a deformação permanente de solos (Adaptado de DNIT-IE 179, 2018)

De modo geral, o comportamento do tipo A (*plastic shakedown*) é caracterizado por baixos valores de deformação permanente acumulada e por uma reduzida taxa de acréscimo, indicando que, nesse estado de tensões, o material apresenta contribuição limitada para os afundamentos do pavimento. O tipo B (*plastic creep*) corresponde a um comportamento em que a deformação permanente aumenta de forma progressiva, embora associada a uma taxa de crescimento baixa e aproximadamente constante ao longo dos ciclos de carga. Já o tipo C (*incremental collapse*) representa a condição mais crítica, na qual, mesmo para um número reduzido de ciclos, ocorre acentuada redução da deformação elástica e acúmulo sucessivo de deformação plástica a cada aplicação de carga, podendo resultar em afundamentos excessivos em trilha de roda (ATR) e, eventualmente, na ruptura do pavimento. Por fim, o comportamento do tipo AB corresponde a uma situação intermediária, na qual o material tende ao comportamento do tipo *plastic shakedown*, porém apresentando uma maior magnitude inicial de deformação permanente acumulada (GUIMARÃES, 2001; DE LIMA et al., 2021; JOSE et al., 2022; RODRIGUES et al., 2024).

A avaliação da resistência dos materiais à deformação permanente (DP) desempenha papel essencial no processo de escolha de materiais e no dimensionamento de estruturas mais duráveis. Ao longo dos anos, diversos modelos têm sido desenvolvidos com a finalidade de estimar a DP a partir de variáveis representativas do comportamento mecânico, como o número de ciclos de carregamento, as tensões confinante e desviadora, além de parâmetros associados às condições de compactação e características físicas dos materiais. Nesse contexto, o modelo

apresentado por Guimarães (2009) destaca-se por sua aplicabilidade à previsão do comportamento de materiais empregados em obras de infraestrutura no Brasil.

O modelo é expresso pela Equação 2.4 e relaciona a deformação permanente específica (ε_p) às tensões atuantes e ao nível de tráfego. A tensão confinante (σ_3) e a tensão desviadora (σ_d) são normalizadas pela pressão atmosférica (p_0), adotada como valor de referência, enquanto o efeito do tráfego é representado pelo número de ciclos de carregamento (N). A calibração do modelo é realizada individualmente para cada material por meio da determinação de quatro parâmetros empíricos (ψ_1 , ψ_2 , ψ_3 e ψ_4), obtidos a partir de resultados experimentais de ensaios de deformação permanente, empregando-se técnicas de regressão não linear.

$$\varepsilon_p(\%) = \psi_1 \times \left(\frac{\sigma_3}{P_0}\right)^{\psi_2} \times \left(\frac{\sigma_d}{P_0}\right)^{\psi_3} \times N^{\psi_4} \quad (2.4)$$

Ainda, Mota et al. (2024; 2026) apresentaram um novo método para a caracterização da deformação permanente (DP) de solos e materiais granulares, denominado PD-S, propõe-se uma otimização significativa dos ensaios laboratoriais ao utilizar o conceito de curvas mestras. Diferente da prática convencional no Brasil (norma DNIT 179/2018), que exige a aplicação de pelo menos 150.000 ciclos de carga para cada um dos nove pares de tensão, o modelo PD S baseia-se no princípio da superposição entre o ciclo de carga e a magnitude da tensão, apresentado na Equação 2.5.

Essa abordagem utiliza fatores de deslocamento (*Shift Factors*) para transpor as curvas de diferentes estados de tensão para um par de referência, criando uma curva única e contínua em um espaço de ciclos reduzidos (N_{red}), conforme apresentado na Equação 2.6. O modelo introduz o parâmetro S, conforme Equação 2.7, que captura a influência da tensão de confinamento e da relação entre as tensões desviatória e de confinamento no comportamento plástico do material. A grande inovação consiste na redução do número de ciclos para apenas 10.000 nos pares iniciais, mantendo 150.000 ciclos apenas para o estado de tensão mais severo (como o par 120/360 kPa), além da eliminação de pares de tensão redundantes que geravam sobreposições desnecessárias de dados. Validações realizadas pelos autores, com técnicas de inteligência artificial, como *Random Forest*, e análises de *shakedown* demonstraram que os dados de 10.000 ciclos possuem uma correlação extremamente alta ($R^2 > 0,98$) com os resultados de 150.000 ciclos, permitindo prever o afundamento em trilha de roda com uma diferença de precisão de apenas 5% a 10%. Na prática, essa metodologia promove uma

economia de cerca de 70% no tempo de laboratório, reduzindo o período de ensaio de aproximadamente dez para apenas três dias úteis, sem comprometer a acurácia necessária para o dimensionamento de pavimentos em softwares como o MeDiNa.

$$PD - S = a_1 \times S^{a_2} \times N^{a_3} \quad (2.5)$$

$$S = \left(\frac{\sigma_3}{0,4}\right)^{s_1} \times \left(\frac{\sigma_d}{\sigma_3}\right)^{s_2} \quad (2.6)$$

$$N_{red} = N \times SF \quad (2.7)$$

Onde: σ_3 e σ_d representam, respectivamente, a tensão confinante e desviadora, ambas em kgf/cm²; N é o número de ciclos realizados; s_1 e s_2 são coeficientes que definem a dependência da tensão no parâmetro S; a_1 , a_2 e a_3 são coeficiente do modelo PD-S; SF é o fator de deslocamento (*Shift Factor*), utilizado para transformar o número de ciclos em um valor reduzido equivalente.

Segundo os autores do modelo, os coeficientes s_1 , s_2 , a_1 , a_2 e a_3 são obtidos por meio de um processo iterativo de otimização, cujo objetivo é minimizar o erro quadrático médio entre os valores experimentais de deformação permanente (PD) e aqueles estimados pelo modelo. O método PD-S adota um procedimento análogo ao empregado na construção de curvas mestras para materiais asfálticos, no qual se define uma condição de referência para unificação dos resultados experimentais. Neste estudo, seleciona-se um par de tensões de referência (40x120 kPa) conforme adotado pelos autores, enquanto os demais pares de tensões são ajustados por meio de Fatores de Deslocamento (*Shift Factors*). A aplicação desses fatores possibilita a obtenção de uma curva mestra única, permitindo a previsão da deformação permanente para diferentes condições de carregamento a partir de um número reduzido de ciclos, sem prejuízo da precisão do modelo.

2.2 ESTABILIZAÇÃO DO SOLO

Segundo Rodrigues et al. (2024), a estabilização de solos é uma prática consolidada na engenharia geotécnica, com aplicação histórica em diversas obras de infraestrutura. Trata-se de um conjunto de técnicas que visam modificar as propriedades do solo, tornando-o compatível com os requisitos específicos de utilização na construção civil.

Ainda segundo o autor, as principais formas de estabilização do solo são a estabilização mecânica, física e química. A estabilização mecânica consiste na compactação do solo com o objetivo de aumentar sua densidade, melhorar sua resistência mecânica e reduzir tanto a permeabilidade quanto a porosidade. A estabilização física, por sua vez, refere-se à alteração das características do solo por meio da modificação de sua textura, especialmente através da correção granulométrica. Já a estabilização química envolve a adição de agentes estabilizantes que promovem alterações nas propriedades físico-químicas do solo, seja por meio de reações químicas, como a formação de produtos cimentantes, seja pela formação de matrizes ligantes que envolvem e unem as partículas do solo.

Além dessas abordagens, a partir da década de 1950, iniciaram-se investigações mais sistemáticas sobre o uso de compostos químicos para estabilização, motivadas por referências anteriores e experimentos realizados que utilizaram melaço de cana-de-açúcar como ligante em estradas (BRAZETTI, 1998).

Esses estudos abriram caminho para uma distinção inicial entre dois grandes grupos de estabilizantes: os compostos orgânicos, derivados de organismos vivos, que deram origem a produtos como os estabilizantes enzimáticos; e os compostos inorgânicos, de origem mineral, amplamente utilizados na forma de cal, cimento e escórias industriais (BRAZETTI, 1998; MALKO, 2015), descritos anteriormente como estabilizantes químicos.

Na pavimentação, a aplicação de estabilizantes configura-se como uma técnica fundamental, uma vez que, o solo compõe diversas camadas da estrutura do pavimento, como o subleito, a sub-base, podendo ainda integrar a base e, no caso de estradas não pavimentadas, o revestimento primário. Nesse contexto, a estabilização do solo torna-se indispensável para que o material adquira capacidade de suportar os esforços e carregamentos gerados pelo tráfego, além de melhorar sua resistência ao desgaste ao longo do tempo (RODRIGUES et al., 2024).

2.2.1 ESTABILIZANTE ENZIMÁTICO

Segundo O'Donnell et al. (2023), as enzimas são macromoléculas de natureza biológica responsáveis por acelerar reações bioquímicas específicas, podendo estar associadas tanto a ribozimas, que correspondem a moléculas de RNA com atividade catalítica, quanto a proteínas com função enzimática. Sua atuação envolve modificações nas ligações químicas, incluindo processos de formação e ruptura. No contexto da estabilização de solos, esse mecanismo possibilita a interação entre a enzima e cepas bacterianas presentes no produto aplicado,

reproduzindo, de forma análoga, o processo natural observado na construção de cupinzeiros (POONI et al., 2019). Os estabilizantes enzimáticos têm se tornado objeto de interesse por parte dos pesquisadores devido às suas vantagens, como biodegradabilidade, não toxicidade, ausência de corrosividade e facilidade de manuseio (EUJINE et al., 2017).

O uso de enzimas teve início em aplicações agrícolas, com o propósito de corrigir o pH do solo, elevar o teor de matéria orgânica e de nutrientes e, assim, potencializar a produtividade (MUGUDA e NAGARAJ, 2019). Posteriormente, essas substâncias passaram a ser aplicadas na engenharia geotécnica, sendo amplamente empregadas para aprimorar o desempenho dos solos utilizados na construção de estradas não pavimentadas.

Atualmente, diversos estabilizantes enzimáticos encontram-se disponíveis comercialmente e vêm sendo amplamente estudados quanto ao seu desempenho quando incorporados ao solo. Entre os produtos mais utilizados em pesquisas destacam-se o TerraZyme (AGARWAL E KAUR, 2014; KHANNA et al., 2022; MALKO et al., 2015), o PermaZyme (MALKO et al., 2015; SHARMA E KHANDELWAL, 2024), o EMC2 (BRAZETTI, 1998; MALKO et al., 2015) e o EkoSoil (KUSHWAHA et al., 2018; RENJITH et al., 2020).

Embora alguns fabricantes incentivem a utilização de seus produtos enzimáticos em investigações experimentais, é comum que imponham restrições à realização de análises químicas detalhadas, motivadas pelo receio de exposição ou violação dos direitos proprietários associados às formulações comerciais.

Essas restrições decorrem do fato de que a composição dos estabilizantes enzimáticos envolve combinações específicas de enzimas, surfactantes e aditivos orgânicos, cuja proporção e natureza química constituem o diferencial tecnológico do produto. Soma-se a esse cenário a incorporação de aditivos químicos aos produtos enzimáticos, dificultando a diferenciação entre a resposta devido a ação enzimática e devido a aditivização. Essa limitação, além de impedir o conhecimento químico detalhado desses produtos, dificulta a realização de estudos mais aprofundados sobre sua eficácia e os mecanismos que regem sua atuação.

Além disso, segundo Li et al. (2025) a identificação laboratorial de determinados componentes bioquímicos das enzimas é, por si só, tecnicamente complexa. Muitas dessas substâncias encontram-se presentes em baixas concentrações, são altamente seletivas em sua atuação ou apresentam estruturas moleculares que dificultam sua detecção por métodos analíticos convencionais. Nesse contexto, a ausência de evidências de determinadas reações

catalíticas em ensaios laboratoriais não pode ser interpretada, de forma direta, como a inexistência de atividade enzimática no produto.

Conforme discutido por Marasteanu et al. (2005) o fato de um estabilizante enzimático não catalisar a degradação de determinados compostos durante um ensaio específico não implica necessariamente na ausência de enzimas ativas na amostra. Isso ocorre porque as bioenzimas são, em geral, soluções altamente purificadas, contendo enzimas específicas ou grupos enzimáticos direcionados a substratos particulares. Dessa forma, caso o substrato adequado não esteja presente no ensaio, ou as condições físico-químicas não sejam favoráveis (pH, temperatura, umidade ou meio reacional), a atividade catalítica pode não ser detectada.

Assim, a combinação entre segredo industrial, complexidade analítica e alta seletividade das enzimas contribui para a dificuldade de caracterização química desses produtos, limitando a compreensão completa de seus mecanismos de atuação e reforçando a necessidade de abordagens experimentais complementares, baseadas no comportamento mecânico e microestrutural dos solos estabilizados.

Apesar da existência de diversos estudos que comprovam a eficácia e o potencial da estabilização enzimática, ainda não há um consenso universal sobre o real mecanismo de ação das enzimas em campo. Isso ocorre porque as reações necessárias para sua ativação variam conforme a formulação química do produto enzimático e as condições específicas do solo e do ambiente de aplicação.

De maneira geral, a literatura indica que os efeitos da estabilização enzimática podem ser interpretados a partir de três classes principais de mecanismos, que não são mutuamente exclusivos e podem atuar de forma simultânea, dependendo da formulação do produto e das características do solo. Em conjunto, esses mecanismos reduzem a afinidade do solo por água, favorecem a densificação e contribuem para a estabilização do material. Embora funcionalmente semelhantes em seus efeitos finais (LI et al., 2025).

O primeiro mecanismo está relacionado a processos de troca catiônica, nos quais a presença da enzima ou de seus constituintes favorece alterações nas cargas superficiais das partículas argilosas. Esse processo conduz à redução da espessura da dupla camada elétrica, limitando a entrada de água na estrutura cristalina da argila e diminuindo sua susceptibilidade à variação de umidade. Como consequência, ocorre uma maior estabilidade da microestrutura

do solo e uma redução do potencial de expansão (RAUCH et al., 2002; MGANGIRA, 2009; ABOUKHADRA et al., 2017; ZIDAN E GABER, 2018; POONI et al., 2021).

O segundo mecanismo proposto refere-se à ligação específica entre enzimas, compostos orgânicos e partículas de argila, resultando na neutralização parcial das cargas negativas superficiais. Essa interação favorece a aglomeração das partículas finas, promovendo rearranjos microestruturais que levam à redução do índice de vazios e ao aumento da densidade aparente do solo (KHAN E TAHA, 2015; CHANDLER et al., 2017; THOMAS et al., 2018).

Esse mecanismo foi inicialmente proposto por Scholen, (1992, 1995), que descreveu a ocorrência de uma reação de troca entre uma substância específica originada da combinação entre enzimas e moléculas orgânicas e a estrutura da argila. Como resultado, a dupla camada elétrica é desestabilizada, promovendo a expulsão de água e a agregação das partículas do solo, favorecendo processos de granulação e cimentação. Nesse contexto, as enzimas podem aderir tanto às regiões internas quanto externas dos minerais argilosos, dificultando a absorção de água.

O terceiro mecanismo está associado à ação surfactante de determinados componentes presentes nas formulações enzimáticas. A redução da tensão superficial da água promove a diminuição da sucção capilar e da espessura do filme de água adsorvida ao redor das partículas do solo, facilitando o contato partícula-partícula e contribuindo para uma estrutura mais densa e coesa. Esse efeito é particularmente relevante em solos finos, nos quais a água adsorvida desempenha papel fundamental no controle do comportamento mecânico (MARASTEANU et al., 2005; ABOUKHADRA et al., 2018).

Embora descritos separadamente, esses mecanismos conduzem, em última instância, a efeitos macroscópicos semelhantes, tais como a redução da afinidade do solo por água. O efeito descrito foi observado por Rauch et al. (2002) e é ilustrado na Figura 2.4. A análise da área de superfície específica, obtida por meio do método BET, evidenciou uma redução significativa na área superficial do solo tratado com enzima. Esse resultado indica uma maior aglomeração das partículas do solo em comparação ao solo em seu estado natural. A partir desse mecanismo, infere-se que o solo estabilizado com enzima apresenta uma diminuição no índice de vazios das amostras, uma vez que as partículas tendem a se ligar entre si, restringindo o espaço poroso existente entre elas (CHOUDALAKIS E GOTSIS, 2009; SCHOLEN, 1995; TINGLE et al. , 2007).

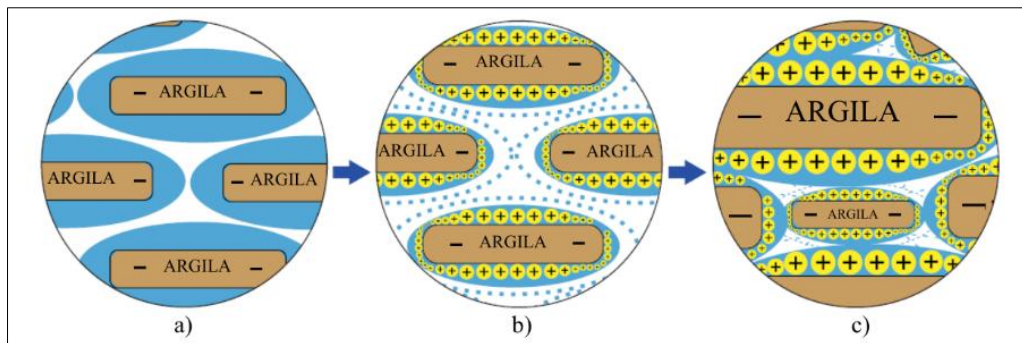


Figura 2.4 - Neutralização da enzima nas partículas de argila: a) Partículas de argila com alta afinidade por água; b) Partícula orgânica encapsulada diminuindo a dupla camada; c) Partículas de argilas estabilizadas (Modificado – Renjith et al. 2020).

Apesar disso, a contribuição relativa de cada mecanismo ainda é objeto de debate, uma vez que as formulações comerciais de estabilizantes enzimáticos frequentemente incluem surfactantes, compostos orgânicos e sais, além das enzimas propriamente ditas. Essa combinação dificulta a distinção entre os efeitos puramente enzimáticos e aqueles decorrentes da aditivação química.

Ainda, estudos indicam que diferentes bioenzimas podem apresentar composições semelhantes. Por exemplo, o Permazyme é constituído por um conjunto diversificado de enzimas, ingredientes proprietários e materiais orgânicos não especificados (LI et al., 2025). De forma semelhante, o Eko enzyme é um produto multienzimático que incorpora lipase, amilase e protease como constituintes ativos, sendo obtido a partir da extração de água e proteínas de plantas fermentadas (POONI et al., 2021). A composição típica do Eko enzyme inclui aproximadamente 20% de água, 20% de surfactantes não iônicos e 60% do ingrediente base fermentado, o qual contém cerca de 30% de água (RENJITH et al., 2020).

O TerraZyme, por sua vez, é composto por álcoois etoxilados, extratos vegetais fermentados e surfactantes não iônicos (KHAN E TAHA, 2015), sendo frequentemente descrito como um extrato à base de melaço (EIJINE et al., 2017a). Já o Earthzyme apresenta em sua composição extratos fermentados de polissacarídeos vegetais, cloreto de potássio, sulfato de magnésio, ácido láctico e surfactantes não iônicos (MGANGIRA, 2009; CHANDLER et al., 2017). Estudos laboratoriais adicionais indicam que tanto o Permazyme quanto o TerraZyme contêm proteínas e surfactantes não iônicos em suas formulações (ABOUKHADRA et al., 2018).

2.2.2 ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS COM ENZIMAS

Brazetti e Murphy (2000) apresentaram a aplicação do estabilizante enzimático comercial *TerraZyme* em diferentes tipos de solo, empregados em rodovias e estradas localizadas em diversos estados do Brasil. O produto foi utilizado em camadas de base e sub-base, tanto em vias pavimentadas quanto não pavimentadas. O desempenho das camadas estabilizadas foi acompanhado ao longo do tempo por meio do ensaio DCP - *Dynamic Cone Penetrometer*, sendo os resultados correlacionados com valores estimados de CBR - *California Bearing Ratio*. Com base nesse monitoramento, os autores concluíram que o uso do estabilizante proporcionou melhora na capacidade das camadas de solo em suportar a ação do tráfego rodoviário, contribuiu para a manutenção da integridade estrutural do pavimento, reduziu a perda de material por erosão e abrasão e mitigou o surgimento de ondulações e marcas de pneus na superfície. Embora o ensaio DCP seja relevante para a avaliação indireta da resistência e da deformação permanente associada ao afundamento, a abordagem adotada não contempla os parâmetros exigidos pela metodologia MeDiNa, a qual demanda ensaios específicos de módulo de resiliência e deformação permanente, além de uma modelagem mecanicista mais robusta.

Ravi Shankar et al. (2009) realizaram estudos laboratoriais na Índia utilizando solo laterítico estabilizado com *TerraZyme* para aplicações em pavimentação. Foram conduzidos ensaios de compressão simples, CBR e permeabilidade, considerando quatro diferentes dosagens do estabilizante (0,029; 0,0338; 0,0406 e 0,050 mL de enzima/kg de solo) e distintos períodos de cura, variando de uma a quatro semanas. Os resultados indicaram aumento superior a 100% nos valores de CBR já na menor dosagem, com crescimento progressivo à medida que o tempo de cura aumentava. Tendência semelhante foi observada nos ensaios de compressão simples, com elevação gradual da resistência, além de redução progressiva do coeficiente de permeabilidade dos compósitos estabilizados. Apesar da relevância dos resultados, o estudo limita-se a parâmetros empíricos de resistência, não contemplando ensaios capazes de caracterizar adequadamente a deformação permanente sob carregamentos repetidos. Adicionalmente, destaca-se a ausência de uma etapa de imersão nos ensaios de compressão simples, aspecto particularmente relevante considerando as condições climáticas tropicais da região estudada.

AbouKhadra et al. (2018) avaliaram experimentalmente a eficácia da estabilização de solos por meio dos aditivos enzimáticos comerciais *TerraZyme* e *PermaZyme* em diferentes solos egípcios, com foco na melhoria das propriedades mecânicas e hidráulicas voltadas à pavimentação. As dosagens foram variadas e os corpos de prova foram curados por um período

de duas semanas antes da realização dos ensaios mecânicos. Os resultados demonstraram que a estabilização enzimática promoveu ganhos significativos de resistência principalmente em solos finos, enquanto solos arenosos apresentaram melhorias limitadas. Para solos com maior teor de argila, os valores de CBR aumentaram entre 2,75 e 4,7 vezes em relação ao solo não tratado. Análises por Fluorescência de Raios-X indicaram pequenas variações na composição química dos solos estabilizados, incluindo aumento no teor de sílica, o que levou os autores a sugerirem a possível presença de aditivos à base de sílica nas formulações comerciais. Entretanto, não foram observadas evidências da formação de novos produtos cimentantes típicos de estabilizações químicas convencionais. Assim, os autores atribuem o mecanismo de atuação das enzimas principalmente à modificação das cargas superficiais das partículas argilosas, à redução da água adsorvida e à consequente densificação da estrutura do solo.

Mittal (2020) apresentou aplicações do estabilizante enzimático *TerraZyme* em projetos desenvolvidos na Índia e no Canadá. O autor reportou resultados positivos semelhantes aos observados em estudos anteriores, como aumento da estabilidade e da integridade das camadas do pavimento, redução do craqueamento superficial e diminuição dos custos de construção, associada à possibilidade de adoção de menores espessuras de revestimento asfáltico. O estudo indicou que o estabilizante apresenta melhor desempenho em solos argilosos e arenosos, sendo pouco eficiente em solos predominantemente siltosos. Contudo, assim como nos demais trabalhos, permanecem lacunas relevantes no que se refere à avaliação mecanicista do comportamento do solo estabilizado, bem como pela escassez de dados experimentais que comprovem a melhoria do desempenho sob carregamentos repetidos.

Renjith et al. (2020) conduziram estudos laboratoriais com o estabilizante *Eko Soil*, avaliando diferentes dosagens em um solo classificado como CL, segundo o sistema SUCS, na Austrália, com aplicação voltada a estradas não pavimentadas. Os resultados indicaram que a estabilização enzimática não produziu melhorias significativas quando os corpos de prova foram moldados considerando a umidade ótima do solo natural, sendo observada, em alguns casos, a redução da resistência mecânica. Por outro lado, quando os ensaios foram realizados com base na nova umidade ótima do solo tratado, foram verificados ganhos expressivos nos valores de CBR e resistência à compressão simples. Esses resultados evidenciam a necessidade de realização do ensaio de compactação considerando a presença do estabilizante, uma vez que sua adição pode alterar significativamente a umidade ótima do material. Apesar da contribuição metodológica, o estudo também apresenta limitações semelhantes às observadas em outros trabalhos, destacando-se a ausência de ensaios voltados à avaliação do comportamento a partir

de ensaios triaxiais estáticos e cíclicos, bem como a desconsideração de etapas de imersão nos ensaios de compressão simples.

De forma geral, a análise da literatura evidencia que a estabilização enzimática de solos tem sido amplamente investigada, sobretudo com foco em aplicações em estradas não pavimentadas, apresentando, em muitos casos, resultados positivos associados ao aumento da resistência, à melhoria da estabilidade das camadas e à redução de defeitos superficiais. Entretanto, observa-se uma lacuna científica relevante no que se refere à avaliação mecanicista do comportamento desses solos estabilizados, uma vez que a grande maioria dos estudos baseia suas conclusões em ensaios como CBR e resistência à compressão simples, os quais não são suficientes para caracterizar adequadamente o desempenho estrutural exigido pelos métodos modernos de dimensionamento de pavimentos.

Nota-se que ensaios de módulo de resiliência (MR) e deformação permanente (DP), fundamentais para a análise do comportamento dos materiais sob carregamentos repetidos e para a previsão do desempenho em longo prazo, são raramente empregados na literatura sobre estabilização enzimática. Essa limitação compromete a extrapolação dos resultados laboratoriais para condições reais de tráfego, especialmente em pavimentos sujeitos a solicitações cíclicas intensas.

Adicionalmente, a interpretação dos mecanismos de atuação das enzimas é dificultada pela escassez de informações técnicas sobre a composição química dos produtos comerciais, protegidas por segredos industriais. Essa falta de transparência impede análises mais aprofundadas acerca das interações físico-químicas entre o solo e o estabilizante, restringindo a compreensão dos processos responsáveis pelas melhorias observadas e limitando a comparabilidade entre diferentes estudos.

Outro aspecto crítico identificado refere-se à ausência, em muitos trabalhos, de etapas de imersão ou controle rigoroso da umidade nos ensaios mecânicos. Essa lacuna metodológica gera incertezas quanto à origem dos ganhos de resistência reportados, uma vez que tais incrementos podem estar associados não necessariamente à ação do estabilizante enzimático, mas ao efeito da sucção decorrente da secagem dos corpos de prova que ocorre durante a cura. Dessa forma, torna-se difícil dissociar o efeito intrínseco da enzima daquele resultante das condições de umidade adotadas durante os ensaios.

Diante desse cenário, evidencia-se a necessidade de estudos mais abrangentes e rigorosos, que incorporem ensaios mecanicistas compatíveis com metodologias modernas de dimensionamento, controlem adequadamente os efeitos da umidade e permitam uma avaliação mais consistente do real papel das enzimas na estabilização de solos, especialmente em contextos de aplicação em pavimentos.

3 METODOLOGIA

Nesta seção são apresentados os materiais e métodos utilizados para analisar a estabilização química de solo tropical argiloso com solução enzimática para fins geotécnicos, como obras de terra e pavimentação. Para cumprimento das etapas realizadas, foi elaborado um fluxograma do planejamento experimental, conforme Figura 3.1, sendo as etapas detalhadas nos itens que se seguem.

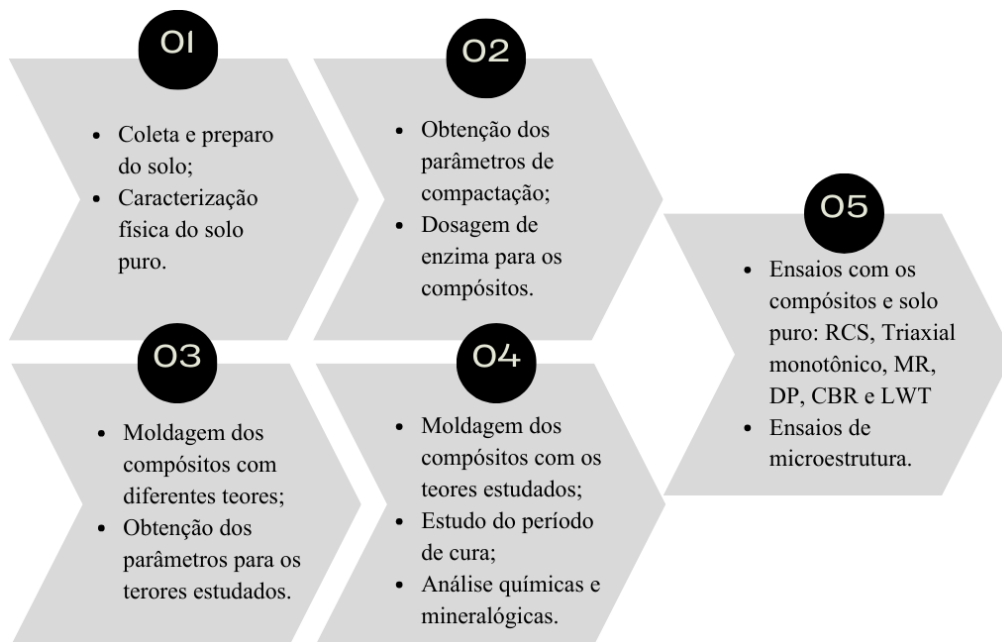


Figura 3.1 - Fluxograma das etapas experimentais

3.1 MATERIAIS

O solo utilizado neste estudo foi coletado manualmente a uma profundidade de 1,5 metro, na região de Brasília, nas proximidades da rodovia distrital DF-095, com coordenadas geográficas 15°47'39.20860''S 47°58'7.90480''W (Figura 3.2). Após a coleta, as amostras deformadas foram armazenadas em embalagens plásticas para transporte. Conforme o Atlas do Instituto de Pesquisa e Estatística do Distrito Federal – IPEDF (2020), a área em estudo caracteriza-se pela predominância de rochas metamórficas do tipo ardósia.

O composto utilizado neste estudo foi o Ecotab, um estabilizante enzimático patentado e comercializado sob a forma líquida que, de acordo com o comerciante, consiste em uma composição orgânica complexa obtida por processos de fermentação, cuja finalidade é acelerar ou catalisar reações químicas poucos segundos após o contato com o solo (ECOLINK, s.d.). Por se tratar de um produto patentado, sua composição química e enzima ativa não foi fornecida pelo fabricante. Na Tabela 3.1 são apresentados os dados fornecidos de densidade, pH, ponto de ebulição, aparência e odor.



Figura 3.2 - Localização geográfica do local da coleta (Google Earth, 2025).

No caso do estabilizante utilizado nesta pesquisa, observou-se um pH significativamente mais elevado e de caráter alcalino, quando comparado aos reportados na literatura por Eujine et al. (2017), Renjith et al., (2020) e O'Donnell et al., (2023). É importante considerar que o produto utilizado nesse estudo, além de conter a enzima como componente principal, inclui aditivos incorporados pelo fabricante com o objetivo de aprimorar propriedades específicas do solo. Esses aditivos podem justificar o aumento do pH observado. Contudo, quando aplicado em solos tropicais, geralmente ácidos, o pH tende a diminuir, sendo necessário monitorar essa variação ao longo do tempo para avaliar a efetiva ativação do produto.

Tabela 3.1 - Dados fornecidos da enzima (Modificado - Ecolink, s.d.)

Parâmetro	Unidade	Valor
Densidade	g/cm ³	1,05
pH	-	11,00 - 11,04
Ponto de ebulição	°C	100
Aparência	-	Castanho avermelhado
Odor	-	Levemente fermentado

Em síntese, a literatura evidencia que tanto valores baixos quanto elevados de pH influenciam diretamente a atividade enzimática e a cinética da reação. Enquanto o pH ácido tende a reduzir a taxa de reação e favorecer a uniformidade da precipitação, o pH alcalino pode estar associado a formulações comerciais específicas, exigindo acompanhamento contínuo para assegurar o desempenho esperado em campo, por esse motivo, as análises químicas posteriores são de extrema importância.

Além desses materiais, para os ensaios de caracterização e para homogeneização na compactação dos corpos de prova, utilizou-se de água destilada.

3.2 DOSAGENS

Nesse trabalho foram avaliados dois teores diferentes de enzima, o primeiro teor foi adotado uma proporção de 0,5% de enzima em relação à massa seca do solo, seguindo tanto a recomendação média do fabricante quanto as proporções indicadas na literatura para estabilizantes à base de enzimas (RENJITH et al., 2020; KHANNA et al., 2022; ARABANI E SHALCHIAN, 2024).

Para o segundo teor, foram avaliadas concentrações de solução estabilizante correspondentes a 10%, 20%, 30%, 40%, 50% e 60%, aplicadas em relação à umidade ótima previamente determinada para o material. Para fins práticos nesta pesquisa, tais concentrações foram convertidas em relação à massa seca do solo, correspondendo, respectivamente, a 2,8%, 5,6%, 8,55%, 11,6%, 14,8% e 18,1%. Com fins de se comparar esses teores com outros trabalhos, converte-se para unidade de massa, sendo o numerador representando o volume de solo e o denominador, o volume de enzima: 1/0,07; 1/0,14; 1/0,21; 1/0,29; 1/0,37 e 1/0,45.

A escolha desses teores baseou-se em referências da literatura nacional e internacional acerca da utilização de estabilizantes químicos, com o objetivo de identificar a concentração mais eficaz para a estabilização do solo em estudo. Essa metodologia permitiu selecionar o teor que apresentou desempenho satisfatório, orientando, assim, a condução dos ensaios subsequentes.

3.3 PREPARAÇÃO DO SOLO

Após o transporte (Figura 3.3a), o solo foi preparado conforme os procedimentos da Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT NBR 6457:2024, incluindo a secagem prévia (Figura 3.3b), destorroamento e peneiramento na peneira 2 mm (Figura 3.3c). Em seguida, o solo foi homogeneizado por quarteamento manual e armazenado em sacos plásticos apropriados (Figura 3.3d).

Ressalta-se que a maioria dos ensaios foram realizados no Laboratório de Novos Materiais Geotécnicos da Universidade de Brasília. Assim, menciona-se ao longo do trabalho apenas aqueles ensaios realizados em laboratórios externos.



Figura 3.3 - Etapas de preparação do solo: a) transporte; b) secagem; c) destorroamento; d) armazenamento.

3.4 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO FÍSICA E CLASSIFICAÇÃO

Para os ensaios de caracterização física, foram executados ensaios de análise granulométrica por sedimentação com e sem o uso de defloculante hexametáfosfato de sódio para se avaliar a influência da agregação na classificação granulométrica, conforme ABNT NBR 7181:2025, determinação dos limites de liquidez e de plasticidade, segundo as normas ABNR NBR 6459:2025 e ABNR NBR 7180:2025, respectivamente, e determinação da massa específica dos grãos, conforme ABNR NBR 6508:1984.

Os ensaios de caracterização foram realizados para o solo em seu estado natural e estabilizado, com exceção da granulometria, feita apenas na condição natural com e sem defloculante.

A partir das propriedades físicas e dos limites de Atterberg, o solo foi classificado segundo o Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS), conforme a norma ASTM D 2487:2017, e pelo sistema da American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), de acordo com a norma ASTM D 3282:2015.

Adicionalmente, empregou-se a metodologia MCT, conforme as normativas DNIT-ME 258/2023 e DNIT-CLA 259/2023, realizado no Laboratório do Departamento de Estradas de Rodagem do Distrito Federal – DER/DF.

Com base nos ensaios de compactação em equipamento miniatura (Mini-MCV) e na perda de massa por imersão, ilustrada na Figura 3.4, foram determinados os coeficientes de

classificação do solo (c'), o coeficiente angular da reta (d'), o índice de classificação e a perda de massa por imersão (P_i).

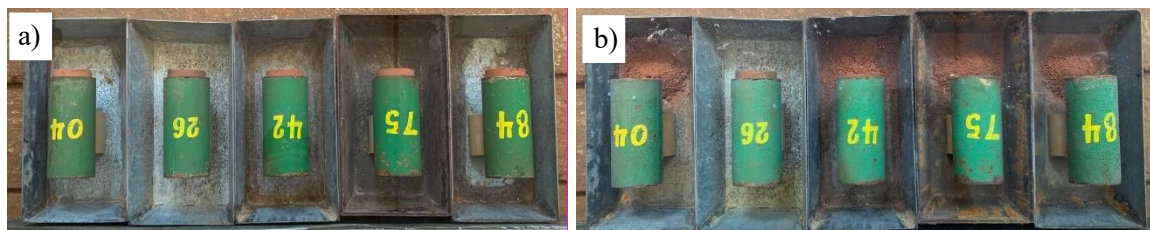


Figura 3.4 - Ensaio de perda de massa por imersão: a) Início do ensaio b) Final do ensaio.

3.5 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO AVANÇADA

Dada a importância das características químicas, mineralógicas e termogravimétricas na interação da enzima com o solo argiloso em estudo, diversos ensaios foram realizados de maneira a entender em profundidade as propriedades individuais dos materiais e dos compósitos formados por eles, conforme elencado na Tabela 3.2. Ressalta-se a adoção das siglas SP, EN, SE-0.5 e SE-8.55 para indicar o solo puro, enzima e compósitos com 0,5% e 8,55% de solução enzimática, respectivamente.

Tabela 3.2 - Ensaio químicos realizados

Ensaio	Amostras
<i>Fourier Transform Infrared Spectroscopy</i> (FTIR)	SP, EN e SE-8.55
Fluorescência de Raios-X (FRX)	SP e EN
<i>Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectrometry</i> (ICP/OES)	SP, EN e SE-8.55
Análise Elementar de Carbono, Nitrogênio e Hidrogênio	EN
<i>Differential Scanning Calorimetry - Thermogravimetry</i> (DSC/TG)	SP, EN, SE-0.5 e SE-8.55

O ensaio de FTIR foi realizado na Central Analítica do Instituto de Química da UnB (CAIQ/UnB), em que foi utilizado um espectrômetro da marca Varian, modelo FTIR 640, realizando medidas na região de 4000 a 400 cm^{-1} . O ensaio consiste na análise analítica usada para identificar compostos químicos e grupos funcionais a partir da absorção de radiação infravermelha, medindo quais comprimentos de onda foram absorvidos.

As amostras foram preparadas a partir do destorroamento e passadas na peneira #200 (0,075 mm), por não ter uma quantidade determinada para se realizar o ensaio, utilizou-se quantidade suficiente para recobrir a superfície do cristal de forma a garantir adequado contato

óptico. Para a amostra de solo estabilizado, após a mistura da enzima com solo puro, deixou-se secar ao ar por 7 dias, após esse período, destorroou-se e passou na peneira #200, sendo esse procedimento adotado no laboratório realizado. As amostras de enzima pura, considerando que é líquida na temperatura ambiente, foi realizada preparação envolvendo a solidificação, com a retirada de toda a água presente em sua composição, e pulverização, conforme demonstrado na Figura 3.5.

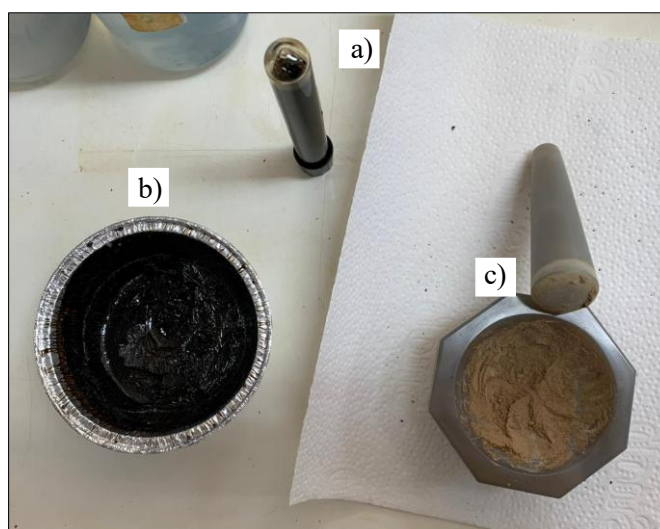


Figura 3.5 - Preparação da enzima para os ensaios químicos: a) fase líquida; b) fase sólida; c) sólida pulverizada.

O ensaio FRX foi realizado no Centro Regional para o Desenvolvimento Tecnológico e Inovação na Universidade Federal de Goiás (CRTI/UFG), utilizando espectrômetro de marca WDS Rigaku, modelo ZRX Primus IV, equipado com tubo de Rh, para determinação da composição elementar do material, com valores obtidos expressos em porcentagem em massa. Para análise dos elementos menores, utilizou-se um espectrômetro de marca WDS Bruker, com modelo S8 Tiger, equipado com tubo de Rh, com resultados apresentados em partes por milhão (ppm). Para ambas as análises, a amostra de solo puro utilizada foi preparada conforme diretrizes do laboratório realizado, sendo passante pela peneira #200 (0,075 mm). A amostra de enzima foi utilizada em sua forma sólida pulverizada, preparada conforme Figura 3.5.

Como preparação desenvolvida para a realização do ensaio, utilizou-se da seguinte metodologia para análise dos óxidos maiores, pelo método de fusão: i) inicialmente separou-se aproximadamente 5,0 gramas de amostras após o quarteamento e pulverização em moinho planetário de bolas; ii) a amostra foi seca em estufa a 105 °C por 12 horas; iii) A amostra foi

calcinação a 1000 °C por 5 horas, sendo em seguida, retirado 1,0 grama da amostra e fundida com 9,0 gramas de tetraborato de lítio.

Para a análise de elementos menores, necessitou-se de uma preparação diferente, seguindo a metodologia de pastilha prensada, sem o uso de fusão, de forma a melhorar a sensibilidade do sinal e o limite de detecção. Para tal, utilizou-se da seguinte metodologia: i) separou-se aproximadamente 15,0 gramas de amostras após o quarteamento e pulverização em moinho planetário de bolas; ii) a amostra foi seca em estufa a 105 °C por 12 horas; iii) foi confeccionado uma pastilha prensada misturando e homogeneizando 3,0 gramas de cera aglutinante com 9,0 gramas da amostra previamente seca; iv) a mistura foi prensada com uma força de 15 toneladas.

O ensaio *Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectrometry* (ICP/OES) foi realizado para se caracterizar os óxidos e elementos presentes nas amostras, objetivando identificar óxidos maiores e elementos menores, além de se verificar a presença de metais potencialmente tóxicos e outros elementos presentes na enzima, de forma a se avaliar se o produto é ambientalmente seguro. Ainda que a finalidade se assemelhe ao ensaio de FRX, a realização de ambos os ensaios se justifica por serem técnicas distintas e pela dificuldade de identificar elementos básicos presentes no estabilizante.

O referido ensaio foi conduzido no Laboratório de Geoquímica do Instituto de Geociências da Universidade de Brasília (LAGEQ/IG/UnB), utilizando o equipamento ICP/OES de marca Agilent, modelo 5100. O ensaio baseia-se na emissão óptica e na leitura de comprimentos de onda característicos, cuja intensidade é proporcional à sua concentração na amostra. Utilizou-se da seguinte metodologia para o ensaio: i) Separou-se a amostra, previamente seca em estufa a 105 °C, e pulverizada em almofariz tipo Ágata; ii) Utilizou-se 0,05g da amostra, separando-a em cadinhos de platinas acrescidos de 0,17 g de fundente de Metaborato de Lítio, homogeneizando e levando-a ao forno Mufla até a temperatura de 950 °C; iii) Após o resfriamento em temperatura ambiente dos cadinhos, a amostra resultante da fusão foi dissolvida em béquer com HCl 2M e transferida para um balão volumétrico com água ultrapura do sistema Milli-Q; iv) As amostras, após esses procedimentos, foram estocadas em tubos tipo Falcon e diluídas em 1/5 para análises.

A análise elementar de CHN foi realizada na Central Analítica do Instituto de Química da UnB (CAIQ/UnB), em equipamento da marca Perkin Elmer, modelo EA 2400 Series II. Foi realizado apenas no solo puro, utilizando de amostra destorroadada e, conforme metodologia

utilizada no laboratório especificado, passante na peneira #200 (0,075 mm). O equipamento conta com um forno de alta temperatura para completa combustão da amostra, ocorrendo a retenção seletiva dos gases (separação por cromatografia frontal) e detecção dos gases por TCD (detector de condutividade térmica). Ao fim, pode-se quantificar a presença dos elementos carbono, hidrogênio e nitrogênio.

Complementarmente a caracterização química, realizou-se no Laboratório de Geociências do Instituto de Geociências da Universidade de Brasília (IG/UnB) a caracterização mineralógica do solo por meio do ensaio de Difração de Raios X (DRX), utilizando-se de material seco, destorroado e passado na peneira #200 (0,075 mm), conforme diretrizes do laboratório especificado. Utilizou-se um difratômetro da marca Rigaku de modelo Última IV, com radiação $\text{CuK}\alpha$, na técnica conhecida como θ - 2θ , geometria Bragg Brentano. O intervalo de varredura 2θ utilizado foi de 2 a 40° com passo angular de $0,05^\circ$.

O ensaio de DSC/TG foi realizado no CRTI/UFG, empregando equipamento Netzsch STA 449 F3 Nevio, utilizando fluxo de gás tipo N₂ (100 mL/min) e aquecimento até a temperatura máxima de 1200 °C. Para a amostra de solo estabilizado e solo puro foram utilizadas aquelas passante na peneira #200 (0,075 mm), conforme metodologia utilizada no laboratório especificado, para a amostra de enzima pura, utilizou-se a mesma metodologia conforme Figura 3.5, para o ensaio, usa-se cerca de 10 mg de material.

O ensaio foi utilizado para investigar as modificações no comportamento térmico da água presente no solo e possíveis alterações nas interações solo-água com a introdução do estabilizante por meio da análise termogravimétrica (TGA) e de sua derivada (DTG), permitindo avaliar a estabilidade térmica do material, as faixas de temperatura associadas à perda de massa e o resíduo final pós-queima. Dada a ação principal da enzima se dar pela reorganização da água adsorvida, reduzindo a dupla camada-difusa, não é esperado a formação de novas fases minerais que possam interferir nos diagramas termogravimétricos.

3.6 MOLDAGEM DOS CORPOS DE PROVA

Inicialmente, elaborou-se a curva de compactação do solo natural, utilizada como parâmetro de referência para a avaliação dos diferentes teores da solução estabilizante. O ensaio foi realizado conforme a ABNT NBR 7182:2025, sem reaproveitamento do material, em cilindro Proctor sob Energia Intermediária. A adoção dessa energia justifica-se por seu uso recorrente em camadas de estradas não pavimentadas submetidas a tráfego moderado.

Adicionalmente, a fim de validar os resultados obtidos, o ensaio também foi conduzido em cilindro Proctor sob Energia Normal.

A partir da determinação da massa específica seca máxima (ρ_d) e do teor de umidade ótimo ($\omega_{ót}$) do solo natural, esses parâmetros foram utilizados como referência para a moldagem de seis corpos de prova para cada concentração da solução estabilizante, dentre os teores de 2,8%, 5,6%, 8,55%, 11,6%, 14,8% e 18,1%. O objetivo dessa fase foi avaliar, de forma preliminar, o teor da solução enzimática com desempenho mais satisfatório.

Ressalta-se que para determinar corretamente a proporção água/enzima na preparação das misturas, é imprescindível determinar previamente o teor de sólidos presentes na solução enzimática. Tal etapa é necessária, uma vez que o produto enzimático comercial apresenta em sua composição tanto uma fração líquida quanto uma fração sólida em suspensão. Considerando, por exemplo, a utilização de 18,1% de enzima e a adição da quantidade teórica de água correspondente à umidade ótima do solo, observa-se, em alguns casos, que a umidade efetivamente obtida é inferior à esperada. Essa discrepância ocorre porque a dosagem de 18,1% é calculada com base na massa total da solução enzimática, a qual inclui as partículas sólidas. Consequentemente, a fração líquida disponível para hidratação do solo é menor do que a estimada, resultando em um teor de umidade abaixo do ótimo.

Para corrigir essa limitação, realizou-se uma compensação de umidade, ajustando-se a dosagem de enzima de modo que os 18,1% correspondessem efetivamente à fração líquida ativa em relação à massa seca do solo, desconsiderando-se a contribuição dos sólidos presentes na solução. Dessa forma, adiciona-se água para que possa refletir a umidade ótima requerida. Tal redução da umidade ótima já era prevista e encontra-se em conformidade com as recomendações técnicas fornecidas pela empresa responsável pelo produto, que orienta a realização da correção de umidade.

A determinação da fração sólida foi conduzida por meio de ensaio de secagem, no qual as soluções foram submetidas ao processo de secagem até restar apenas o resíduo sólido. A Figura 3.6a ilustra a aparência da solução após o processo de secagem, sendo possível observar, pelas marcas deixadas na fôrma, a quantidade de água perdida durante o procedimento, enquanto a Figura 3.6b apresenta o gráfico final obtido após o procedimento de correção da umidade, no qual é possível observar o acréscimo requerido para atingir a porcentagem de enzima desejada. Como exemplo, para se obter uma concentração relativa de 18,1%, é necessário acrescentar 3,31% adicionais.

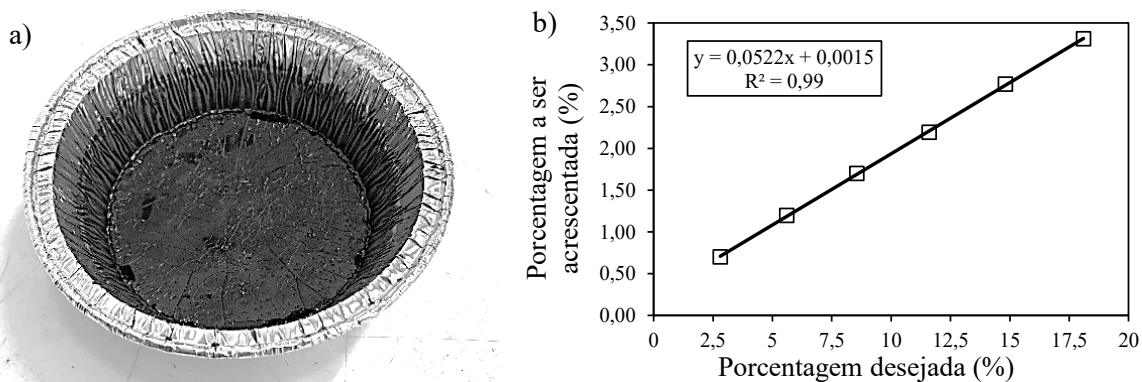


Figura 3.6 - Correção de umidade para a solução enzimática: a) Partículas sólidas presentes na solução enzimática; b) Equação gerada.

Os corpos de prova foram mantidos em cura ao ar por 14 dias, em ambiente controlado de temperatura e umidade. Segundo Malko (2015), variações nos resultados podem ocorrer em razão da natureza biológica da enzima, suscetível à interação com microrganismos presentes no ambiente e à contaminação por ferramentas ou equipamentos não esterilizados durante a preparação. Para minimizar essas interferências, os corpos de prova foram moldados utilizando o mesmo molde cilíndrico e sob condições ambientais homogêneas. Além disso, foram aceitos apenas aqueles com grau de compactação (GC) acima de 98% e desvio de umidade de no máximo 1,5%, assegurando uniformidade e confiabilidade dos resultados.

O processo de moldagem seguiu a seguinte sequência: i) Homogeneização e pesagem do solo a ser utilizado; ii) Pesagem da quantidade definida de enzima e de água destilada; iii) Adição de parte da água ao solo, promovendo a umidificação inicial e evitando a formação de grumos; iv) Incorporação da enzima previamente diluída na porção restante da água, favorecendo sua distribuição, ativação e interação com as partículas do solo.

A Tabela 3.3 apresenta a quantidade de corpos de prova utilizados em cada ensaio mecânico.

Tabela 3.3 - Corpo de prova dos ensaios mecânicos

Ensaio Mecânico	Quantidade de corpos de prova
Resistência à compressão simples	57
CBR	3
Triaxial monotônico	15
Módulo de Resiliência	15
Deformação Permanente	30
LWT	6

3.7 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES

A Resistência à Compressão Simples (RCS) foi determinada conforme o ensaio descrito na ABNT NBR 12770:2022, que consiste na aplicação de uma carga axial uniaxial até a ruptura do corpo de prova. Os ensaios foram realizados em prensa elétrica e automática modelo MP01-Multiprensa, da marca Owntec no Laboratório de Novos Materiais Geotécnicos na Universidade de Brasília, que aplica carga axial de forma uniforme, com velocidade de deformação controlada de 1 mm/min.

Inicialmente, os corpos de prova moldados com diferentes teores de enzima foram curados por 14 dias, período adotado com base em estudos prévios que indicam que, nesse intervalo, os processos físico-químicos de estabilização atingem um estágio satisfatório de endurecimento e ganho de resistência (KHANNA et al., 2022; RABBANIFAR et al., 2023).

Posteriormente a etapa de cura, foram avaliados no ensaio de compressão simples, adotando-se duas condições distintas de rompimento: (i) três dos seis corpos de prova foram ensaiados diretamente após a cura ao ar; (ii) os outros três foram submetidos a imersão em água por 4 h e ensaiados em seguida, conforme a ABNT NBR 12025:2012. Embora esta norma seja destinada a solos estabilizados com cimento, sua adoção neste trabalho visou analisar o efeito da imersão, considerada representativa de condições críticas de umidade para aplicações geotécnicas. Paralelamente, corpos de prova de solo natural (sem aditivo) foram moldados e ensaiados em triplicata para fins comparativos, possibilitando a construção de uma curva média de referência.

Na literatura internacional, a imersão prévia ao ensaio não é amplamente empregada, sendo mais comum o rompimento após a cura ao ar (KHANNA et al., 2022; RABBANIFAR et al., 2023; ZIMAR et al., 2024). Contudo, essa prática apresenta limitações, pois não reproduz situações de maior criticidade. Em aplicações reais, como em estradas não pavimentadas ou revestidas apenas com material primário, a ausência de camadas impermeabilizantes, comuns em pavimentos asfálticos do tipo CBUQ, permite maior infiltração e acúmulo de água. Nesse contexto, considerando as condições tropicais do Brasil, marcadas por elevados índices pluviométricos, a adoção da condição imersa neste estudo é mais representativa da realidade de campo.

Importante destacar que, em função da cura ao ar por 14 dias, os corpos de prova, nesta etapa inicial, foram rompidos com umidades diferentes da moldagem. Durante a moldagem os corpos de prova foram preparados com a umidade ótima determinada para o solo no estado

natural, porém, ao longo do período de cura, ocorreu perda de água em razão da evaporação e da troca de umidade com o ambiente. Por esse motivo, procedeu-se ao monitoramento da umidade no momento do rompimento, de forma a garantir maior rigor no controle experimental.

Os mesmos procedimentos foram realizados para o teor com melhor desempenho inicial, referente a 8,55%, e o 0,5%, envolvendo os períodos de cura de 1, 3, 7 e 14 dias. Manteve-se, assim, o mesmo critério da fase anterior, com corpos de prova compactados entre 98% e 101% do grau de compactação e desvio de umidade de no máximo 1,5%.

3.8 TRIAXIAL MONOTÔNICO

Os ensaios de compressão triaxial estática foram conduzidos em equipamento FT - 17002 -50 kN da marca FullTest dotado de três pressurizadores, o que possibilitou a execução da etapa de permeabilidade. Para a determinação das envoltórias de ruptura, os ensaios foram conduzidos a partir das tensões confinantes de 50, 100, 200, 400 e 800 kPa. Os ensaios realizados foram do tipo consolidado drenado (CD), nos quais se permite o fluxo de água para dentro ou para fora da amostra durante o cisalhamento.

Ao todo, foram realizados 15 ensaios, distribuídos em três condições distintas: solo natural (SP), solo estabilizado com 0,5% (SE-0.5) e solo estabilizado com 8,55% (SE-8.55). Os procedimentos seguiram as diretrizes estabelecidas pela norma britânica BS 1377-8:1990. Os corpos de prova de solo estabilizado foram ensaiados após o período de cura de 7 dias, tempo este que apresentou desempenho satisfatório e estável na compressão simples.

Nesse tipo de ensaio, a aplicação da tensão cisalhante se dá de forma suficientemente lenta para garantir a dissipação completa das poropressões geradas, assegurando que as tensões medidas correspondam efetivamente às tensões entre os grãos do solo, uma vez que o excesso de poropressão é, na prática, nulo.

O diferencial desse procedimento é a possibilidade de monitorar a variação volumétrica ao longo do cisalhamento, o que reflete a entrada ou saída de água do corpo de prova saturado. As etapas específicas de execução do ensaio são apresentadas e discutidas nos itens subsequentes.

a) Montagem do Corpo de Prova na Câmara Triaxial

A Figura 3.7a demonstra os principais utensílios utilizados para montagem do corpo de prova na câmara triaxial, seguindo a seguinte ordem cronológica: i) Verificou-se o nível de água no reservatório e nos pressurizadores, assegurando a completa eliminação de bolhas de ar nas mangueiras; ii) Realizou-se a saturação das linhas de base, sendo uma responsável pela leitura da poropressão durante todo o ensaio e outra pela contrapressão; iii) Com todo o sistema conferido, o corpo de prova foi posicionado no pedestal da base com a ordem pedra porosa, papel filtro, corpo de prova, papel filtro, pedra porosa e top cap; iv) Utilizou-se um encamisador para envolver o corpo de prova com a membrana de látex, desde a base do pedestal até acima do top cap; v) Para garantir a vedação do sistema, o corpo de prova foi acoplado com quatro anéis de borracha (*o' rings*), sendo dois no pedestal e dois no top cap; vi) Procedeu-se à saturação da mangueira do topo, removendo-se as bolhas de ar e conectando-a ao top cap; vii) Aplicou-se no anel de borracha (*o' ring*) de contato entre a base e a câmara triaxial, para não ocorrer a fuga da água; viii) Por fim, posicionou-se a câmara apertando os fixadores, ajustou-se o pistão, conectaram-se as mangueiras a cada válvula e completou-se com o enchimento da câmara com água destilada (Figura 3.7b), etapa prévia ao processo de saturação.

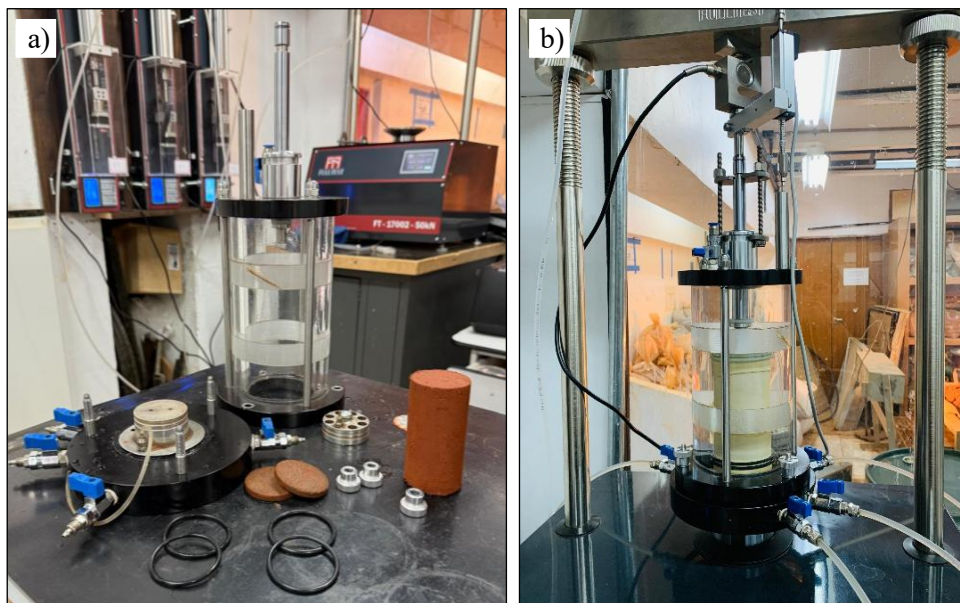


Figura 3.7 – Ensaio triaxial estático: a) Equipamentos utilizados; b) Ensaio montado

b) Saturação do corpo de prova e permeabilidade

A saturação do corpo de prova foi realizada utilizando a metodologia de rampas de contrapressão, mantendo-se constante a diferença entre a pressão confinante e a contrapressão em 20 kPa. Os incrementos de pressão foram aplicados de forma automática, com acréscimos

máximos de 50 kPa a cada uma hora. Dessa forma, o corpo de prova foi continuamente submetido a valores crescentes de contrapressão e confinante até atingir o valor estipulado.

Ao final do processo de saturação, realizou-se o teste do parâmetro B de Skempton (1954), com o objetivo de verificar o grau de saturação do corpo de prova, sendo considerado aceitável um valor de $B \geq 0,95$. Ainda, parâmetro B é definido como a razão entre a variação da poropressão (Δu) e a variação da pressão confinante ($\Delta \sigma_3$), conforme a Equação 3.1:

$$B = \frac{\Delta u}{\Delta \sigma_3} \quad (3.1)$$

Após confirmada a saturação, foi conduzida a etapa de permeabilidade, conforme especificado pela ASTM D5084/2024. Para isso, fechou-se a válvula da contrapressão e, utilizando-se o pressurizador do topo, aplicou-se um gradiente hidráulico entre 2 e 6 kPa, ou seja, a mesma pressão da contrapressão acrescida desse gradiente. Em seguida, abriram-se as válvulas e foram registradas, a cada 5 minutos, as leituras de saída de água pelo pressurizador da contrapressão e de entrada de água no pressurizador do topo.

O tempo médio para alcançar a saturação foi de aproximadamente 24 horas. Com o objetivo de otimizar esse processo, realizou-se pré-umedecimento dos corpos de prova no dia anterior aos ensaios, por meio de gotejamento de água destilada.

c) Etapa de adensamento

Após a verificação da completa saturação do corpo de prova, iniciou-se a etapa de adensamento (ou consolidação). Nessa fase, aplicou-se o acréscimo da tensão confinante (σ_3) correspondente à condição de ensaio. O adensamento foi conduzido de forma hidrostática, impondo-se o incremento de tensão confinante (σ_3) e mantendo-se a contrapressão igual à registrada ao final da etapa de saturação.

Para o início do processo, a válvula da contrapressão permaneceu fechada até o ajuste da pressão confinante e da poropressão gerada, aplicando-se o incremento desejado e abrindo a válvula da confinante. Após esse ajuste, a válvula da contrapressão foi aberta. Nesse momento, o corpo de prova, por estar saturado, apresentou um aumento imediato da poropressão, igual ao valor da tensão efetiva de ensaio. A diferença entre a poropressão estabilizada e a contrapressão

aplicada representa o excesso de poropressão, que deve ser dissipado durante o processo de adensamento.

A etapa de adensamento foi considerada concluída quando a dissipação do excesso de poropressão atingiu 95% do total, indicando o término do adensamento primário. Ao final dessa fase, o sistema gera automaticamente o gráfico de variação volumétrica em função da raiz quadrada do tempo, a partir do qual se determinou o t_{100} , caracterizado pela interseção entre o prolongamento do trecho retilíneo inicial da curva e a assíntota do trecho final.

Com base no t_{100} , calculou-se a velocidade de cisalhamento a ser utilizada na etapa seguinte, de forma constante, conforme especificado pela norma BS 1377-7:1990, utilizando a Equação 3.2:

$$v \text{ (mm/min)} = \frac{\varepsilon_f \cdot L}{100 \cdot t_f} \quad (3.2)$$

Onde: L é a altura do corpo de prova, em mm; ε_f é a deformação axial na ruptura; e t_f é o tempo de ruptura, em min, determinado pela multiplicação de t_{100} por um fator de correção, conforme apresentado na Tabela 3.4, considerando-se ensaios do tipo CD, sem a presença de drenos laterais. Entretanto, caso o tempo calculado seja inferior a 120 minutos, a norma estabelece que se adote t_f igual a 120 minutos.

Tabela 3.4 - Fator de correção para o tempo de ruptura (Adaptado de BS 1377-7/1990)

Tipo de ensaio	Sem drenos laterais	Com drenos laterais
Não drenado (CU)	0,53 x t_{100}	1,8 x t_{100}
Drenado (CD)	8,5 x t_{100}	14 t_{100}

d) Etapa de cisalhamento

Concluída a etapa de adensamento e determinada a velocidade de cisalhamento, prosseguiu-se para a fase final do ensaio, correspondente ao cisalhamento triaxial. É importante destacar que, para todos os ensaios realizados, foi adotada uma mesma velocidade de cisalhamento, suficientemente baixa para evitar o desenvolvimento de excessos de poropressão durante essa etapa.

Por se tratar de um ensaio do tipo drenado (CD), a válvula da contrapressão permaneceu aberta durante todo o cisalhamento, permitindo a saída controlada de água do corpo de prova à medida que a tensão desviadora era aplicada, o que simula uma condição de carregamento lento.

Esse tipo de ensaio possibilita a determinação dos parâmetros efetivos de resistência do solo, bem como a obtenção das trajetórias de tensões efetivas e das curvas de tensão desviadora versus deformação axial e variação volumétrica.

3.9 CBR

O ensaio de CBR (*California Bearing Ratio*) ou ISC (Índice de Suporte Califórnia), foi realizado com a principal finalidade de permitir a comparação dos resultados obtidos com dados disponíveis em outros trabalhos que utilizaram de enzima para estabilização de solos para fins de pavimentação, já que não é observado na literatura a realização de ensaios de módulo de resiliência e deformação permanente.

Para cumprir esse intento, seguiu-se conforme descrito na ABNT NBR 9895:2025 realizando a etapa de expansão e posterior penetração, e foram realizados em prensa elétrica e automática modelo MP01-Multiprensa, da marca Owntec.

Foram moldados 3 corpos de prova, sendo 1 para condição de solo puro (SP), 1 para solo estabilizado com 0,5% de enzima (SE-0.5) e 1 para solo estabilizado com 8,55% (SE-8.55) de enzima, moldados conforme parâmetros de compactação para cada condição na Energia Intermediária, de acordo com a ABNT NBR 7182:2025. Menciona-se que foi feito apenas um corpo de prova para cada condição experimental por restrição da quantidade de solo restante para o cumprimento do programa experimental.

Os corpos de prova estabilizados, após a moldagem, foram deixados em cura, ainda dentro dos moldes de compactação pelo período de 7 dias, tempo utilizados nos demais ensaios mecânicos. Após o período de cura, procedeu-se para etapa de expansão pelo tempo de 4 dias, sendo procedido pela etapa de penetração, à velocidade de 1,27 mm/min.

3.10 TRIAXIAL CÍCLICO DE CARGAS REPETIDAS

Os ensaios de Módulo de Resiliência e Deformação Permanente foram realizados no triaxial cíclico MD 151 – Ensaio Triaxial Dinâmico fabricado pela Owntec, essenciais para a determinação dos parâmetros empregados nos modelos de dimensionamento de estruturas de pavimento. O módulo de resiliência representa a resposta elástica do material quando submetido

a cargas aplicadas em pulsos, indicando sua capacidade de recuperar a deformação após cada ciclo de carregamento (DNIT 134, 2018). Por sua vez, a deformação permanente expressa o acúmulo de deformações irreversíveis ao longo dos ciclos aplicados, fornecendo uma medida da tendência do material à consolidação progressiva e ao desenvolvimento de deformações residuais (DNIT 179, 2018).

A moldagem do corpo de prova utilizado seguiu a norma DNIT 134/2018 – ME, empregando molde cilíndrico tripartido de aço e compactação no Proctor sob Energia Intermediária. Em ambos os ensaios, os corpos de prova foram ensaiados nas mesmas duas condições utilizadas na compressão simples: condição imediatamente após a cura ao ar e condição imersa após a cura ao ar.

Para os compósitos, SE-0.5, SE-0,5I, SE-8,55 e SE-8.55I, adotou-se o período de cura de 7 dias, cura essa utilizada em todos os corpos de provas dessa pesquisa. Para o solo puro, SP, foi utilizado apenas na condição pós moldagem, já que, ao colocá-lo imerso, ocorreu a completa desintegração do corpo de prova.

Na condição imersa, para os corpos de prova estabilizados, aplicou-se procedimento similar ao utilizado no ensaio de compressão simples, isto é, após a cura inicial, os corpos de prova foram totalmente submersos em água com acompanhamento do controle de massa para que atinjam uma umidade padronizada mínima estimada de 25%, e posteriormente foram envelopados com filme plástico e mantidos por 12 horas em câmara úmida, assegurando a homogeneização da umidade.

Em ambos os ensaios, adotou-se o mesmo procedimento de montagem do corpo de prova na câmara, conforme retratado na Figura 3.8.

A montagem seguiu com base nas seguintes etapas: i) Posicionou-se a pedra porosa de Ø100 mm (2) sobre a base do equipamento (1) e adicionou-se um papel filtro (3) sobre a pedra porosa; ii) O corpo de prova (8) foi colocado centralizado, adicionando outro papel filtro (9) sobre o corpo de prova e foi posicionado uma segunda pedra porosa (10); iii) Com o auxílio de um encamisador, envolveu-se esse sistema com uma membrana de látex (7); iv) No topo do conjunto foi posicionado o cabeçote de aplicação de carga (11) e posicionado 2 o’rings de vedação ao redor da base (6) e 2 o’rings ao redor do cabeçote (13); v) Na parte superior do cabeçote foi fixado o suporte contendo os dois sensores de deslocamento (12) de forma a garantir que as pontas dos sensores toquem o aro de apoio (4) para realização das medições; vi)

Posicionou-se o o’ring de vedação da câmara (15) no canal de vedação de forma a evitar vazamento na câmara; vii) Conectou-se uma mangueira pneumática (14) da base da câmara (16) até o cabeçote de aplicação (11); viii) Encaixou-se a câmara (17) sobre a montagem do corpo de prova, garantindo que o pistão (19) esteja centralizado no cabeçote (11).

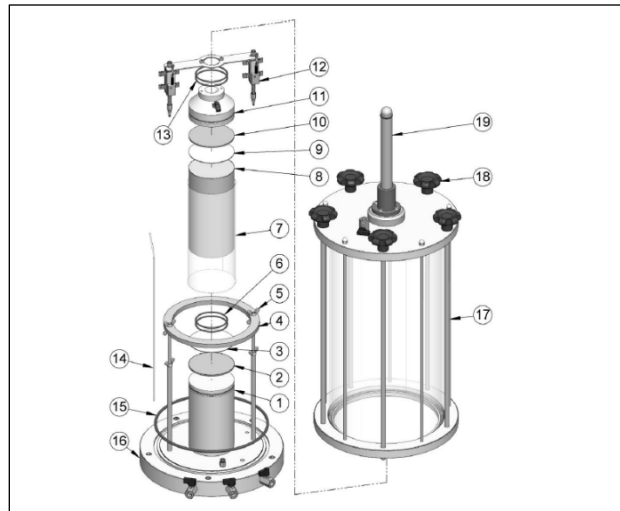


Figura 3.8 - Montagem do corpo de prova na câmara triaxial (Manual Owntec, s.d.)

A realização do ensaio de módulo de resiliência foi seguida conforme a norma DNIT 134/2018 – ME. A frequência das cargas repetidas na tensão desvio foi de 1 Hz (60 ciclos por minuto), correspondendo a duração do pulso de carga de 0,1 segundo e 0,9 segundo de repouso. Antes de iniciar o ensaio propriamente dito, é aplicada uma sequência de carregamentos cíclicos, com a finalidade de eliminar as deformações permanentes que possam ocorrer nas primeiras aplicações de tensão desvio, nesta etapa de condicionamento, aplica-se 500 repetições de três pares de tensões, conforme norma. Após a fase de condicionamento, aplicou-se sequência de 18 pares das tensões, para obtenção das leituras das deformações específicas. Em consonância com a norma, é necessário mínimo de 10 ciclos de carga, em que a aquisição de dados ocorra em pelo menos 5 repetições de carga, nas quais se garanta a constância das leituras com diferença entre elas de, no máximo, 5 %. Para o cálculo do módulo de resiliência utilizou-se a média destas 5 leituras.

Ressalta-se que os parâmetros do módulo de resiliência (MR) foram determinados a partir de três corpos de prova moldados especificamente para essa finalidade. Com base nos resultados obtidos, utilizou-se o software MatLab juntamente com o software *Statistica* para a determinação dos parâmetros dos modelos dependentes da tensão confinante, desviadora e modelo composto, adotando aquele que apresentou a maior correlação, isto é, R^2 .

O ensaio de deformação permanente fez-se de acordo com a norma DNIT 179/2018 – IE. Utilizou-se a frequência das cargas repetidas na tensão desvio de 2 Hz (120 ciclos por minuto), correspondendo a duração do pulso de 0,1 segundo e 0,4 segundo de repouso. Antes de se iniciar o ensaio, é aplicado uma sequência de carregamentos com a finalidade de garantir total contato entre o pistão e o cabeçote, evitando eventuais folgas ou ajustes da superfície sejam lidas como deformação do corpo de prova. Para isso, são aplicados 50 ciclos de cargas iniciais com tensão confinante de 30 kPa e tensão desvio de 30 kPa.

Após o procedimento inicial, para cada corpo de prova foram aplicados 150.000 ciclos de um par de tensão escolhido, conforme norma DNIT 179/2018 – IE. Para os ensaios realizados nessa pesquisa, por motivo de tempo, optou-se por realizar a série simplificada de 6 corpos de prova, permitido pela norma desde que os valores das tensões sejam bem espaçados entre si, de modo a abranger um universo amplo. Ainda, para a escolha das tensões ensaiadas, a norma apresenta 9 pares de tensões a serem ensaiadas, podendo admitir outros pares dentro do intervalo exposto. Nos ensaios realizados, escolheu-se os pares dentro dos apresentados pela norma de forma que eles se encontrem espaçados, a Tabela 3.5 apresenta os pares de tensão ensaiados.

Tabela 3.5 - Tensões ensaiadas no ensaio de deformação permanente

Tensão confinante (kPa)	Tensão desvio (kPa)
40	40
	120
80	160
	240
120	120
	360

Para cálculo da deformação permanente considerando os modelos apresentados por Guimarães (2009) e Mota et al. (2024) foram realizados considerando os 6 pares de tensão realizados, sendo que para o modelo de Guimarães, considerou-se todos os 150.000 ciclos. Para o modelo de Mota para construção da curva mestre de referências para os materiais utilizou-se o par 40 x 120 como referência, segundo metodologia descrita por Mota et al. (2024), utilizando a aplicação dos parâmetros apresentados nas Equações 2.5, 2.6 e 2.7 para utilizar-se de até 10.000 ciclos para os cinco primeiros pares de tensão e 150.000 ciclos para o último.

3.11 LOAD WHEEL TEST (LWT)

O ensaio de *Load Wheel Test* (LWT) foi utilizado para avaliar, de forma qualitativa, a influência da enzima na resistência ao desgaste superficial da camada de solo compactada quando submetida à simulação de tráfego (Figura 3.9). A realização desse ensaio justifica-se pela preocupação com a geração de poeira associada ao uso de solos estabilizados em estradas não pavimentadas, uma vez que o desgaste superficial é um dos principais mecanismos responsáveis por esse fenômeno (JONES et al., 2013). Além disso, a partir de adaptação no equipamento, possibilitou-se também medida direta do desgaste superficial em função do número de passadas.



Figura 3.9 - Equipamento para ensaio LWT (Solotest, s.d.)

O sistema opera mecanicamente, de modo que cada rotação completa aciona um ciclo de ida e volta da roda padrão sobre o corpo de prova, resultando em duas passadas com deslocamento aproximado de 30 cm. Cada ciclo possui duração média de 0,73 s, o que corresponde a aproximadamente 82 ciclos por minuto, ou cerca de 164 passadas, totalizando aproximadamente 9.860 passadas por hora. Todo o processo é monitorado por um controlador digital. Quando operado com a carga máxima recomendada de 56 kg, o equipamento pode ser utilizado para simular tráfego acelerado; entretanto, a equivalência entre o número de passadas e o volume de veículos depende do critério adotado pelo autor. Brazetti et al. (2013) relacionam as solicitações impostas pelo LWT a um tráfego equivalente de cerca de um milhão de veículos em menos de 25 minutos, desde que considerada a equivalência de carga estabelecida.

O ensaio segue as diretrizes da NBR 14841:2015, que estabelece o procedimento para avaliação da adesão de areia em micro revestimentos asfálticos. Contudo, neste estudo, o método foi adaptado para aplicação em solos, priorizando-se observações visuais do potencial de desenvolvimento de defeitos típicos de pavimentos, tais como desagregação e desgaste. Adicionalmente, buscou-se avaliar o efeito da estabilização no desempenho do material frente

às solicitações impostas, adotando abordagem semelhante à de Malko et al. (2015), utilizando-se leituras de um relógio amostrador para avaliar do desgaste da roda na superfície.

Para fins comparativos, o desempenho do solo estabilizado foi confrontado com o do solo puro em duas condições distintas: (i) com grau de saturação semelhante ao dos compósitos após 7 dias; e (ii) ensaiado imediatamente após a moldagem. A moldagem e preparação dos corpos de prova são detalhadas nos itens seguintes.

a) Preparação da Amostra e compactação

A preparação do solo destinado à moldagem dos corpos de prova seguiu o mesmo procedimento que os ensaios anteriores, separando o solo utilizado em saco plástico, realizando a mistura de parte da água e misturado o restante com a parcela de enzima. Após a homogeneização, o solo estabilizado com enzima e com a quantidade de água necessária para atingir a umidade ótima foi dividido em duas porções idênticas. O sistema de moldagem e compactação empregou dispositivos desenvolvidos, conforme ilustrado na Figura 3.10, sendo: i) moldes metálicos de dimensões padronizadas de 12,7 x 308,8 x 55,55 mm (espessura x comprimento x largura); ii) Chapas de aço integradas ao equipamento, com espessura de 0,6 mm; iii) Distribuidor metálico de carga, utilizado para garantir a distribuição uniforme da energia aplicada pelo soquete; iv) suporte metálico com parafusos e porcas para fixação rígida dos moldes.

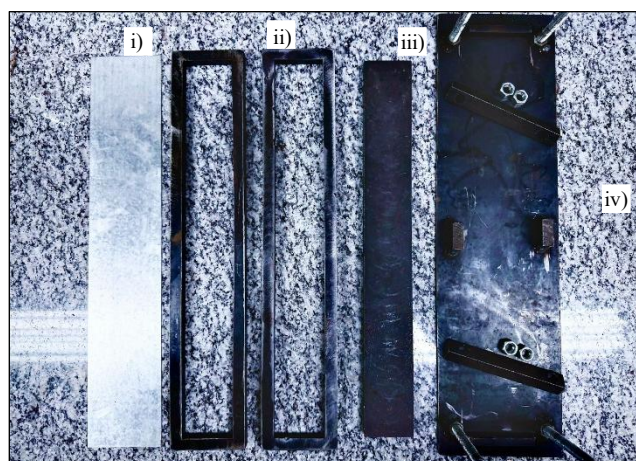


Figura 3.10 - Equipamentos para moldagem de corpo de prova para ensaio LWT: a) Chapa metálica; b) Moldes metálicos; c) Distribuidor de carga metálico; d) Suporte.

Além desses dispositivos, empregaram-se papel filtro na base dos moldes e régua biselada para o correto nivelamento da superfície superior do solo ao término da compactação.

Para o processo de compactação, após o preparo da amostra, a primeira parcela de solo foi posicionada no molde já fixado ao suporte. Em seguida, inseriu-se um filme plástico entre o solo e o distribuidor de carga, conforme ilustrado na Figura 3.11a. Ensaios preliminares foram conduzidos para determinar o número adequado de golpes e rotações necessários para alcançar um grau de compactação entre 98% e 101%, mantendo-se o critério adotado nos demais ensaios.

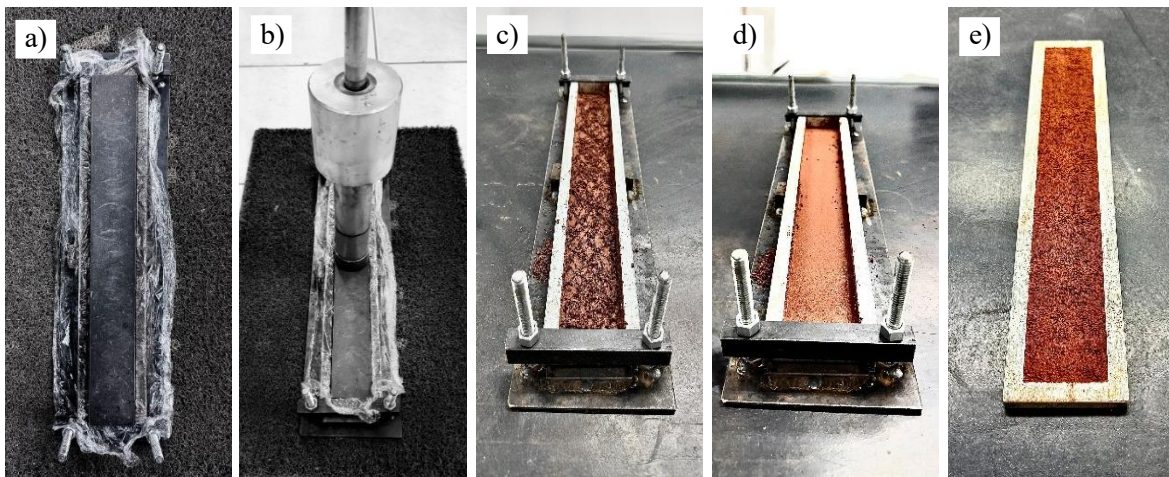


Figura 3.11 - Compactação do corpo de prova do ensaio LWT: a) Sistema montado; b) Encaixe do soquete no molde; c) Escarificação da primeira camada; d) Término da compactação; e) Corpo de prova moldado.

Para assegurar a adequada aderência entre as camadas, realizou-se a escarificação da superfície da primeira camada, conforme ilustrado na Figura 3.11c. Em seguida, adicionou-se a segunda camada de solo e procedeu-se à compactação final, concluindo-se o processo com o arrasamento da superfície mediante o uso da régua biselada.

b) Metodologia do ensaio

Após a moldagem e conferência do controle de compactação, o corpo de prova confinado no molde foi curado pelo período de 7 dias. A cura foi realizada com o corpo de prova na posição horizontal, invertendo a face a cada dia para homogeneizar a umidade em toda a superfície.

O ensaio baseou-se em referências como Malko et al. (2015) e Silveira et al. (2024) que realizaram para corpos de prova em solos, entretanto, foram feitas algumas modificações na

metodologia e modo de análise dos resultados. Para fins de explicação, a Figura 3.12 apresenta o equipamento com suas partes e peças necessárias.

O procedimento de ensaio consiste em: i) Com o auxílio de um macaco hidráulico (12), levanta-se o recipiente (01) com a carga programada de ensaio; ii) Pesa-se o conjunto solo/molde, em seguida coloca-se encaixado na estrutura do equipamento (11) e presos com parafusos acoplados tipo borboleta; iii) Fixa-se o relógio comparador digital para se realizar a leitura zero de desgaste, certificando-se de manter o lugar para as demais leituras, retirando o relógio do trilho da roda em seguida; iv) Abaixa-se o macaco hidráulico (12) para que a roda fique em contato com o corpo de prova; v) Ajusta-se no painel de controle (05) para 250 ciclos, correspondendo a 500 passadas de roda no corpo de prova; vi) Realiza-se, após as passadas, a primeira leitura do relógio amostrador, colocando novamente 250 ciclos; vii) Após a realização de 1250 ciclos, 2500 passadas, realiza-se a última leitura no relógio, retira-se o corpo de prova e pesa-se o conjunto.

De forma a manter o grau de saturação para todos os corpos de prova ensaiados, os de solo puro foram deixados em um ambiente controlado até que se obtivesse, por massa prevista, o mesmo grau de saturação dos corpos de prova curados ao ar para serem ensaiados. Essa técnica foi utilizada porque não foi possível, devido a espessura do corpo de prova, realizar a técnica de imersão, adotada em todos os ensaios mecânicos dessa pesquisa.

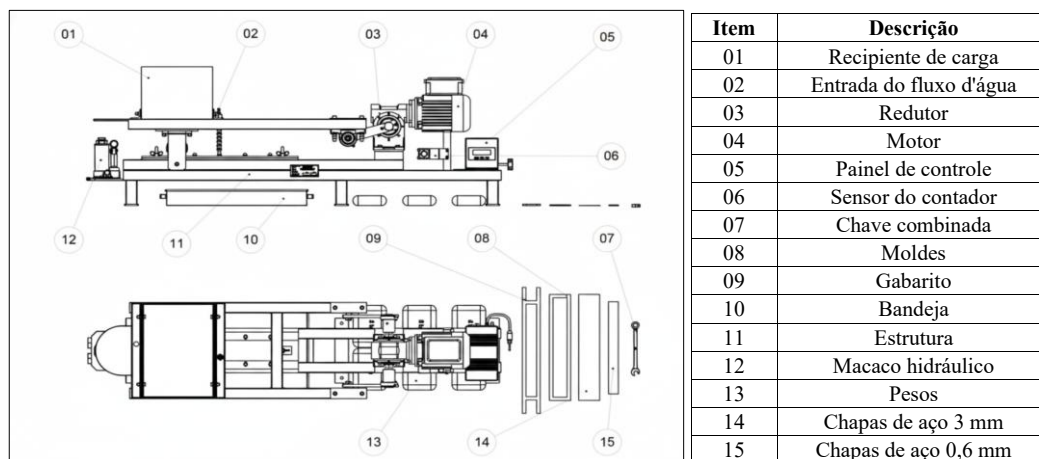


Figura 3.12 - Peças e partes do equipamento LWT (Solotest, s.d.)

Além disso, foi ensaiado para o solo puro uma condição logo após a moldagem, para se comparar os resultados obtidos. Ressalta-se que foram ensaiados dois corpos de prova para cada condição, mantendo-se o peso de 56 kg para as condições avaliadas (SP-Wot, SP-S, SE-0.5 e SE-8.55).

3.12 ENSAIOS PARA AVALIAÇÃO MICROESTRUTURAL

A investigação da microestrutura dos compósitos foi conduzida de maneira a verificar as variações na distribuição de poros e arranjo estrutural causados pela inserção do estabilizante, já que o mecanismo fundamental de atuação consiste na aproximação das partículas do solo.

Para isso, primeiramente foi feita análise por meio de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) acoplado com Espectroscopia de Energia Dispersiva (EDS), realizadas no Laboratório de Microscopia e Microanálise do Instituto de Ciências Biológicas (IB/UnB). O equipamento utilizado foi o microscópio eletrônico da marca JEOL, modelo JSM-7001F.

O equipamento utiliza de feixe de elétrons de alta energia e pequeno diâmetro para a geração de sinais na superfície de amostras sólidas, analisando a amostra ponto a ponto, por linhas sucessivas. Os dados são coletados de uma área selecionada e uma imagem bidimensional é formada. Para amostras não condutoras de eletricidade, como solos, é necessário recobri-las em superfície com material condutor, utilizando-se da metalização por ouro.

As amostras ensaiadas neste trabalho foram retiradas dos corpos de prova com e sem enzima, retirou-se apenas um fragmento, com cerca de 5mm de espessura, considerando o período de cura de 7 dias. No caso do solo puro, retirou-se após a moldagem.

Já os ensaios de Porosimetria por Intrusão de Mercúrio (PIM) foram realizados no Laboratório do Instituto de Física de São Carlos, da USP, utilizando o equipamento Micromeritics Poresizer, de modelo 9320 V2.04. O ensaio foi realizado conforme ASTM D440 (2018), e consiste na intrusão de mercúrio, sendo necessário a aplicação de pressão externa para que ele penetre nos poros. À medida que a pressão aumenta, o mercúrio invade poros cada vez menores, permitindo relacionar a pressão aplicada ao diâmetro dos poros. A partir do volume de mercúrio intrudido, obtêm-se parâmetros como o diâmetro médios dos poros e sua frequência de distribuição. Os corpos de prova utilizados foram moldados em moldes cilíndricos de dimensão 100 x 50 (mm), sendo que para os estabilizados foram deixados em cura pelo período de 7 dias.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA, CLASSIFICAÇÃO E COMPACTAÇÃO DO SOLO

A Tabela 4.1 apresenta os resultados da caracterização física do solo, incluindo a análise do pH, enquanto a curva granulométrica com e sem o uso de defloculante é apresentada na Figura 4.1, com sucessiva análise incluindo as porcentagens passantes de cada fração granulométrica, parâmetros e classificação do solo na Tabela 4.2.

Tabela 4.1 - Caracterização física do solo puro

Parâmetros do solo puro	Valor
Massa Específica dos Grãos - ρ_s (g/cm ³)	2,61
Limite de Liquidez - LL (%)	44
Limite de Plasticidade - LP (%)	39
Índice de Plasticidade - IP (%)	5
pH em KCl	6,07
pH em H ₂ O	7,04
Δ pH	-0,97

A massa específica dos grãos (ρ_s) igual a 2,61 g/cm³ situa-se dentro da faixa comumente reportada por trabalhos na região do distrito federal Borges (2014); Delgado (2007); Pierozan (2018), refletindo uma composição mineralógica típica, sem indicação da presença significativa de minerais de maior densidade.

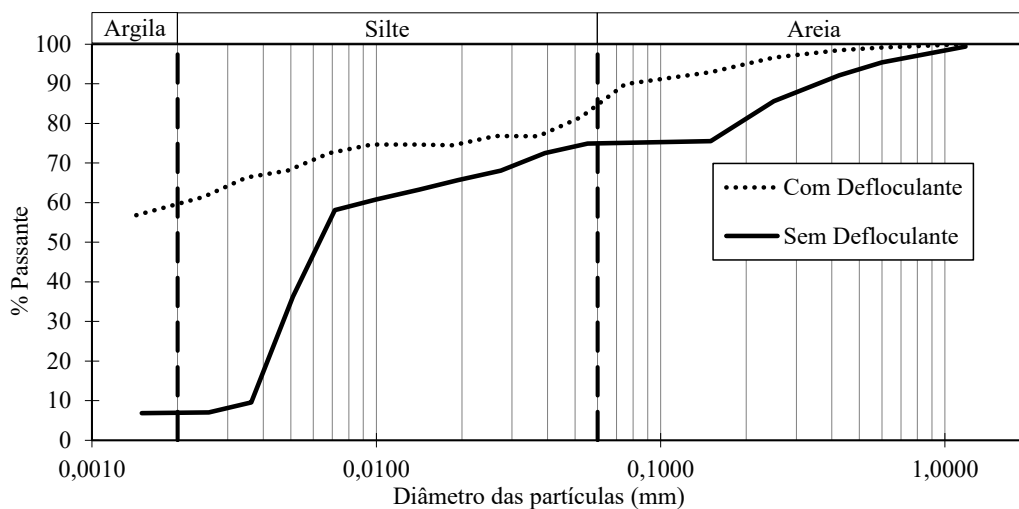


Figura 4.1 - Curva granulométrica do solo.

Em relação ao pH, de modo geral, solos tropicais tendem a apresentar caráter ácido, em função da elevada taxa de intemperismo e da rápida degradação da matéria orgânica, associada à presença de CO₂ nos meios tropicais, segundo Cardoso (2002), que reportam valores de pH tipicamente variando entre 5,5 e 6,0. No entanto, o solo estudado neste trabalho apresenta caráter praticamente neutro. Esse comportamento pode estar relacionado à mineralogia predominante do material, resultante do intemperismo de rochas características da região, associadas a um baixo grau de metamorfismo, o que pode contribuir para uma menor acidificação do meio. Assim, o pH observado reflete não apenas as condições climáticas tropicais, mas também as particularidades geológicas e mineralógicas locais.

Tabela 4.2 - Porcentagem passante nas peneiras e classificação do solo

Composição e parâmetros	Valor	
	Com defloculante	Sem defloculante
% Passante #2 1/2"	100,00	100,00
% Passante #4,8 mm	100,00	100,00
% Passante #2,0 mm	100,00	100,00
% Passante #0,42 mm	98,44	92,12
% Passante #0,075 mm	89,94	67,82
% Areia Grossa	0,86	4,62
% Areia Média	2,49	9,76
% Areia Fina	15,09	10,73
% Silte	20,15	67,83
% Argila	61,41	7,06
Diâmetro Efetivo - D10 (mm)	-	0,0037
Coefficiente de Não Uniformidade - Cu	-	2,3
Coefficiente de Curvatura - Cc	-	0,7
Classificação AASHTO = A-5		
Classificação SUCS = ML		
Classificação MCT = LG'		
Perda por imersão - PI (%)		60,37
Coefficiente de classificação - c' (mm)		2,26
Coefficiente angular da reta - d' (kg/m ³)		38,96
Índice de classificação - e'		1,04

Como pode ser observado na Figura 4.1, a curva granulométrica do solo apresenta o comportamento típico de solos lateríticos, nos quais as partículas de argila tendem a se agrupar em grumos devido à atração eletrostática e à presença de óxidos e hidróxidos de alumínio e ferro. Nessa condição, sem o uso de defloculante, a argila permanece aglomerada e os grumos são interpretados como partículas de maior diâmetro. Por outro lado, a aplicação de defloculante neutraliza essas ligações, inibe a floculação e promove a dispersão das partículas finas em suspensão, fazendo com que os grumos se desagreguem e revelem o verdadeiro tamanho dos

grãos e partículas do solo. Este fato fica evidente ao analisar-se a porcentagem de argila presente no material na Tabela 4.2, de forma que com defloculante cerca de 61% de material classificado como fração argila, e sem defloculante cerca de 7%.

Com bases nos resultados supracitados, pode-se realizar a classificação tradicional do solo, sendo classificado pelos sistemas SUCS e AASHTO como siltoso de baixa compressibilidade (ML) e A-5, respectivamente. Além das classificações tradicionais, é apresentada a metodologia MCT, sendo o solo considerado LG', ou seja, laterítico argiloso. De acordo com a normativa DNIT 259/2023 – CLA, esse tipo de solo possui baixa expansão, baixa perda de suporte, baixa a alta contração, baixa permeabilidade e média a alta plasticidade.

Ressalta-se que a metodologia MCT, por considerar o comportamento mecânico e hidráulico do solo para sua classificação, se mostra uma abordagem mais representativa para os solos tropicais brasileiros, visto que as outras abordagens, por serem idealizadas em solos de clima temperado, não representam as peculiaridades de evolução pedogenética encontradas nos solos de zonas tropicais e subtropicais (VILLIBOR; ALVES, 2019).

A Figura 4.2 apresenta as curvas de compactação do solo estudado, obtidas nas energias de compactação normal e intermediária. Também estão representados os parâmetros obtidos, isto é, massa específica seca máxima e o teor de umidade ótimo. Acrescenta-se ainda os valores de índice de vazios (e) para fins ilustrativos.

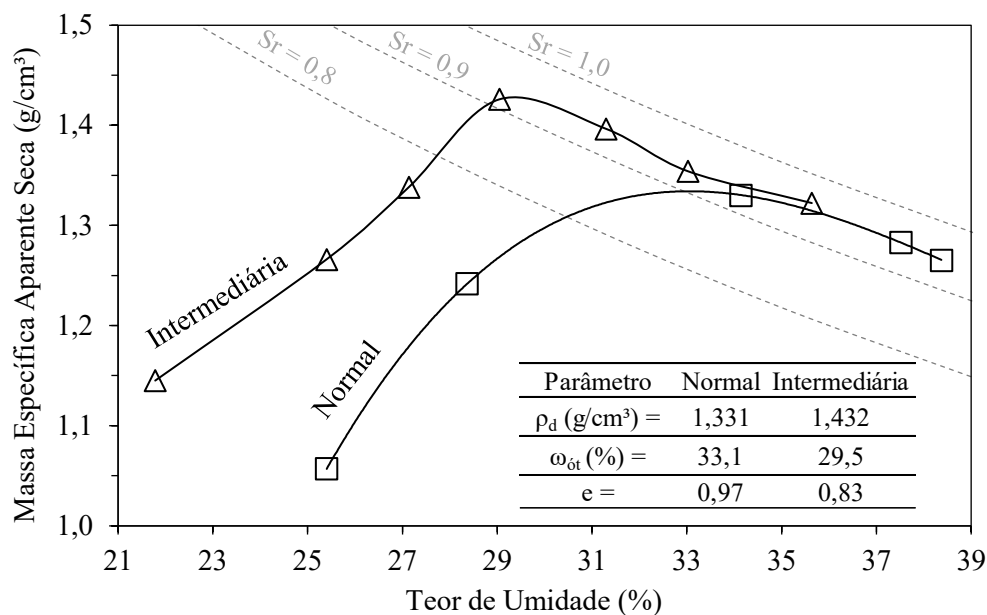


Figura 4.2 - Curva de compactação do solo.

Observa-se um aumento da massa específica seca máxima com a elevação da energia de compactação do Proctor Normal para o Proctor Intermediário, passando de 1,33 g/cm³ para 1,43 g/cm³, concomitantemente à redução do teor de umidade ótima. Ambos os comportamentos estão associados à maior aproximação entre as partículas do solo, o que promove maior densificação do material e redução do volume de vazios passíveis de preenchimento por água (OTÁLVARO et al., 2015). Ainda assim, nota-se elevado índice de vazios mesmo na energia intermediária, indicativo da presença significativa de microporos na estrutura do solo, os quais, mesmo sob maiores energias de compactação, não são mobilizados de forma efetiva, limitando ganhos adicionais de densificação (DE OLIVEIRA et al, 2022).

4.2 DIFRAÇÃO DE RAIOS-X (DRX)

A Figura 4.3 apresenta o difratograma obtido no DRX, por meio do qual foi possível identificar a composição mineralógica do solo puro.

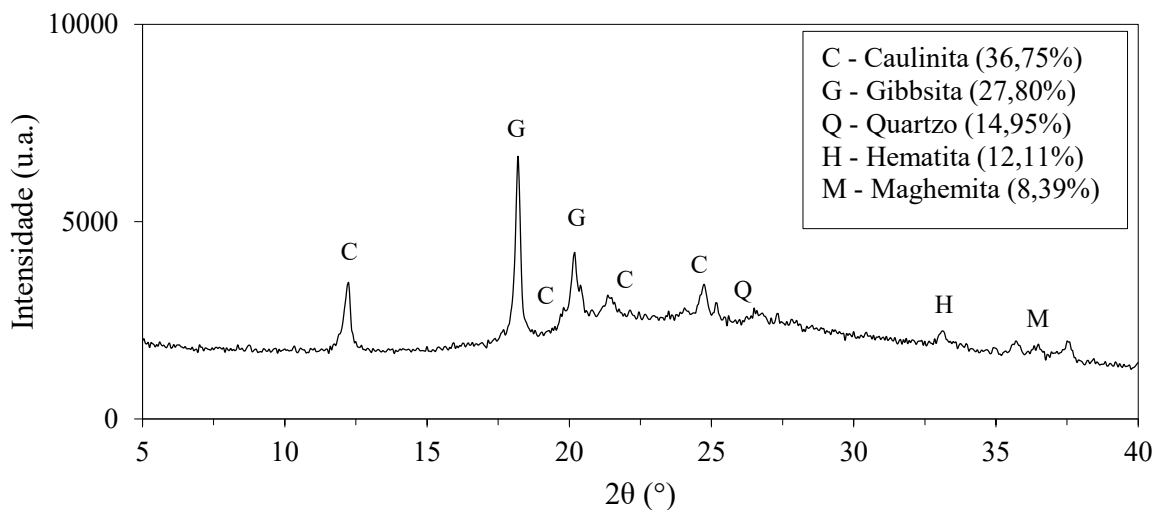


Figura 4.3 - Difração de Raio-X do solo puro.

A partir da interpretação dos picos de difração, observou-se que composição mineralógica é formada predominantemente por 36,75% de caulinita [Al₂Si₂O₅(OH)₄], 27,80% de gibbsita [Al(OH)₃], 14,95% de quartzo [SiO₂], 12,11% de hematita [Fe₂O₃] e 8,39% de maghemita [γ -Fe₂O₃]. Essa constituição indica que o solo passou por um intenso processo de intemperismo químico, responsável pela formação de minerais secundários estáveis, como a caulinita, gibbsita, hematita e maghemita. De acordo com Pierozan (2018), o feldspato potássico (K-feldspato), sob ação prolongada do intemperismo, sofre processos de hidrólise sucessiva,

originando primeiramente illita, depois caulinita ou esmectita, e, em estágios mais avançados, gibbsita. Essa sequência mineralógica reflete o grau evolutivo do intemperismo e confirma a natureza altamente lixiviada e aluminosa do solo em estudo. Essas evidências corroboram as análises feitas quanto a granulometria e a classificação MCT do solo em estudo.

A presença expressiva de quartzo é igualmente característica de solos lateríticos, uma vez que esse mineral apresenta alta resistência à decomposição química e tende a permanecer como componente dominante na fração arenosa (VILLIBOR et al., 2009).

4.3 ENSAIOS QUÍMICOS

4.3.1 FTIR

A Figura 4.4 apresenta os espectros obtidos Espectroscopia de Infravermelho por Transformada de Fourier – FTIR, considerando o solo puro, enzima isolada e solo estabilizado com a maior concentração de enzima (8,55%).

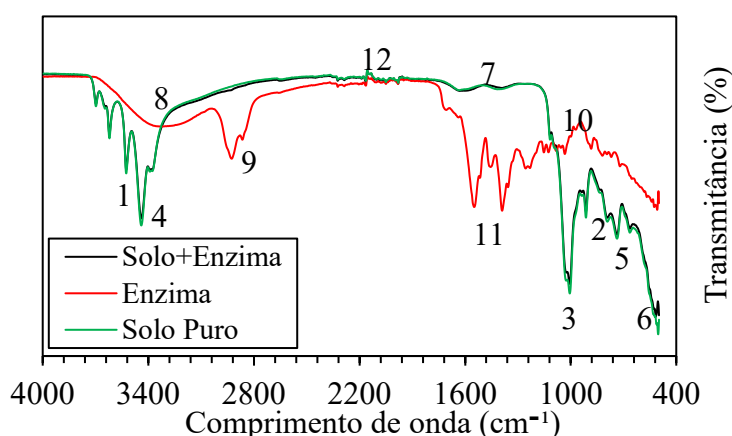


Figura 4.4 - Espectroscopia de infravermelho (FTIR) das amostras.

Para o solo puro, observa-se uma banda de vibração do radical hidroxila na região de 3600 cm^{-1} [pico 1], atribuída à vibração de alongamento do grupo Al-Fe-OH. Essa vibração indica a substituição de Fe^{+3} por Al no nível octaédrico da caulinita. Além disso, as bandas localizadas entre 800 cm^{-1} e 1200 cm^{-1} [pico 2] correspondem às ligações Al-O e Si-O, características dos argilominerais do tipo caulinita (CALLAI, 2021; CHERATA, 2016; NGUYEN et al., 1991).

A presença de um pico bem definido em 1005 cm^{-1} [pico 3] confirma o estiramento Si-O, típico de silicatos minerais, e evidencia a predominância da fração silicatada mineral do solo,

representando grupos estruturais Si-O-Si e Si-O-Al (MADEJOVÁ, 2003). Essa mesma banda também pode estar associada a vibrações características da gibbsita.

A banda próxima de 3625 cm^{-1} [pico 4] está relacionada às vibrações de hidroxilas estruturais, típicas de gibbsitas sintéticas e naturais, e corresponde ao estiramento de grupos OH mono-coordenados (MOLIS et al., 2000; POZZA et al., 2009). As bandas localizadas próximas de 712 cm^{-1} e 779 cm^{-1} [pico 5] são atribuídas ao quartzo, correspondendo às vibrações das ligações de SiO₂.

Na região de 500 cm^{-1} [pico 6], observa-se uma banda associada à presença de maghemita ou hematita. Essa banda indica o modo de deformação angular Fe-O, podendo também refletir traços residuais de magnetita ou maghemita (JUBB E ALLEN, 2010; SENTHIL KUMAR E RAJKUMAR, 2014).

Por fim, as ondulações observadas nas regiões próximas a 1650 cm^{-1} e 1400 cm^{-1} [pico 7] são geralmente atribuídas à deformação angular da molécula de água adsorvida (H-O-H). Essa mesma região pode incluir contribuições de vibrações C=O, associadas à matéria orgânica presente no solo (PARIKH et al., 2014; VOLKOV et al., 2021).

Quanto ao FTIR obtido para o estabilizante enzimático, o mesmo comportamento de banda já foi reportado por Nadeem et al. (2023) ao estudar o estabilizante enzimático de nome comercial TerraZyme. Observa-se uma banda larga em torno de 3400 cm^{-1} [pico 8], atribuída às vibrações de estiramento das ligações O-H e N-H, característica típica de formulações contendo proteínas e açúcares (RANGEL VÁZQUEZ et al., 2009). Além disso, verificam-se bandas associadas aos estiramentos C-H alifáticos (CH₃ e CH₂) em torno de 2800 cm^{-1} [pico 9] as quais são características de cadeias orgânicas presentes em componentes proteicos (PACHECO, 2024).

Na faixa em torno de 1000 cm^{-1} [pico 10], conforme descrito por Rozenberg et al. (2019), ocorrem vibrações atribuídas às ligações de açúcares, poliol e éteres, indicando possíveis interações entre proteínas e carboidratos. Essa região apresenta múltiplos picos e ombros, em concordância com os resultados relatados por Natalello et al. (2005), que associam tais sinais à presença de compostos hidroxilados e grupos funcionais típicos de produtos orgânicos.

Ainda, observa-se uma banda intensa em torno de 1600 cm^{-1} [pico 11], correspondente à banda Amida I, associada ao estiramento da ligação C=O da amida. De acordo com Jackson e Mantsch (1995), essa absorção, juntamente com a banda Amida II, relacionada às vibrações

de flexão N–H e estiramento C–N (ANDRADE et al., 2019). Essa banda confirma a presença de proteína ativa na amostra e indica que a estrutura peptídica da enzima permanece intacta, evidenciando que não ocorreu desnaturação significativa.

Por fim, observa-se na espectroscopia do solo estabilizado com enzima comportamento semelhante ao do solo puro, sem o aparecimento de novas bandas ou deslocamentos significativos, apenas uma suavização em alguns picos. Esse resultado sugere que a enzima foi adsorvida ou fisicamente retida pelo solo, sem, contudo, promover modificações detectáveis na estrutura química dos minerais nem originar bandas características próprias. Tal evidência indica que ocorreu predominantemente uma interação superficial, e não uma reação química direta entre a enzima e os constituintes minerais do solo.

Outra hipótese a ser considerada é que, devido à baixa concentração enzimática, o sinal orgânico tenha ficado abaixo do limite de detecção do ensaio. Além disso, a fixação das proteínas nas superfícies minerais tende a reduzir sua mobilidade vibracional, o que enfraquece as bandas amida e, conseqüentemente, dificulta sua detecção espectroscópica.

A ausência de alterações expressivas, ou a ocorrência apenas de mudanças sutis, nas bandas após o processo de estabilização é um comportamento já esperado e relatado na literatura. Thomas e Rangaswamy (2021), por exemplo, investigaram a aplicação de enzimas em dois contextos: estabilização do solo utilizando apenas a enzima e estabilização combinada com cimento. Em ambos os casos, não foram observadas modificações significativas nas bandas obtidas por FTIR.

Por outro lado, Deylaghian et al. (2025) observaram alterações perceptíveis nos picos espectrais ao comparar amostras estabilizadas e não estabilizadas, atribuindo essas diferenças à formação de novas ligações interparticulares associadas à precipitação de cálcio durante o processo de biocimentação.

Além disso, observa-se para os três materiais a presença de ondulações na faixa entre 1900 cm^{-1} e 2400 cm^{-1} [pico 12], compatível com variações na concentração de CO_2 , o que causa interferência nessa região do espectro.

4.3.2 FLUORESCÊNCIA DE RAIOS-X (FRX)

A composição química determinada por meio do ensaio de FRX para óxidos maiores é apresentada na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 - Composição química presente no solo e na enzima pelo ensaio FRX

Condição	Compostos Químicos (%)											
	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	TiO ₂	CaO	K ₂ O	MgO	MnO	Na ₂ O	P ₂ O ₅	SO ₃	LOI ¹
Experimental												
Solo	41,40	15,17	14,63	2,23	1,86	0,22	<LQ ²	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	23
Enzima	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	0,42	<LQ	<LQ

¹Perda ao Fogo; ²Abaixo do limite de quantificação.

Para o solo puro, observa-se que o composto predominante é o óxido de alumínio (Al₂O₃), com teor de 41,40%, o que indica um material de natureza altamente aluminosa, típico de solos argilosos ricos em caulinita e gibbsita, em concordância com os resultados de mineralogia. Além disso, verifica-se uma presença significativa de óxidos de ferro (Fe₂O₃) com 15,17%, associados principalmente às fases hematita e maghemita, responsáveis pela coloração avermelhada do solo. A presença de sílica (SiO₂) com 14,63%, representada pelo quartzo, também é expressiva e está relacionada à elevada resistência ao intemperismo químico desse mineral, conforme já evidenciado na análise de DRX, apresentando 14,95%, em conformidade com a análise realizada.

Complementarmente, o solo apresentou teores menores de dióxido de titânio (TiO₂) com 2,23%, atribuídos à presença de minerais acessórios como anatásio ou ilmenita, e pequenas quantidades de óxido de cálcio (CaO) com 1,86% e óxido de potássio (K₂O) com 0,22%, sugerindo baixa contribuição de minerais carbonáticos e feldspatos potássicos. O valor elevado de perda ao fogo (23,65%) indica a presença de água estrutural nas argilas, matéria orgânica e possíveis voláteis, conforme Pierozan (2018), possivelmente em solos lateríticos esse valor está associado a água presente nos poros de menores dimensões e da matéria orgânica presente nos horizontes mais superficiais.

No caso da enzima, observa-se que praticamente todos os compostos, com exceção do óxido de sódio (Na₂O), apresentaram valores abaixo do limite de quantificação (LQ), a presença desse composto sugere que a enzima contém sais solúveis de sódio, não comum para amostras de enzima pura. No entanto, importante frisar que o composto comercial contém aditivos, em segredo industrial, que foram acrescidos no estabilizante enzimático.

O elevado valor de perda ao fogo (LOI) indica que a amostra é composta quase integralmente por matéria volátil, ou seja, material orgânico que se degrada ou evapora durante o aquecimento. Esse resultado, em concordância com o obtido no ensaio de FTIR, confirma que a amostra enzimática possui natureza predominantemente orgânica.

A pequena fração de óxido de sódio detectada pode estar associada à presença de sais residuais ou traços minerais provenientes do processo de fabricação. Como todos os demais óxidos apresentaram concentrações inferiores ao limite de detecção, conclui-se que o produto não introduz carga mineral significativa mensurável por FRX, corroborando seu caráter essencialmente orgânico.

Além da análise dos óxidos maiores, também foi possível analisar no ensaio os elementos menores, os quais são apresentados na Tabela 4.4 apenas para os elementos encontrados, com quantificação em partes por milhão (ppm). Apesar do solo apresentar elementos traços mensuráveis, ressalta-se que são apenas de minerais acessórios ou fontes litológicas que fornecem esses elementos.

Dos valores encontrados, percebe-se a ausência de metais na amostra de enzima, sugerindo que o produto não introduz cargas metálicas mensuráveis ao solo nas quantidades estudadas, informação relevante para avaliação de impacto ambiental da estabilização, já que a estabilização por enzima é amplamente reconhecida como *eco-friendly*. Além disso, qualquer alteração química observada no solo estabilizado não decorre da adição de metais, mas de outro processo decorrente da adição do produto.

Tabela 4.4 - Análise química por FRX dos elementos menores no solo e na enzima

Condição	Elementos químicos (ppm)												
	Sr	V	Cr	Ni	Cu	Zn	Ga	As	Sr	Y	Zr	Nb	Th
Solo	37	311	192	26	24	19	52	22	26	26	488	34	36
Enzima	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ

4.3.3 ICP/OES

Assim como o ensaio de FRX, a análise Espectrométrica de Emissão Óptica com Plasma Indutivamente Acoplado (ICP-OES) permite a identificação e a quantificação dos elementos químicos presentes nos materiais em estudo. No entanto, o ICP-OES apresenta maior sensibilidade e precisão na determinação de elementos em baixas concentrações, possibilitando a detecção de elementos traço que, em alguns casos, não são identificados ou são quantificados com menor exatidão pela técnica de fluorescência de raios-X. Além disso, o ICP-OES permite uma análise multielementar com elevada reprodutibilidade, sendo amplamente utilizado para a caracterização química detalhada de materiais geotécnicos e solos estabilizados (HOLLER et al., 2009).

A composição química determinada por meio do ensaio de ICP/OES é apresentada na Tabela 4.5. Os resultados obtidos por meio da análise ICP-OES mostram-se análogos àqueles verificados no ensaio de FRX para o solo no estado natural, indicando coerência entre as técnicas empregadas. No entanto, destacam-se os resultados referentes à enzima pura, uma vez que, devido à maior sensibilidade analítica do método ICP-OES em comparação ao FRX, foi possível identificar a presença de outros elementos químicos além do óxido de sódio.

Tabela 4.5 - Composição química presente no solo e na enzima pelo ensaio ICP/OES

Condição	Compostos Químicos (%)											
	Al ₂ O ₃	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	CaO	TiO ₂	K ₂ O	Na ₂ O	MgO	MnO	P ₂ O ₅	SO ₃	LOI ¹
Solo	42,8	18,4	14,2	2,3	2,0	1,4	0,5	0,2	<LQ ²	<LQ	<LQ	18,3
Enzima	0,3	0,7	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	8,2	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	90,8
Solo+Enzima	49,0	18,4	16,9	0,3	2,4	<LQ	0,2	0,1	<LQ	<LQ	<LQ	12,7

1: Perda ao Fogo; 2: Abaixo do limite de quantificação.

Observa-se, ainda, que o teor de óxido de sódio (Na₂O) identificado pelo ICP-OES é superior ao obtido pelo ensaio de FRX, o que é atribuído à maior capacidade do ICP-OES em quantificar elementos presentes em baixas concentrações. A presença significativa de sódio, provavelmente na forma de sais solúveis, mostra-se compatível com os valores elevados de pH verificados nesta pesquisa e apresentados na Tabela 3.1, indicando um meio alcalino associado à formulação da enzima.

A análise química do solo estabilizado indica que a adição da enzima não promoveu alterações significativas na composição mineralógica do material, permanecendo como constituintes majoritários os óxidos de alumínio, silício e ferro, característicos do solo no estado natural. Esse resultado evidencia que a estabilização enzimática não atua por meio da formação de novos compostos minerais, mas sim por mecanismos associados à modificação físico-química da estrutura do solo.

Em continuidade, nota-se redução da perda ao fogo (LOI) no solo estabilizado em relação ao solo puro, sugerindo que a incorporação da enzima não resultou em aumento do teor orgânico final do sistema após o período de cura, possivelmente em razão da menor degradação ou incorporação da fração orgânica volátil à matriz do solo.

O teor de óxido de sódio identificado no solo estabilizado apresenta valor reduzido quando comparado à enzima pura, indicando que parte do sódio adicionado não permanece livre no sistema durante o período de cura, podendo estar associada a processos de adsorção, troca iônica ou lixiviação. Ainda assim, a presença residual de sódio é suficiente para alterar o

equilíbrio eletroquímico das partículas de argila, o que é esperado que contribua para a reorganização microestrutural do solo.

4.3.4 ANÁLISE ELEMENTAR CNH

A Tabela 4.6 apresenta os resultados da análise elementar de Carbono (C), Hidrogênio (H) e Nitrogênio (N) do estabilizante à base de enzima, expressos em porcentagem em relação a massa. A predominância de carbono e hidrogênio indica que o estabilizante possui composição majoritariamente orgânica, característica central dos produtos classificados como estabilizantes enzimáticos ou bioquímicos (FADEEVA et al., 2008). Essa composição sugere a presença de estruturas moleculares ricas em ligações C-C e C-H, típicas de substâncias de origem biológica ou biopolimérica, interpretação que se mostra coerente com os resultados obtidos no ensaio de FTIR.

Tabela 4.6 - Análise elementar de Carbono, Hidrogênio e Nitrogênio

Enzima	Carbono (%)	Hidrogênio (%)	Nitrogênio (%)
	54,99	8,42	0,15

No espectro de FTIR, observaram-se bandas na região de aproximadamente 2800 a 3000 cm^{-1} , associadas a vibrações de estiramento de ligações C-H, comumente atribuídas a deformações angulares de grupos CH_2 e CH_3 . Esses resultados corroboram a presença de cadeias orgânicas hidrogenadas, em consonância com os teores de carbono e hidrogênio quantificados na análise elementar.

O teor de nitrogênio observado é relativamente baixo, o que sugere que a fração proteica associada à enzima se encontra diluída na formulação analisada, uma vez que enzimas apresentam natureza predominantemente proteica, sendo constituídas por aminoácidos que contêm nitrogênio em sua estrutura molecular (PALLARDY, 2008).

Ressalta-se, entretanto, que a análise CHN, assim como o FTIR, não permite identificar de forma conclusiva a natureza ou o mecanismo de atuação dos compostos presentes, limitando-se à caracterização química geral do material.

4.3.5 DSC/TG

A Figura 4.5 apresenta os dados referentes às análises DSC/TG, sendo que a Figura 4.5a representa os resultados obtidos na etapa termogravimétrica (TG) e a Figura 4.5b corresponde à calorimetria exploratória diferencial (DSC).

Os resultados apresentados demonstram que o comportamento térmico da amostra de enzima está em concordância com outros ensaios químicos que também requerem aquecimento da amostra, como o ensaio de FRX. Observa-se perda de massa expressiva em temperaturas relativamente baixas e massa residual reduzida ao final do ensaio, indicando a predominância de componentes voláteis.

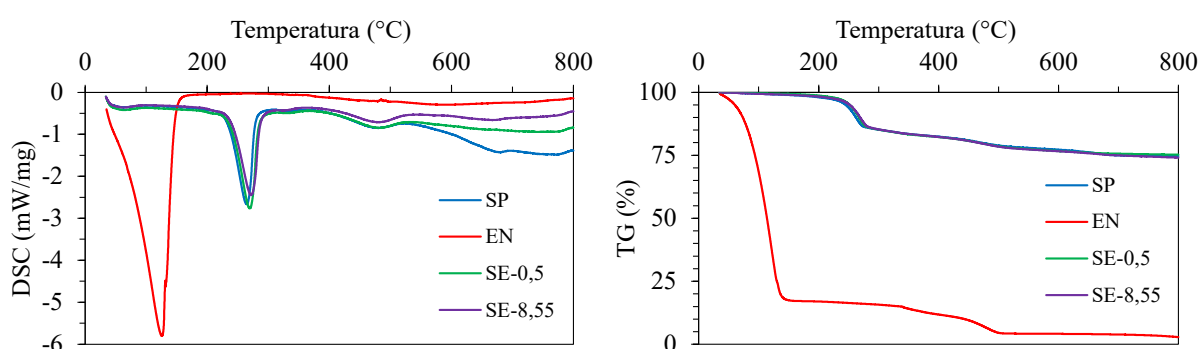


Figura 4.5 - Gráficos do ensaio de DSC/TG: a) DSC; b) TG.

Já o solo puro apresentou perda de massa característica de materiais predominantemente minerais, com variações associadas à eliminação de água em baixas temperaturas. Segundo Šimkovic et al. (2025), o primeiro pico, mais pronunciado, está associado à evaporação da água fracamente ligada, ocorrendo em torno de 100 °C, enquanto o evento observado por volta de 150 °C costuma corresponder à dessorção de água da superfície específica da fração argilosa e dos coloides do solo. Ainda, o pico identificado entre 200 e 260 °C apontam a correspondência deste com a perda de água na gibbsita, hidróxido este com presença significativa no solo estudado, enquanto o segundo pico, próximo a faixa de 570 °C pode ser um indicativo da perda de massa na caulinita por conta das reações endotérmicas de di-hidroxilação, que ocorre na faixa de 480 a 550 °C (FERREIRA et al., 2022). As curvas TG-DSC acima de 600 °C indicaram a ocorrência de eventos compatíveis com a decomposição de carbonatos ou de materiais acessórios (OLSZAK-HUMIENIK; JABLONSKI, 2015).

Para os compósitos, não se observaram alterações significativas no comportamento térmico global dos materiais. As curvas TG e DSC de SP, SE-0.5 e SE-8.55 apresentaram perfis

semelhantes, sem o surgimento de novos eventos térmicos claramente identificáveis ao longo da faixa de temperatura analisada. Além disso, os principais eventos térmicos ocorreram em faixas de temperatura próximas às observadas para o SP, com pequenas variações nas temperaturas de pico e nas áreas associadas aos eventos registrados. Essas variações indicam que a incorporação do estabilizante, nos teores avaliados, não resultou na formação de novas fases termicamente detectáveis nas condições do ensaio. Ademais, não foram observados eventos térmicos adicionais na faixa de temperatura usualmente associada à degradação significativa de matéria orgânica, sugerindo que o comportamento térmico das amostras é predominantemente controlado pela fração mineral do solo.

4.4 TEORES DE DOSAGEM

Nas Tabela 4.7 e Tabela 4.8 são apresentados os dados referentes aos parâmetros de moldagem e cura do solo estabilizado com diversos teores de enzima, os quais foram posteriormente rompidos na resistência à compressão simples. Vale mencionar que os compósitos foram moldados em triplicata para cada teor da solução estabilizante e adotado período de 14 dias de cura ao ar, sendo representado nas tabelas os parâmetros médios.

Nos dados de rompimento para a Tabela 4.7, pode-se observar que após o período de cura, os compósitos se encontram com uma umidade relativamente baixa, quando comparada ao teor de umidade de moldagem. Esse fato motivou a etapa de investigação considerando a etapa de imersão, a fim de verificar o reflexo dessas condições nas resistências à compressão simples.

Tabela 4.7 - Dados dos CPs rompidos na compressão simples na condição seca ao ar.

Corpos de prova	SP	SE-0.5	SE-2.8	SE-5.6	SE-8.55	SE-11.6	SE-14.8	SE-18.1
Dados da moldagem								
γ^d (g/cm ³)	1,42	1,44	1,43	1,43	1,43	1,44	1,43	1,41
η^2 (%)	45,57	44,91	45,09	45,25	45,30	44,95	45,25	45,94
ΔW^3 (%)	0,45	0,66	0,63	0,07	0,18	0,12	0,29	0,12
Sr^4 (%)	93,27	96,48	95,68	92,83	93,45	93,83	92,16	90,86
GC^5 (%)	99,1	100,3	100,0	99,7	99,6	100,2	99,7	98,4
Dados do rompimento								
γ^d (g/cm ³)	1,42	1,48	1,48	1,48	1,49	1,48	1,52	1,48
η^2 (%)	45,57	43,33	43,24	43,43	42,89	43,22	41,81	43,19
W^6 (%)	29,95	2,46	1,39	2,05	2,02	2,24	1,48	1,83
Sr^4 (%)	93,27	8,40	4,77	6,95	7,01	7,68	5,36	6,28

1: Massa Específica Seca; 2: Porosidade estimada; 3: Desvio da umidade; 4: Grau de Saturação; 5: Grau de Compactação; 6: Umidade.

Com a imersão pelo período de 4h, conforme Tabela 4.8, os materiais alcançaram um grau próximo ao da saturação (acima de 80%), em que se pressupõe tendência de comportamento de solo saturado, minimizando a influência da sucção. Acrescenta-se a isso que após a etapa de imersão, os compósitos não se desagregaram, fato esse que comprova a eficácia do agente estabilizante, já que para o solo puro ocorreu a completa desagregação ao ser colocado imerso.

Outro aspecto que merece menção é o aumento da massa específica seca observado nos corpos de prova ao longo do período de cura, podendo ser interpretado como reações físico-químicas que promovem uma estruturação interna, tornando o compósito mais denso e, conseqüentemente, favorece a tendência de suportar maiores cargas. Acredita-se que a perda gradual de água livre gere maior atração entre partículas, fazendo com que o solo tenha a tendência a contrair internamente, resultando em uma maior densificação aparente, reduzindo os vazios.

Tabela 4.8 - Dados dos CPs rompidos na compressão simples na condição imersa.

Corpos de prova	SP	SE-0.5	SE-2.8	SE-5.6	SE-8.55	SE-11.6	SE-14.8	SE-18.1
Dados da moldagem								
γ_d^1 (g/cm ³)	1,42	1,43	1,42	1,43	1,42	1,43	1,43	1,41
η^2 (%)	45,57	45,05	45,54	45,28	45,38	45,07	45,09	45,94
ΔW^3 (%)	0,45	0,78	0,39	0,01	0,06	0,32	0,26	0,37
Sr^4 (%)	93,27	96,30	93,18	92,92	92,77	94,78	92,86	91,65
GC^5 (%)	99,1	100,1	99,2	99,6	99,5	100,0	100,0	98,4
Dados do rompimento								
γ_d^1 (g/cm ³)	1,42	1,49	1,49	1,46	1,48	1,48	1,47	1,45
η^2 (%)	45,57	42,99	42,83	44,05	43,33	43,55	42,46	42,36
W^6 (%)	29,95	28,01	24,85	25,19	23,98	24,49	22,72	23,73
Sr^4 (%)	93,27	96,85	86,50	83,43	81,28	82,78	80,27	84,18

1: Massa Específica Seca; 2: Porosidade estimada; 3: Desvio da umidade; 4: Grau de Saturação; 5: Grau de Compactação; 6: Umidade.

A Figura 4.6 apresenta as curvas de tensão versus deformação obtidas para o solo estabilizado, rompidos sob as condições seco ao ar e imersa. Com base nesses resultados e os valores de pico, indicados na Tabela 4.9, a análise dos resultados revela, de forma geral, uma tendência de aumento gradual da resistência com o avanço da deformação axial.

Tabela 4.9 - Valores de resistência à compressão simples.

	Condição	SP	SE-0.5	SE-2,8	SE-5,6	SE-8.55	SE-11,6	SE-14,8	SE-18,1
RCS (MPa)	Seco ao ar	0,31	0,65	1,73	2,09	2,77	2,00	1,35	0,82
	Imerso	0,31	0,31	0,36	0,67	0,89	0,80	0,67	0,23

Os dois primeiros teores da solução enzimática resultaram em níveis de resistência comparáveis ao do solo puro quando submetidos à condição imersa, indicando que, aos 14 dias de cura, essas dosagens ainda não promovem melhorias significativas. Em contrapartida, na condição seca ao ar, observa-se incremento consistente na resistência já com a menor concentração testada, evidenciando o papel determinante da condição de umidade no desenvolvimento mecânico do material.

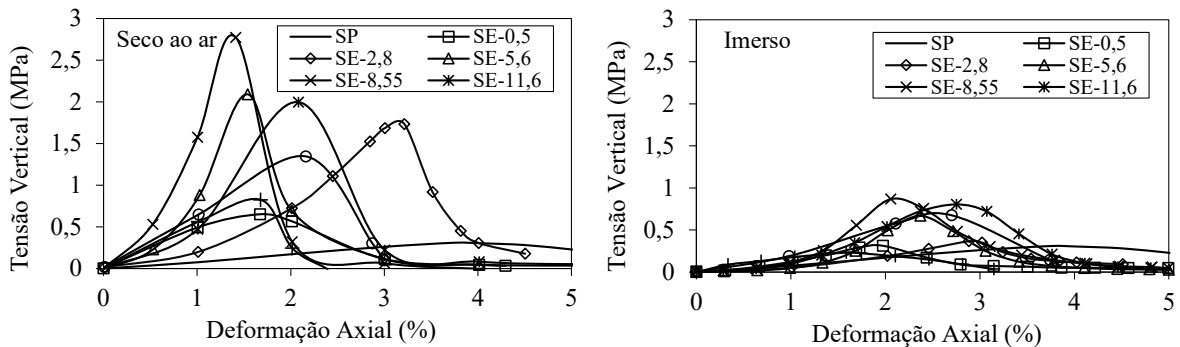


Figura 4.6 - Compressão simples inicial, considerando condição seca ao ar e imersa.

Diversos estudos na literatura têm avaliado a influência da estabilização enzimática no aumento da resistência à compressão simples de solos, utilizando diferentes dosagens do aditivo e períodos de cura. De modo geral, esses trabalhos reportam incrementos significativos de resistência quando comparados ao solo em estado natural, reforçando o potencial da técnica. Entretanto, a análise crítica das condições de ensaio adotadas é fundamental para a correta interpretação desses resultados.

Nesse contexto, Agarwal e Kaur (2014) , ao realizarem ensaios de compressão não confinada com período de cura de 7 dias, observaram que a maior dosagem de enzima aplicada (4 mL de enzima para cada 5 kg de solo) resultou em uma resistência à compressão simples de 2,075 MPa. Para a menor dosagem avaliada (0,25 mL para cada 5 kg de solo), foi obtido um valor de 1,471 MPa, ambos significativamente superior ao valor registrado para o solo puro, que apresentou resistência de 0,69 MPa.

De forma semelhante, Sampaio (2019) realizou ensaios com período de cura de 12 dias e verificou que, para a maior dosagem empregada (3% em relação à massa seca do solo), a resistência à compressão simples atingiu 2,23 MPa. Para a menor dosagem analisada (1% em relação à massa seca), o valor obtido foi de 2,15 MPa, em comparação à resistência do solo puro, que apresentou valor de 1,9 MPa.

Adicionalmente, Ravi Shankar et al. (2009) ao estudarem a estabilização enzimática de um solo laterítico com período de cura de 14 dias, encontraram, para a maior concentração avaliada (0,05 mL de enzima por 1 kg de solo), um valor de resistência à compressão simples de 0,51 MPa, enquanto o solo em estado natural apresentou resistência de apenas 0,14 MPa.

Apesar de os resultados reportados nesses estudos indicarem aumentos relevantes na resistência à compressão simples decorrentes da aplicação de enzimas, observa-se que os ensaios foram conduzidos predominantemente sem a realização de etapa de submersão dos corpos de prova. Dessa forma, os valores obtidos correspondem à condição seca ao ar, o que pode levar à superestimação do ganho de resistência quando considerada uma eventual situação de saturação.

Assim, diferentemente dos estudos, optou-se nesta pesquisa por utilizar a condição imersa como referência para a definição da concentração mais eficaz. Tal decisão considera as condições climáticas típicas do Brasil, onde o clima tropical, marcado por elevada pluviosidade, torna essa abordagem mais representativa das situações críticas encontradas em campo.

Dessa maneira, deu-se continuidade aos ensaios com os teores de 0,5% e 8,55% da solução enzimática. A escolha se justifica pelo comportamento observado: o teor de 8,55% apresentou os maiores valores de resistência sob condição imersa. Além disso, esse mesmo teor também resultou na maior resistência à compressão sob cura ao ar, indicando sua eficiência para ambas as condições investigadas, reforçando seu potencial.

Além disso, ressalta-se que, em aplicações correntes de estabilização enzimática, os teores recomendados são, em geral, bastante reduzidos, uma vez que a enzima atua predominantemente como agente catalisador, promovendo alterações físico-químicas na interação entre as partículas minerais mesmo em baixas concentrações. Entretanto, optou-se pela utilização de um teor significativamente superior ao usualmente recomendado (8,55%), associado à incorporação de aditivos, com o objetivo de investigar de forma exploratória o comportamento do produto quando presente em maiores concentrações. Essa abordagem buscou avaliar se o material poderia apresentar comportamento análogo ao de um polímero, haja visto a incorporação de aditivos pelo fabricante. Dessa forma, a utilização de teores elevados não tem como finalidade reproduzir condições usuais de campo, mas sim ampliar a compreensão dos mecanismos de atuação do produto e de suas possíveis influências no comportamento mecânico do solo estabilizado.

4.5 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA E COMPACTAÇÃO DO SOLO ESTABILIZADO

A Tabela 4.10 apresenta os resultados da caracterização física do solo estabilizado. O ensaio de massa específica dos grãos para o solo estabilizado com 8,55% não foi possível de ser realizado, devido a formação de demasiada espuma durante o ensaio, conforme Figura 4.7. Na ausência desse dado, optou-se por utilizar-se do valor referente ao solo puro.

Tabela 4.10 - Caracterização física do solo estabilizado

Parâmetros do solo estabilizado	Teor de enzima (%)		
	0	0,50	8,55
Massa Específica dos Grãos - ρ_s (g/cm ³)	2,61	2,58	-
Limite de Liquidez - LL (%)	44	39	40
Limite de Plasticidade - LP (%)	39	28	32
Índice de Plasticidade - IP (%)	5	11	8

Em comparação ao solo puro, o qual apresentou limite de liquidez igual a 44% e limite de plasticidade de 39%, os compósitos apresentaram alterações nesses parâmetros. No entanto, tais modificações já são esperadas e amplamente relatadas na literatura.



Figura 4.7 - Ensaio de massa específica para o solo estabilizado.

Muguda e Nagaraj (2019) observaram uma diminuição do limite de liquidez associada a um aumento do limite de plasticidade. Por sua vez, Ravi Shankar et al. (2009) verificaram apenas a redução do limite de liquidez, sem alterações significativas no limite de plasticidade, uma vez que, em algumas dosagens, ocorreu apenas um leve decréscimo desse parâmetro. Nadeem et al. (2023) relataram uma diminuição de ambos os limites de Atterberg, sendo mais expressivo no limite de liquidez, associando a capacidade do tratamento em modificar a distribuição granulométrica e melhorar sua trabalhabilidade.

Ainda, esse comportamento pode ser atribuído à neutralização parcial das cargas superficiais das partículas argilosas e à redução da capacidade de adsorção de água. Além disso, a natureza predominantemente orgânica da formulação pode contribuir para um efeito hidrofóbico, deslocando os limites de consistência para menores teores de umidade. Conforme Nadeem et al. (2023), diferentes enzimas podem apresentar afinidades distintas por diferentes solos, o que resulta em variações quando feito os limites de Atterberg.

Além da caracterização do solo estabilizado, a partir dos dois teores enzimáticos definidos anteriormente, 0,5% e 8,55%, construiu-se as curvas de compactação na energia intermediária e determinou-se os seus respectivos parâmetros, os quais são mostrados na Figura 4.8.

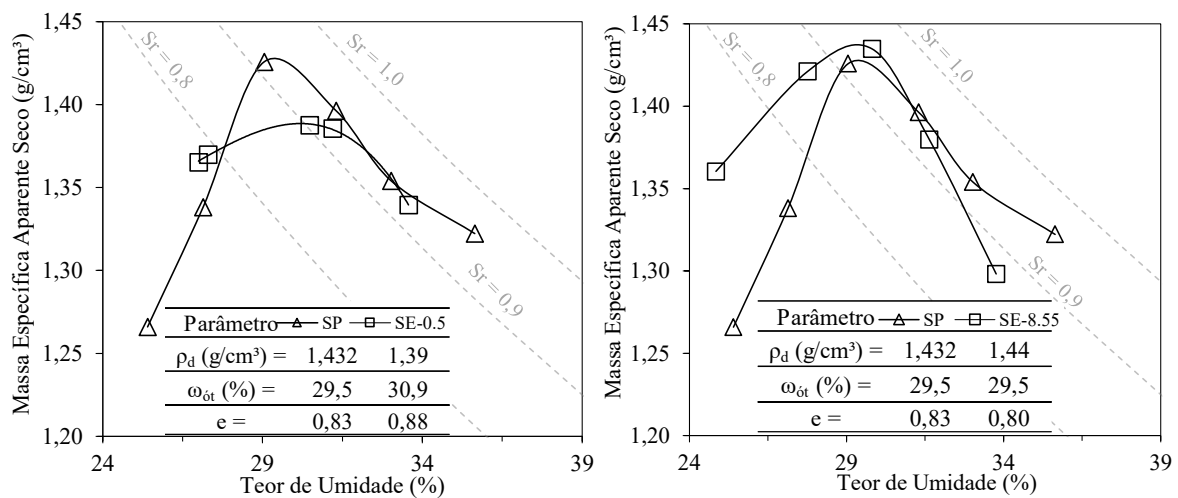


Figura 4.8 - Curvas de compactação do solo estabilizado SE-0.5 e SE-8.55.

Para os diferentes teores de enzima, observam-se comportamentos distintos quanto aos parâmetros de compactação. Para o teor de 0,5%, verifica-se aumento do teor de umidade ótimo, acompanhado de redução da massa específica aparente seca e elevação do índice de vazios. Esse comportamento pode ser atribuído à modificação parcial da carga superficial das partículas do solo promovida pela ação da enzima. Neste teor, a quantidade de estabilizante pode não ter suficiente para promover a neutralização efetiva das cargas superficiais negativas das partículas, o que aumenta a dependência da água, exigindo maior participação das moléculas no processo de interação entre os grãos, resultando em maior teor de umidade ótima.

Comportamento semelhante foi relatado por Rabbanifar et al. (2023), ao empregar uma dosagem única de enzima, observando os mesmos efeitos descritos. Entretanto, quando utilizada uma dosagem dupla, o autor constatou resultados análogos aos obtidos neste estudo para o teor de 8,55%, no qual se verificou um aumento da massa específica seca máxima,

enquanto a umidade ótima manteve-se próxima à observada para o solo puro. Esse resultado sugere que, em concentrações mais elevadas, a enzima atua de forma mais efetiva na reorganização e estabilização das partículas, favorecendo uma maior neutralização das cargas superficiais negativas e, por conseguinte, compactação mais eficiente e a formação de uma estrutura interna mais densa.

Ao se comparar os resultados aqui obtidos com os de outros pesquisadores, nota-se que não há consenso na literatura quanto aos efeitos das enzimas sobre as propriedades físicas do solo. Milburn e Parsons (2004), ao utilizarem a enzima de nome comercial Permazyme em solo silte arenoso observaram um leve aumento da densidade seca e uma pequena redução da umidade ótima, ambas na ordem de 1%. Sampaio (2019), ao utilizar outra enzima de nome comercial EMC Squared, verificou que, em baixas dosagens e sob energia Proctor normal, ocorre redução da massa específica aparente seca, enquanto dosagens mais elevadas resultam em incremento discreto, aproximando-se dos valores do solo natural. Rauch et al. (2002) ao trabalharem com um solo expansivo e adição de 0,002% de enzima em relação a massa seca de solo, relataram alterações pouco significativas nos parâmetros de compactação em comparação com o solo puro. Já Khan et al. (2020) identificaram um leve aumento na densidade seca e sugeriu que as enzimas ainda não haviam produzido mudanças químicas expressivas, devido à insuficiência do período de cura necessário para a atuação completa dos mecanismos enzimáticos, resultando apenas em uma aproximação parcial entre as partículas do solo.

4.6 INFLUÊNCIA DA CURA NA RCS

Após definidos os teores de dosagem e parâmetros de compactação, investigou-se o período de cura ideal para mobilizar ganhos de comportamento mecânico nos compósitos. Para isso, avaliou-se a resistência à compressão simples considerando os períodos de cura de 1, 3, 7 e 14 dias. Após feita a análise prévia dos resultados, optou-se por não realizar o ensaio após 14 dias, uma vez que a resistência a compressão simples começou a diminuir a partir do primeiro dia. Os parâmetros de moldagem dos compósitos são apresentados nas Tabela 4.11 e Tabela 4.12.

Tabela 4.11 - Corpos de prova para SE-0.5

Corpos de prova	1D		3D		7D		14D	
	AR ⁶	IM ⁷	AR	IM	AR	IM	AR	IM
Dados da moldagem								
γ_d^1 (g/cm ³)	1,40	1,41	1,43	1,44	1,43	1,42	1,44	1,44
η^2 (%)	46,32	45,81	45,25	44,75	45,01	45,77	44,82	44,89
ΔW^3 (%)	1,35	1,28	0,50	0,64	0,07	0,25	0,71	0,83
Sr ⁴ (%)	96,06	94,94	94,63	97,01	94,19	93,38	95,39	94,95
GC ⁵ (%)	98,2	98,7	99,7	100,6	100,1	99,5	100,0	100,3
Dados do rompimento								
γ_d^1 (g/cm ³)	1,46	1,47	1,49	1,46	1,50	1,48	1,48	1,48
η^2 (%)	44,03	43,60	42,69	44,03	42,63	43,41	43,19	43,34
W ⁸ (%)	21,37	27,75	9,33	27,75	2,35	27,44	2,40	27,20
Sr ⁴ (%)	70,83	93,62	32,66	91,97	8,25	93,28	8,24	92,74

1: Massa Específica Seca; 2: Porosidade estimada; 3: Desvio da umidade; 4: Grau de Saturação; 5: Grau de Compactação; 6: Seco ao ar; 7: Imerso; 8: Umidade.

Tabela 4.12 - Corpos de prova para SE-8.55

Corpos de prova	1D		3D		7D		14D	
	AR ⁶	IM ⁷	AR	IM	AR	IM	AR	IM
Dados da moldagem								
γ_d^1 (g/cm ³)	1,44	1,42	1,44	1,44	1,43	1,44	1,45	1,46
η^2 (%)	44,22	44,96	44,21	44,05	44,52	44,39	43,78	43,62
ΔW^3 (%)	0,98	0,52	0,63	1,45	0,10	0,73	1,32	1,46
Sr ⁴ (%)	92,84	91,57	94,04	91,97	94,55	93,03	91,97	90,22
GC ⁵ (%)	100,2	98,9	100,2	100,5	99,6	99,9	101,0	101,3
Dados do rompimento								
γ_d^1 (g/cm ³)	1,49	1,47	1,47	1,45	1,51	1,45	1,50	1,46
η^2 (%)	43,00	43,51	43,44	44,38	42,19	44,30	42,50	43,97
W ⁸ (%)	19,37	24,03	14,28	24,89	3,33	25,04	1,79	24,89
Sr ⁴ (%)	66,95	81,37	48,47	81,33	11,91	82,09	6,32	82,72

1: Massa Específica Seca; 2: Porosidade estimada; 3: Desvio da umidade; 4: Grau de Saturação; 5: Grau de Compactação; 6: Seco ao ar; 7: Imerso; 8: Umidade.

A Figura 4.9 apresenta o comportamento tensão versus deformação obtido para SE-0.5 e SE-8.55 em que os resultados de pico foram sumarizados na Tabela 4.13.

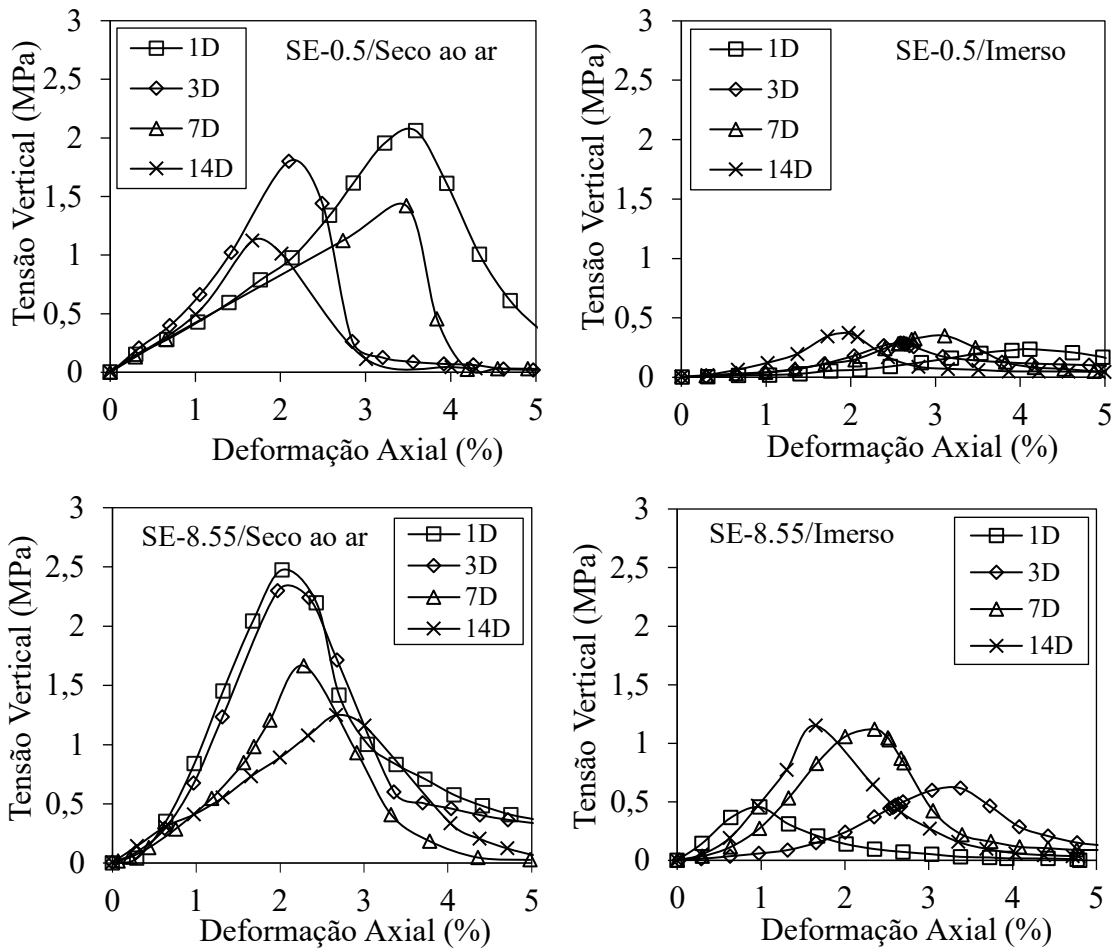


Figura 4.9 – Desenvolvimento da resistência à compressão simples ao longo do período de cura

Com base nos resultados, observa-se que, para ambas as concentrações testadas, os corpos de prova submetidos à condição imersa apresentaram um comportamento claramente crescente de resistência à compressão ao longo do período de cura. Na concentração de 8,55%, a resistência obtida aos 14 dias superou inclusive os valores da cura ao ar na concentração de 0,5%, evidenciando o efeito positivo da reidratação sobre a reorganização estrutural do solo. Nota-se ainda que, entre 7 e 14 dias, o incremento de resistência foi menos pronunciado que nos intervalos anteriores, o que sugere que a atividade da enzima já se encontrava próxima da estabilização.

Para a condição seca ao ar, observou-se comportamento oposto ao verificado na condição imersa, com tendência de decréscimo da resistência ao longo do período de cura. Tal comportamento já foi reportado por Sampaio (2019) que, ao utilizar uma concentração de 3% em relação à massa seca do solo, sob energia de compactação Proctor Normal, observou redução progressiva da resistência. Comportamento semelhante também foi identificado pela autora para a concentração de 1% quando empregada a energia de Proctor Intermediária.

Ressalta-se que esse comportamento foi observado apenas para o solo classificado como LG' segundo a classificação MCT, não sendo verificado no solo classificado como NA', também analisado no referido estudo.

Tabela 4.13 - Valores de resistência à compressão simples por dia de cura

Teor	Condição	Período de cura (dias)				
		1	3	7	14	
RCS (MPa)	0,50%	Seco ao ar	2,06	1,80	1,61	1,12
		Imerso	0,24	0,29	0,36	0,37
	8,55%	Seco ao ar	2,47	2,30	1,67	1,25
		Imerso	0,46	0,62	1,12	1,15

Buscou-se compreender o fenômeno por meio do acompanhamento do pH, utilizado como indicador da intensidade e da continuidade das reações enzimáticas. Conforme discutido por Ahenkorah et al. (2021), quedas ou estabilização no pH podem refletir desaceleração cinética ou mudança no regime das reações envolvidas. A Figura 4.10 apresenta a evolução do pH ao longo do período de acompanhamento.

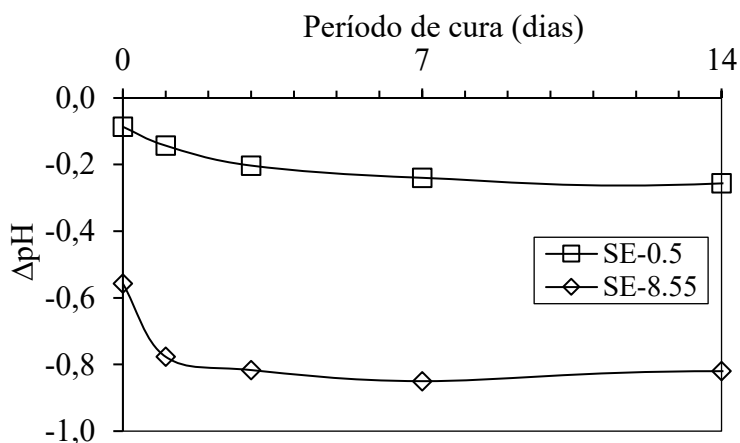


Figura 4.10 - Acompanhamento do pH do solo estabilizado.

A análise da evolução do pH indica que as maiores variações ocorrem nos primeiros dias de cura, sugerindo a ocorrência de processos químicos mais intensos nesse período inicial. Dentre os processos envolvidos nesse ajuste inicial, a troca catiônica pode estar presente, embora não seja possível isolá-la ou quantificá-la.

A estabilização do Δ pH após esse intervalo sugere o esgotamento da fase inicial de reorganização coloidal e a progressiva perda de atividade enzimática, especialmente em

ambiente de cura ao ar, onde a disponibilidade de água torna-se insuficiente para sustentar reações adicionais. Nessa condição, a enzima tende a tornar-se inativa ou incapaz de mobilizar mais moléculas reativas, o que interrompe a evolução do processo de estabilização.

A maior resistência registrada no primeiro dia, seguida de redução nos dias subsequentes na condição seca ao ar, está diretamente associada ao fato de que a reorganização coloidal é predominantemente rápida e concentrada nas primeiras horas após a aplicação do estabilizante.

Em contraste, o aumento de resistência observado na condição imersa pode ser atribuído à reidratação superficial da matriz argilosa. Esse resultado reforça que o desempenho mecânico do solo estabilizado por via enzimática é fortemente condicionado pelas interações eletroquímicas na escala coloidal e pela disponibilidade de água.

Considerando esses resultados, optou-se por adotar o período de 7 dias de cura nos ensaios subsequentes. Embora essa idade não apresente a maior resistência à compressão simples na condição de cura ao ar, sua diferença para 14 dias é pequena, indicando tendência de estabilização. Essa interpretação é reforçada pelo comportamento do ΔpH , que também se estabiliza a partir dessa idade. Além disso, considerando-se aplicação prática em pavimentação, a liberação ao tráfego ocorre em prazos curtos, tornando 7 dias de cura uma condição mais compatível com o uso real do material.

4.7 ENSAIO TRIAXIAL MONOTÔNICO

As Tabela 4.14, Tabela 4.15 e Tabela 4.16 apresentam os dados dos corpos de provas do solo puro e estabilizado com 0,5% e 8,55% de estabilizante enzimático ensaiados no triaxiais estáticos. Além disso, as tabelas apresentam o valor de permeabilidade média obtida para cada condição experimental.

Ao analisar-se os dados das Tabela 4.15 e Tabela 4.16 em comparação com a Tabela 4.14, observa-se que o estabilizante enzimático foi responsável pela diminuição da permeabilidade do solo puro, o qual diminuiu de ordem de grandeza de 10^{-6} para 10^{-7} cm/s quando considerado o solo estabilizado em ambos teores de enzima. Corroborando observação feita por Rauch et al. (2002), os quais indicam que ocorre uma maior aglomeração das partículas do solo em comparação ao seu estado natural quando incorporado estabilizante enzimático.

Tabela 4.14 - Dados dos corpos de prova SP do ensaio triaxial.

Tensão confinante (kPa)	50 kPa	100 kPa	200 kPa	400 kPa	800 kPa
Massa específica seca (g/cm ³)	1,46	1,45	1,45	1,45	1,45
Porosidade estimada (%)	44,09	44,44	44,26	44,28	44,28
Grau de saturação (%)	97,56	96,17	98,33	96,11	98,31
Grau de compactação (%)	101	100	101	101	101
Parâmetro B	0,96	0,96	0,96	0,96	1,00
Velocidade de cisalhamento (mm/min)	0,04				
Permeabilidade média (cm/s)	3,18 x 10 ⁻⁶				

Tabela 4.15 - Dados dos corpos de prova SE-0.5 do ensaio triaxial.

Tensão confinante (kPa)	50 kPa	100 kPa	200 kPa	400 kPa	800 kPa
Massa específica seca (g/cm ³)	1,43	1,44	1,42	1,45	1,45
Porosidade estimada (%)	45,31	44,83	45,50	44,46	44,35
Grau de saturação (%)	96,96	96,95	95,51	96,40	94,16
Grau de compactação (%)	100	100	99	101	101
Parâmetro B	0,96	0,98	0,96	0,96	0,98
Velocidade de cisalhamento (mm/min)	0,04				
Permeabilidade média (cm/s)	3,74 x 10 ⁻⁷				

Tabela 4.16 - Dados dos corpos de prova SE-8.55 do ensaio triaxial.

Tensão confinante ensaiada (kPa)	50 kPa	100 kPa	200 kPa	400 kPa	800 kPa
Massa específica seca (g/cm ³)	1,42	1,45	1,43	1,45	1,45
Porosidade estimada (%)	45,54	43,72	44,66	43,96	43,96
Grau de saturação (%)	92,83	95,15	92,73	95,19	95,97
Grau de compactação (%)	99	101	99	101	101
Parâmetro B	0,96	0,96	0,98	0,96	0,96
Velocidade de cisalhamento (mm/min)	0,04				
Permeabilidade média (cm/s)	4,02 x 10 ⁻⁷				

A Figura 4.11 apresenta os gráficos de tensão desviadora (q) *versus* deformação axial (ϵ_a) e deformação volumétrica (ϵ_{vol}) *versus* deformação axial (ϵ_a), obtidas para o solo puro (Figura 4.11a), SE-0.5 (Figura 4.11b) e SE-8.55 (Figura 4.11c), ilustrando o comportamento do material sob diferentes condições de confinamento (50, 100, 200, 400 e 800 kPa), permitindo a análise comparativa entre os compósitos puros e estabilizados.

As curvas apresentadas na Figura 4.11 evidenciam o acréscimo da capacidade de carga que o solo estabilizado com enzima apresenta em comparação ao SP. À medida que a deformação axial aumenta, observa-se que, para baixas tensões confinantes, o SP apresentou tendência ao strain-softening, caracterizada pela redução gradual da resistência após o pico. Para a tensão confinante de 200 kPa, essa redução mostrou-se menos pronunciada do que aquela observada para 50 kPa e 100 kPa. Comportamento semelhante foi observado para o SE-0.5, também sob baixos níveis de confinamento.

Por sua vez, o SE-8.55 apresentou um trecho inicial bem definido e íngreme, distinto dos demais materiais, indicando um comportamento aproximadamente elástico na fase inicial do carregamento. Após a mobilização do pico de resistência, não se observou queda significativa da tensão desviadora, mantendo-se valores praticamente constantes com o aumento da deformação axial, caracterizando um comportamento elasto-plástico com enrijecimento.

Sob tensões confinantes mais elevadas (400–800 kPa), o SP apresentou tendência ao strain-hardening, comportamento mais pronunciado na maior tensão confinante ensaiada, no qual a tensão desviadora aumenta continuamente com a deformação axial, sem definição clara de um pico de resistência, comportamento típico de solos tropicais lateríticos compactados (CRIPPA et al., 2025).

Para o SE-0.5, o ensaio sob tensão confinante de 400 kPa apresentou trecho inicial bem definido e íngreme, seguido pela mobilização de um pico de resistência, a partir do qual a tensão desviadora manteve-se praticamente constante, sem apresentar queda significativa. Já para a tensão confinante de 800 kPa, não se observou pico bem definido, sendo registrado um aumento gradual da resistência ao longo da deformação axial mobilizada.

No caso do SE-8.55, o comportamento observado manteve-se consistente para todas as tensões confinantes ensaiadas, com a presença de pico de resistência e ausência de queda pós-pico, indicando comportamento predominantemente elasto-plástico. Esse conjunto de resultados sugere que o SE-0.5 e o SE-8.55 apresentam melhor arranjo estrutural das partículas finas quando comparados ao SP.

O ganho de resistência observado decorre da ação enzimática, que promove maior aproximação entre as partículas, intensificando as ligações interpartículas. Conseqüentemente, mesmo em baixas dosagens, a enzima proporciona aumento significativo da resistência efetiva e da rigidez, conferindo ao solo comportamento mecânico superior ao do SP.

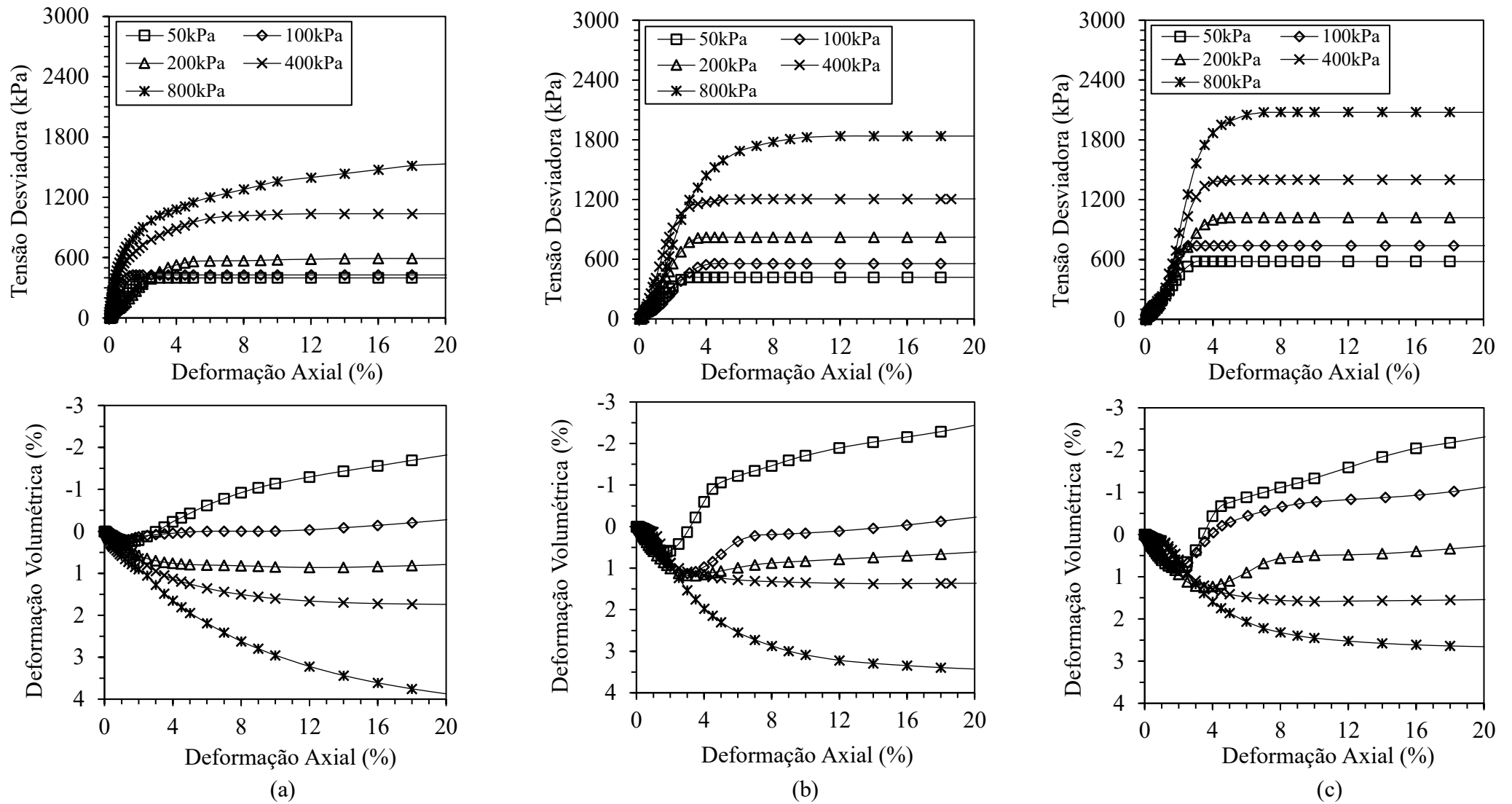


Figura 4.11 – Curvas tensão desviadora *versus* deformação axial e deformação volumétrica *versus* deformação axial para: a) SP; b) SE-0.5; c) SE-8.55

Com relação à deformação volumétrica, sob baixa tensão confinante (50 kPa), o SP apresentou inicialmente leve compressão, seguida por dilatação contínua ao longo da deformação axial. À medida que a tensão confinante aumenta, observa-se redução progressiva da dilatância. Para 100 kPa, os valores de deformação volumétrica situaram-se próximos de zero, caracterizando uma condição de transição entre dilatação e compressão, embora ainda com leve tendência dilatante. Para tensões confinantes mais elevadas, o comportamento passou a ser claramente contrativo.

Para o SE-0.5, sob baixa tensão confinante (50 kPa), observou-se inicialmente comportamento semelhante ao do SP, com leve compressão seguida de dilatação mais pronunciada. Para tensões intermediárias (100 kPa e 200 kPa), o comportamento foi predominantemente compressivo, porém, com tendência de evolução para dilatação, atingindo valores próximos de deformação volumétrica nula.

No caso do SE-8.55, a tendência à dilatação sob tensões intermediárias (100 kPa e 200 kPa) tornou-se ainda mais evidente. Embora sob 50 kPa o material apresente inicialmente comportamento compressivo, o predomínio ao longo do ensaio foi dilatante, comportamento também observado para 100 kPa. Considerando 200 kPa, apesar de ainda ocorrer compressão, verificou-se redução significativa dessa tendência, com valores de deformação volumétrica próximos de zero.

Ainda no que se refere ao comportamento mecânico, a Figura 4.12 apresenta as trajetórias de tensões efetivas ($q \times p'$) obtidas para o SP e para o SE-0.5 e SE-8.55. As trajetórias foram construídas a partir dos valores correspondentes ao pico de resistência mobilizada em cada nível de tensão confinante. Essas trajetórias representam a resposta dos materiais sob diferentes condições de confinamento, permitindo a análise comparativa entre as condições não estabilizada e estabilizada.

Observa-se que o SE-0.5 e o SE-8.55 apresentaram valores máximos de tensão desviadora superiores aos do SP para os mesmos níveis de tensão efetiva média, indicando aumento da resistência ao cisalhamento e evidenciando a contribuição da enzima na melhoria do comportamento mecânico do material.

Esse resultado está associado à ação da enzima, que promove rearranjo e agregação mais estáveis das partículas finas, além da intensificação de interações físico-químicas entre os argilominerais e compostos orgânicos presentes, resultando em aumento expressivo do

intercepto coesivo e incremento mais moderado do ângulo de atrito interno. Conforme analisado, a estabilização enzimática atua predominantemente na aproximação interpartículas, intensificando as ligações físico-químicas entre partículas finas.

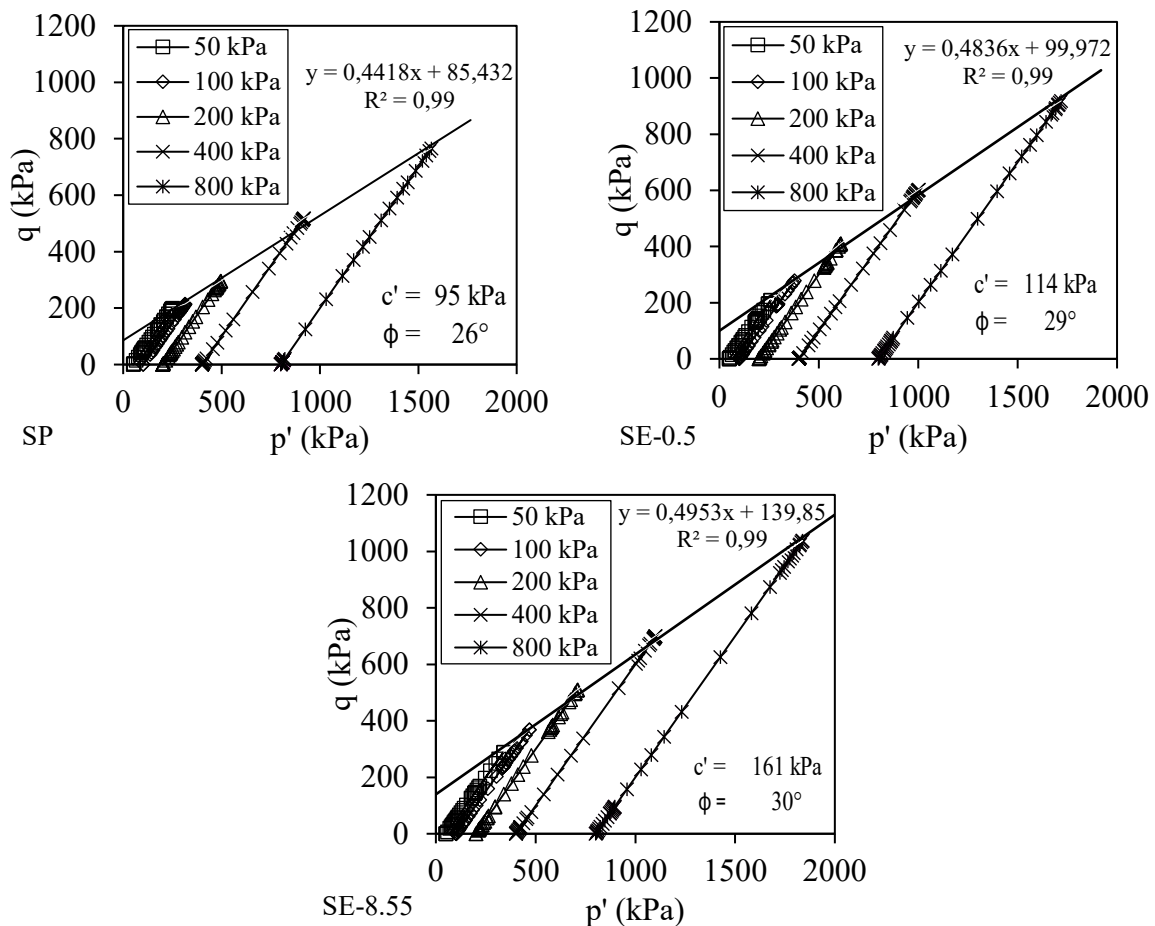


Figura 4.12 - Trajetória de tensões efetivas ($q \times p'$)

4.8 EXPANSÃO E CBR

A Tabela 4.17 apresenta os resultados de expansão e CBR do solo puro e estabilizado nos dois teores de dosagem do estabilizante enzimático.

Tabela 4.17 - Etapa de expansão no ensaio CBR

Condição experimental	Expansão (%)	CBR (%)
SP	0,03	22
SE-0.5	0,02	25
SE-8.55	0,02	34

Verifica-se que o solo natural apresentou expansão da ordem de 0,03%, valor considerado bastante reduzido, o que indica baixa suscetibilidade à expansão volumétrica quando submetido

à condição de imersão. Com a incorporação do estabilizante enzimático, os valores de expansão reduziram-se para aproximadamente 0,02%. Embora essa redução seja discreta em termos absolutos, cerca de 33,3%, observa-se uma tendência de diminuição da expansão do solo estabilizado em relação ao solo natural. Não foram identificadas diferenças significativas entre os diferentes teores de estabilizante avaliados, indicando comportamento semelhante entre as dosagens estudadas.

De modo geral, os resultados sugerem que, para um solo que já apresenta baixo potencial expansivo, a estabilização enzimática não promove alterações expressivas no comportamento volumétrico sob imersão, resultando apenas em uma leve redução da expansão, cuja relevância deve ser analisada de forma conjunta com os resultados dos demais ensaios mecânicos e físico-químicos desenvolvidos ao longo do estudo.

Quanto aos valores de CBR, o caso do solo puro apresentou valor de 22%, enquanto o solo estabilizado apresentou incremento progressivo desse índice, alcançando valores de 25% para o teor de 0,5% e 34% para o teor de 8,55% de enzima, promovendo aumento de 54,5% em relação ao solo puro.

Esse comportamento indica que a estabilização enzimática promoveu melhoria na capacidade de suporte do solo, evidenciada pelo aumento do CBR em relação ao solo não estabilizado. O ganho mais expressivo foi observado para o maior teor de enzima empregado, sugerindo que o efeito do estabilizante está associado à dosagem utilizada, dentro das condições analisadas. Tais resultados corroboram a eficiência do uso de enzimas na estabilização de solos, refletindo positivamente no comportamento mecânico avaliado.

O mesmo comportamento de redução da expansão medida no ensaio CBR após imersão de solo tratado com enzima já foi relatada por outros autores, ambos seguidos por aumento do CBR do solo tratado. Brazetti (1998) ao estudar um solo laterítico do estado do Paraná, com predominância de caulinita e gibbsita, observou uma melhora de 33,3% do CBR e diminuição de 57,1% da expansão. Nadeem et al. (2023), para um solo com predominância em ilita, verificaram a melhora 233,3% do CBR, saindo de 3% para 10%, juntamente com diminuição de 84,5% da expansão do solo. Ainda, Pooni et al. (2019) em um solo expansivo A7-6 pela classificação AASHTO, com predominância em quartzo, ilita e montmorilonita, verificaram uma melhora de 66,7% para o CBR e diminuição de 65,9% da expansão.

4.9 MÓDULO DE RESILIÊNCIA

Na Tabela 4.18 apresenta-se os parâmetros referentes aos modelos dependentes da tensão confinante e desviadora, bem como o R^2 obtido, enquanto a Tabela 4.19 são apresentados os valores dos parâmetros ajustados do modelo composto, incluindo os coeficientes de regressão k_1 , k_2 e k_3 , o coeficiente de determinação R^2 obtido para cada material, bem como os valores mínimo e máximo do módulo de resiliência observados nos ensaios. O valor médio de MR foi calculado a partir da média dos resultados dos três corpos de prova ensaiados para cada condição analisada. Quando se analisa os modelos propostos, nota-se que o modelo que melhor se ajustou para os compósitos e solo puro foi o composto, com R^2 superior aos apresentados pelos modelos dependentes de tensão confinante e desviadora.

De forma geral, observa-se que os compósitos apresentaram incrementos significativos no módulo de resiliência em relação ao solo puro. Para a condição seca ao ar, verificou-se um aumento de 22,4% para o compósito SE-0.5 e de 127,3% para o compósito SE-8.55. Já para a condição imersa, os incrementos observados foram de 19,0% para o SE-0.5 e de 90,2% para o SE-8.55.

Nota-se que, mesmo sob diferentes condições de umidade, seca ao ar e imersa, os ganhos de MR foram expressivos, evidenciando a eficácia do estabilizante enzimático na melhoria do comportamento resiliente do solo. Esses resultados estão em consonância com estudos previamente reportados na literatura. Pooni et al. (2019), ao investigar um solo classificado como CL pelo sistema SUCS, contendo montmorilonita e estabilizado com enzima, observou um incremento de aproximadamente 118% no módulo de resiliência. De forma semelhante, Marasteanu et al. (2005) reportou melhorias da ordem de 85% para um solo classificado como A-7-6 pela metodologia AASHTO, corroborando os resultados obtidos no presente estudo.

Tabela 4.18 - Parâmetros para modelos dependentes de tensão confinante e desviadora

Material	Modelo de tensão confinante			Modelo de tensão desviadora		
	k_1	k_2	R^2	k_1	k_2	R^2
SP	379,05	0,23	0,84	259,23	0,13	0,37
SE-0.5S ¹	516,81	0,26	0,75	379,38	0,19	0,63
SE-0.5I ²	404,74	0,19	0,67	299,70	0,11	0,35
SE-8.55S ¹	2092,87	0,52	0,94	1201,65	0,41	0,84
SE-8.55I ²	859,83	0,26	0,91	651,96	0,21	0,84

¹Seco ao ar; ²Imerso.

Ao analisar conjuntamente a Tabela 4.18 e Tabela 4.19, que apresentam os valores de módulo de resiliência (MR) para todos os materiais avaliados, observa-se que, embora o solo puro (SP) seja classificado como LG', condição para a qual é comum a predominância de modelos com maior dependência da tensão desviadora, conforme reportado por Norback (2018), Caetano (2024) e Lima et al. (2022), o ajuste pelo modelo composto indicou um comportamento com maior dependência da tensão confinante, representada pelo parâmetro k_2 .

Tabela 4.19 - Parâmetros do modelo composto de MR

Material	k_1	k_2	k_3	R^2	MR mín. (MPa)	MR máx. (MPa)	MR médio (MPa)
SP	421,91	0,34	-0,08	0,87	152	267	205
SE-0.5S ¹	558,51	0,22	0,08	0,79	198	361	251
SE-0.5I ²	443,58	0,25	-0,03	0,69	186	313	244
SE-8.55S ¹	1832,17	0,35	0,15	0,99	252	762	466
SE-8.55I ²	841,52	0,18	0,10	0,97	317	545	390

¹Seco ao ar; ²Imerso.

A partir da análise do comportamento das curvas de MR apresentadas na Figura 4.13a, verifica-se que o aumento da tensão desviadora está associado à redução dos valores de MR, enquanto o incremento da tensão confinante resulta em elevação do módulo de resiliência. Esse comportamento evidencia que, para o SP, a rigidez é influenciada de forma significativa pela tensão confinante, característica típica de solos não estabilizados submetidos a carregamentos repetidos.

Para os compósitos, entretanto, observa-se uma alteração relevante no comportamento mecânico. Nos compósitos SE-0.5S, SE-0.5I e SE-8.55I, verificou-se uma redução do parâmetro k_2 associada ao aumento de k_3 , indicando uma menor dependência do módulo de resiliência em relação à tensão confinante. Contudo, o aspecto mais expressivo do processo de estabilização foi a transição do parâmetro k_3 de valores negativos para positivos. Essa inversão de sinal representa uma mudança qualitativa no comportamento do material: ao invés de apresentar degradação de rigidez com o aumento da tensão desviadora, o solo estabilizado com enzima passa a manter ou até incrementar o módulo de resiliência sob carregamento cíclico.

Esse comportamento torna-se ainda mais evidente no caso do SE-8.55S, no qual o valor de k_2 permaneceu praticamente inalterado em relação ao SP, enquanto ocorreu a inversão do sinal de k_3 . Tal resultado demonstra que, mesmo sob condições de confinamento semelhantes às do solo puro, o material estabilizado apresenta maior capacidade de manter ou aumentar sua

rigidez frente ao aumento da tensão desviadora, evidenciando o efeito benéfico do estabilizante enzimático.

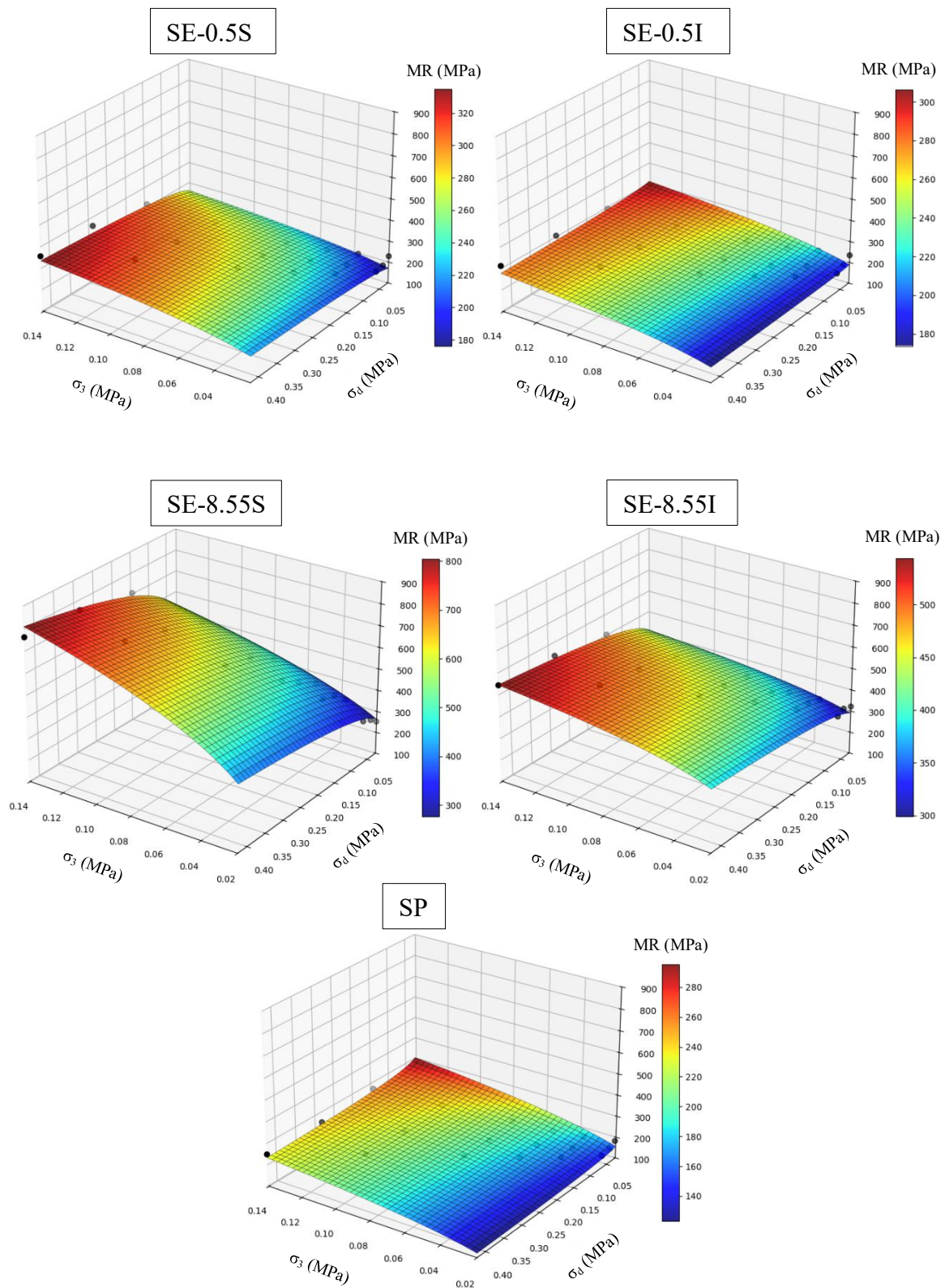


Figura 4.13 - Representação do modelo composto para o solo e compósitos

Do ponto de vista da engenharia de pavimentos, esse comportamento é particularmente vantajoso, uma vez que a fadiga e a manutenção da rigidez sob tráfego repetido são requisitos fundamentais para o desempenho estrutural das camadas do pavimento. Assim, os resultados obtidos reforçam o potencial da estabilização enzimática como uma alternativa eficaz para a melhoria do comportamento resiliente de solos utilizados em pavimentação.

4.10 DEFORMAÇÃO PERMANENTE

A Figura 4.14 representa a deformação permanente acumulada em função do número de ciclos de aplicação de carga para o SP. Conforme descrito na metodologia, todos os corpos de prova desse material foram moldados na umidade ótima de 29,5%. Para o SP, o maior deslocamento plástico acumulado observado foi de 2,46 mm, correspondente ao ensaio 4, realizado sob tensão desviadora de 240 kPa e tensão confinante de 120 kPa, valor considerado baixo. De acordo com Norback (2018), o valor admissível de afundamento de trilha de roda, considerando a contribuição conjunta de todas as camadas do pavimento, é da ordem de 12,5 mm para projetos típicos de rodovias, o que evidencia o bom desempenho natural do solo argiloso laterítico frente à deformação permanente.

Observa-se, ainda, que os ensaios 2, 4 e 6 apresentaram os maiores valores de deformação permanente quando comparados aos ensaios realizados sob a mesma tensão confinante. Esse comportamento indica que, para uma tensão confinante constante, o aumento da tensão desviadora resulta em maior acúmulo de deformação permanente, evidenciando a influência direta da razão de tensões no comportamento do material.

Adicionalmente, verifica-se que os ensaios 1, 2 e 3 apresentaram deformações permanentes inferiores a 1,0 mm, enquanto o ensaio 5 apresentou valor ligeiramente superior a esse limite. Com exceção do ensaio 2, esses ensaios correspondem aos pares de tensão iniciais estabelecidos na norma, associados a razões de tensão iguais a 1 e 2. Já os ensaios 4 e 6, realizados com razão de tensão igual a 3, apresentaram valores mais elevados de deformação permanente, porém ainda inferiores a 2,50 mm, mantendo-se dentro de uma faixa considerada baixa.

Em relação à evolução da deformação ao longo dos ciclos de carregamento, observa-se que todos os ensaios apresentaram rápido acúmulo de deformação permanente nos ciclos iniciais, associado à acomodação estrutural do material. Para os ensaios 1, 4 e 6, esse comportamento foi seguido por uma tendência à estabilização da deformação, indicando acomodação das partículas ao longo do carregamento cíclico. Por outro lado, nos ensaios 2, 3

e 5, observa-se que, com a continuidade da aplicação dos ciclos de carga, o material apresentou acúmulo progressivo de deformação permanente, sem evidência clara de estabilização.

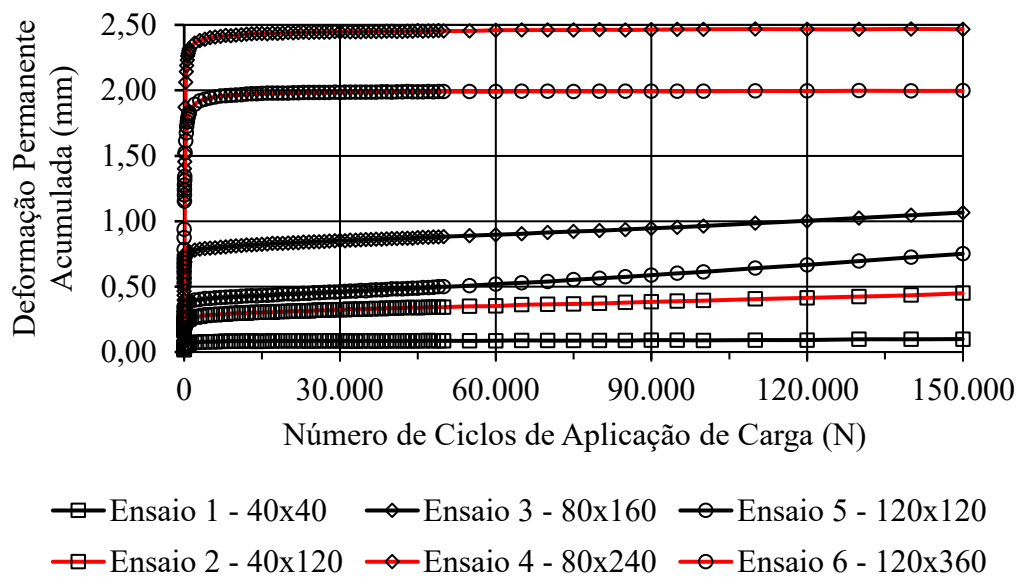


Figura 4.14 - Resultados do ensaio de DP para SP

A análise do fenômeno de *shakedown* foi realizada a partir da avaliação da taxa de acréscimo da deformação permanente em função do número de ciclos de aplicação de carga, conforme apresentado na Figura 4.15. Esse tipo de representação permite identificar os diferentes regimes de resposta do material sob carregamento repetido, distinguindo comportamentos associados à acomodação estrutural, ao escoamento plástico estável e ao acúmulo progressivo de deformações.

Observa-se que as curvas 2, 3 e 5 apresentam comportamento clássico do tipo B, associado ao escoamento plástico. Nos ciclos iniciais de aplicação de carga, a taxa de acréscimo da deformação permanente é elevada, mas vai decrescendo até se tornar próxima de um valor constante. Dessa forma, não é possível afirmar que o material tenha atingido o regime de *shakedown*, tampouco que evolua para uma condição de colapso incremental, permanecendo em um regime intermediário de resposta (DELGADO et al., 2014).

Por outro lado, as curvas referentes aos ensaios 4 e 6 apresentam comportamento classificado como tipo AB. Esse regime é caracterizado por uma taxa inicial relativamente elevada de acréscimo da deformação permanente, seguida por uma redução progressiva ao longo dos ciclos, indicando que o material atinge o estado de *plastic shakedown* (RODRIGUES et al., 2024). Embora ocorra maior acúmulo inicial de deformação permanente, a tendência de

estabilização da taxa de acréscimo sugere que o material passa a responder de forma mais estável sob carregamento repetido. Esse tipo de comportamento é compatível com solos lateríticos, conforme relatado por Guimarães (2009).

No caso da curva correspondente ao ensaio 1, verifica-se um comportamento distinto, no qual o material apresenta, inicialmente, a coexistência de deformações elásticas e plásticas até determinado número de ciclos de aplicação de carga. A partir desse ponto, a taxa de acréscimo da deformação permanente tende a valores muito baixos, indicando que as deformações passam a ser predominantemente elásticas. Esse comportamento caracteriza o fenômeno de *plastic shakedown*, no qual ocorre a acomodação das deformações permanentes e a estabilização da resposta mecânica do material, conforme definido por Werkmeister et al., (2003).

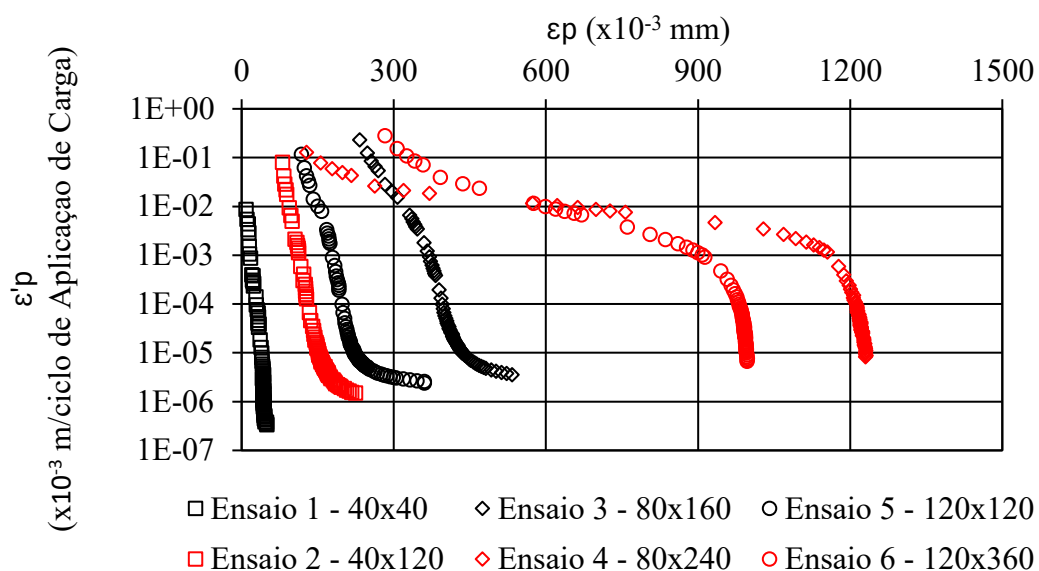


Figura 4.15 - Gráfico da taxa de DP para o solo puro

Para os resultados de DP para os compósitos, conforme descrito e discutido na metodologia, foi realizada etapa de imersão posterior a cura. Para controle de qualidade, a Tabela 4.20 apresenta os dados de umidade dos compósitos, sendo possível observar que para aqueles que foram imersos, todos alcançaram uma umidade de ensaio superior a 26%. Guimarães (2009) destaca que mesmo pequenas variações de umidade em torno da umidade ótima de compactação podem gerar variações significativas na deformação permanente total do material, fato que foi observado para ambos os compósitos.

Tabela 4.20 - Dados dos compósitos SE-0.5 e SE-8.55 para o ensaio DP

Ensaio	Umidade (%)											
	1		2		3		4		5		6	
Condição	S	I	S	I	S	I	S	I	S	I	S	I
SE-0.5	8,5	28,2	9,0	28,0	8,4	27,5	7,9	26,6	8,1	26,4	9,2	27,7
SE-8.55	9,1	26,1	7,9	27,8	8,8	26,4	8,8	26,6	8,6	27,3	8,7	27,5

A Figura 4.16 apresenta a deformação permanente acumulada em função do número de ciclos de aplicação de carga para o SE-0.5, nas duas condições avaliadas. Para a condição seca ao ar (Figura 4.16a), o maior deslocamento permanente acumulado observado foi de 0,35 mm, correspondente ao ensaio 6, realizado sob tensão desviadora de 360 kPa e tensão confinante de 120 kPa. Para a condição imersa (Figura 4.16b), o maior deslocamento permanente acumulado observado foi de 2,22 mm, referente ao mesmo ensaio, sob as mesmas condições de tensão desviadora e confinante.

Além disso, observa-se que em ambas as condições, ocorreu a mesma tendência quanto aos ensaios que apresentaram os maiores valores de deformação permanente, sendo os ensaios 2, 4 e 6. Assim como observado para o SP (Figura 4.14), esse comportamento reforça que para uma mesma tensão confinante, o aumento da tensão desviadora resulta em maior acúmulo de deformação permanente. Observa-se também que os ensaios com razão de tensões igual a 3 foram os que apresentaram os maiores valores de deformação permanente em ambas as condições, comportamento distinto daquele observado para o SP.

Adicionalmente, verifica-se que todas as curvas apresentadas, com exceção do ensaio 6 para o SE-0.5 na condição imersa, apresentam nítida tendência à acomodação das deformações permanentes, uma vez que se mostram praticamente paralelas ao eixo horizontal. Observa-se, ainda, que esses ensaios apresentaram rápido acúmulo de deformações permanentes nos ciclos iniciais. Para o ensaio 6 do SE-0.5 imerso, nota-se que o material apresentou acúmulo progressivo de deformação permanente, sem evidência de estabilização.

É notável a diferença no acúmulo de deformação permanente entre as condições seca ao ar e imersa. Na condição pós-cura, foram atingidos valores inferiores a 0,40 mm, o que já indica uma melhora significativa em comparação ao SP. Ao se analisar a condição imersa, embora o valor de deformação permanente tenha sido superior ao da condição seca ao ar, ele ainda se manteve inferior ao observado para o SP. Com exceção do ensaio 6, no qual se verificou tendência à perda de eficiência da enzima, todos os demais ensaios apresentaram deformação permanente inferior a 1 mm.

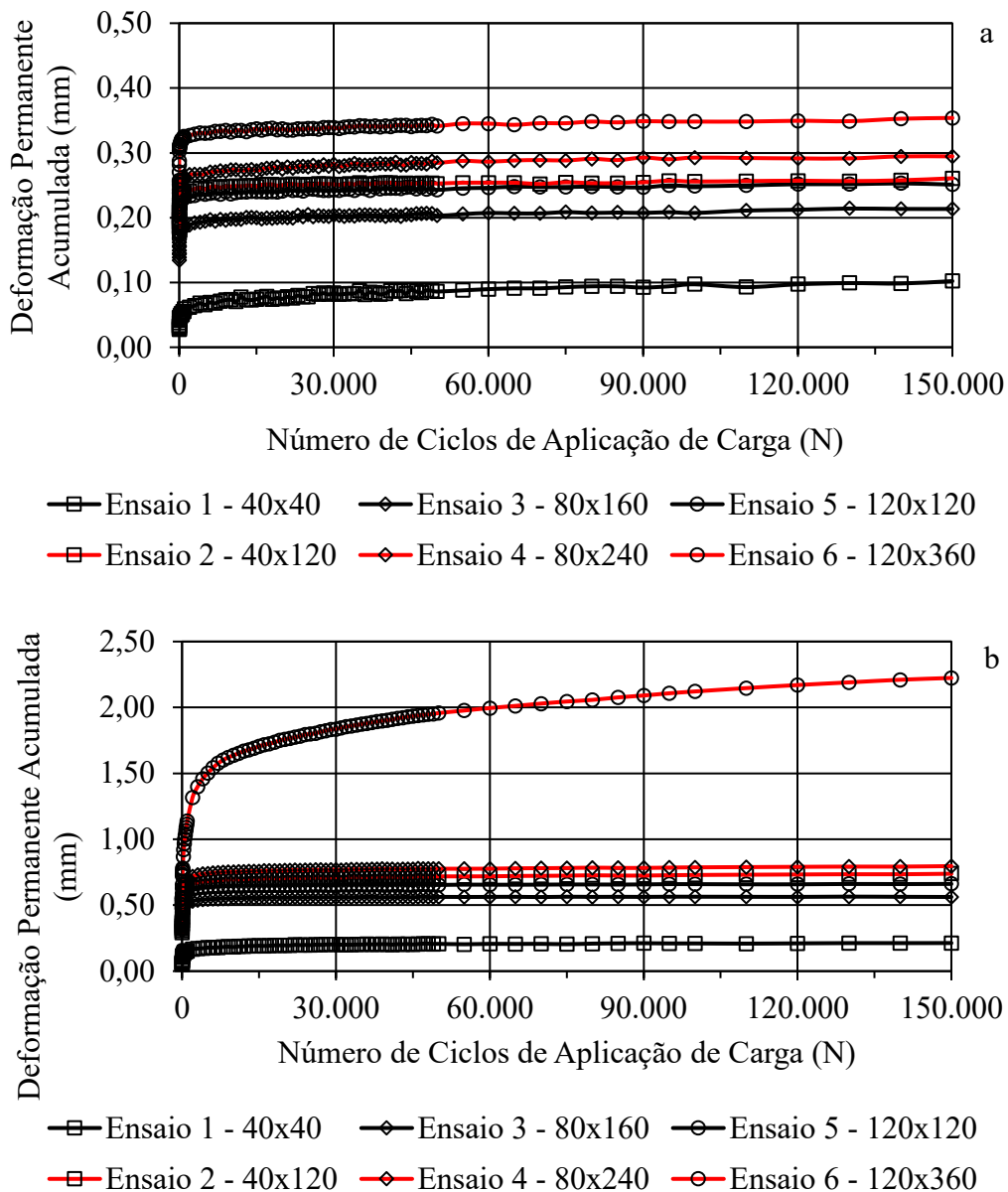


Figura 4.16 - Resultados de DP para os compósitos SE-0.5: a) Seco ao ar; b) Imerso.

A análise do fenômeno de *shakedown* é apresentada na Figura 4.17. Para a situação seca ao ar (Figura 4.17a), observa-se que o ensaio 1 apresenta um comportamento típico do tipo A, o mesmo observado para o SP no mesmo par de tensões, caracterizando o *plastic shakedown*. Esse comportamento é associado a baixas deformações permanentes acumuladas e a uma baixa taxa de acréscimo, indicando que, nesse estado de tensão, a contribuição para o afundamento do pavimento é pouco significativa. Para as demais curvas, o comportamento foi semelhante entre os pares de tensão, sendo também possível observar um comportamento do tipo A, com tendência ao tipo AB, o que igualmente caracteriza o fenômeno de *plastic shakedown*.

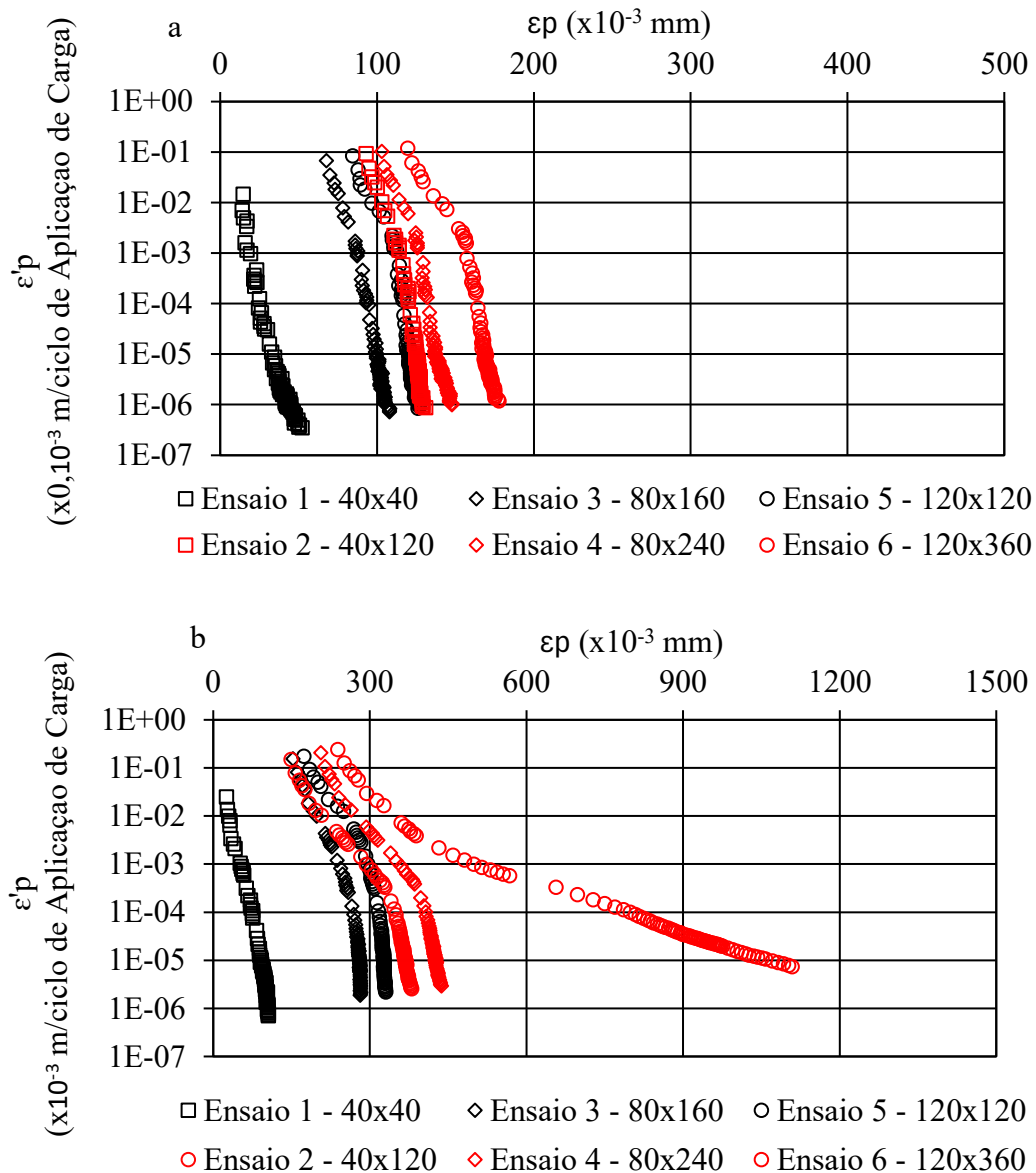


Figura 4.17 - Gráfico da taxa de DP para os compósitos SE-0.5: a) Seco ao ar; b) Imerso.

Quando comparado o comportamento das curvas de SE-0.5 com o do SP (Figura 4.15), percebe-se que a grande maioria das curvas evoluiu de um comportamento caracterizado pelo progressivo aumento de deformação permanente para um comportamento de acomodação das deformações. Esse resultado sintetiza um cenário bastante favorável para a aplicação em pavimentos, indicando uma resposta mecânica mais estável do material sob carregamento repetido, com redução da tendência ao acúmulo de deformações permanentes, maior capacidade de adaptação estrutural e, conseqüentemente, melhor desempenho frente às solicitações típicas do tráfego.

Para a situação imersa (Figura 4.17b), observa-se que todas as curvas, com exceção do ensaio 6, apresentam comportamento do tipo A, com tendência ao tipo AB, cuja evolução se torna mais evidente à medida que se aumentam os pares de tensões. No ensaio 6, torna-se nítida a transição para um comportamento do tipo B, indicando que, sob os maiores níveis de tensão, o material entrou em um estado de aumento progressivo de deformação permanente, caracterizando o fenômeno de *plastic creep*.

Quando comparado o comportamento das curvas com as do solo puro (Figura 4.15), percebe-se que há uma melhora evidente do desempenho frente aos carregamentos cíclicos típicos do tráfego, tanto para a condição seca quanto imersa. Embora o ensaio 6 apresente comportamento do tipo B, esse regime não implica necessariamente o colapso do material, tampouco permite afirmar que ocorrerá o *shakedown* (DELGADO et al., 2014).

Além disso, quando comparado ao SE-0.5 na condição seca ao ar, observa-se que, na condição imersa, ocorre maior tendência à curvatura, simbolizando uma evolução do comportamento do tipo A para o tipo B, o que indica maior deformação permanente. Ainda assim, o material mantém-se estável, com valores de deformação de baixa magnitude. Tal característica é, evidentemente, de grande interesse para projetistas rodoviários, haja vista que o afundamento em trilhas de roda constitui um dos principais problemas estruturais a serem enfrentados em pavimentos.

A Figura 4.18 apresenta o gráfico de deformação permanente acumulada em função do número de ciclos de aplicação de carga para o SE-8.55, nas duas condições ensaiadas. Para a situação após a cura (Figura 4.18a), a maior deformação acumulada foi de 0,35 mm, correspondente ao ensaio 6, realizado sob tensão desviadora de 360 kPa e tensão confinante de 120 kPa. Para a situação imersa (Figura 4.18b), a maior deformação acumulada foi de 0,41 mm, referente ao mesmo ensaio, sob as mesmas condições de tensão desviadora e confinante.

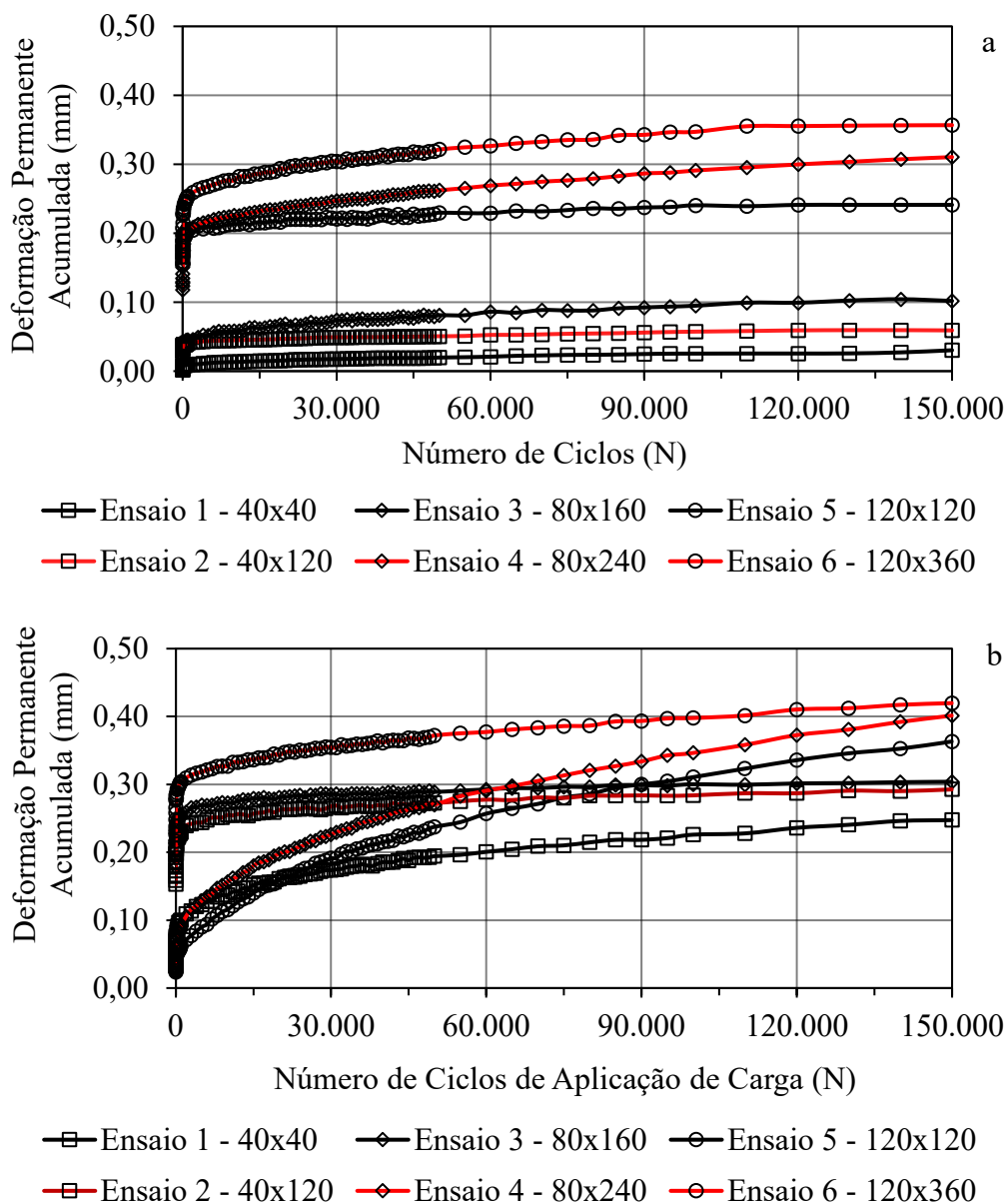


Figura 4.18 - Resultados de DP para os compósitos SE-8.55: a) Seco ao ar; b) Imerso.

Observa-se que os ensaios 4 e 6 foram os que apresentaram, em ambas as condições, os maiores valores de DP relatados, seguidos pelo ensaio 5. Esse comportamento se mostra diferente do apresentado tanto para SP (Figura 4.14) quanto para SE-0.5 (Figura 4.16), indicando que, apesar da razão de tensões igual a 3, apresentada no ensaio 2, essa tensão desviadora não foi suficiente para gerar um grande acúmulo de deformações mobilizadas. Quando analisada a condição imersa (Figura 4.18b), os ensaios 2 e 3 mostraram-se praticamente coincidentes, corroborando a hipótese levantada.

Ademais, verifica-se que apenas os ensaios 1 e 2, para a condição seca ao ar (Figura 4.18a), apresentaram tendência à estabilização dos valores de deformação permanente. As

demais curvas apresentaram acréscimo, ainda que pequeno, porém com inclinação até cerca de 120.000 ciclos de carregamento. Para a situação imersa (Figura 4.18b), apenas os ensaios 2 e 3 apresentaram tendência à estabilização, ainda assim, observa-se, ao final dos ciclos, um acréscimo evidente. As outras curvas apresentaram crescimento pronunciado da deformação permanente, indicando tendência à continuidade do processo deformacional.

Quando comparados esses resultados aos obtidos para SP (Figura 4.14), fica evidente a melhora no comportamento mecânico cíclico, com a redução do afundamento de 2,46 mm para 0,35 mm na condição seca ao ar e para 0,41 mm na condição imersa. A análise do comportamento demonstra que, apesar de o SP apresentar maior tendência à acomodação da deformação permanente, o crescimento observado para o SE-8.55 é ínfimo, considerando o número de ciclos aplicados no ensaio de deformação permanente.

Ainda, comparando-se esses resultados aos obtidos para o SE-0.5 (Figura 4.16), observa-se que ambos apresentaram o mesmo valor de deformação permanente acumulada, igual a 0,35 mm, para a condição seca ao ar. No entanto, ao se analisar o comportamento das curvas, percebe-se que os compósitos SE-8.55 apresentam melhor desempenho nos ensaios 1, 2 e 3, com menores valores de deformação. A partir desses ensaios, ocorre uma aparente perda de eficácia da enzima, com valores que se equiparam aos apresentados para o SE-0.5.

Para a situação imersa, observa-se que, apesar de o comportamento das curvas de SE-8.55 (Figura 4.18b) apresentar evidente acréscimo, conforme discutido, e as curvas de SE-0.5 (Figura 4.16b) demonstrarem maior tendência à acomodação, os valores de deformação permanente apresentados pelo SE-8.55 imerso são inferiores aos do SE-0.5. Esse resultado indica que, embora o comportamento na condição seca ao ar aponte uma possível perda de eficácia do estabilizante enzimático, o efeito de hidratação dos compósitos promoveu uma melhora significativa da resposta mecânica do material. Tal comportamento pode estar associado à reativação das interações físico-químicas promovidas pelo estabilizante, favorecendo uma nova reorganização das partículas ao entrarem em contato com a água. No entanto, a escassez de estudos que considerem etapas de imersão em compósitos estabilizados com enzima evidencia uma lacuna científica quanto à explicação precisa do efeito observado.

A análise do fenômeno de *shakedown* para o compósito com 8,55% de solução enzimática é apresentada na Figura 4.19.

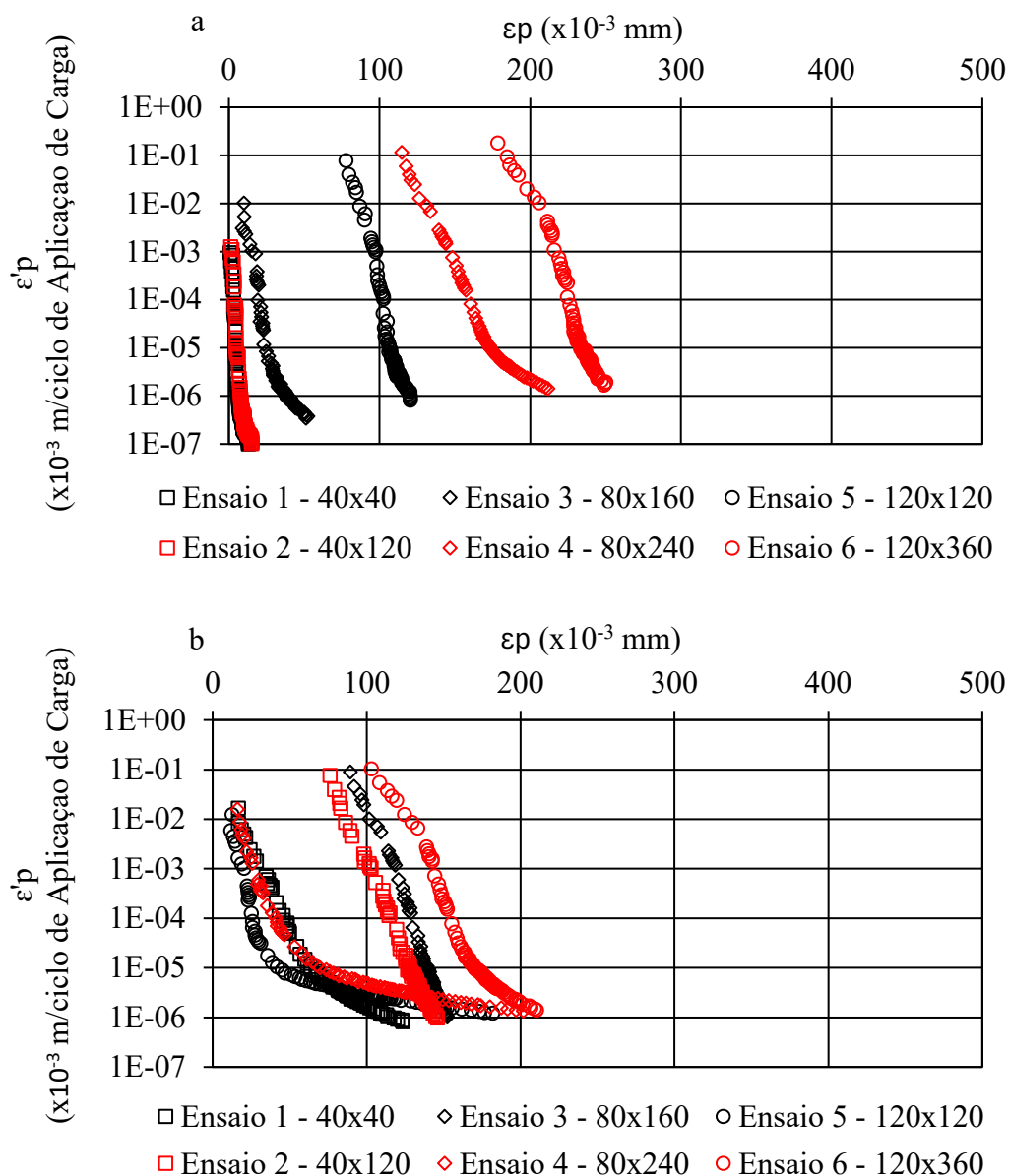


Figura 4.19 - Gráfico da taxa de DP para os compósitos SE-8.55: a) Seco ao ar; b) Imerso.

Para a situação seca ao ar (Figura 4.19a), observa-se que os ensaios 1 e 2 têm um comportamento tipo A evidente, apresentando uma tendência a serem paralelos ao eixo vertical, caracterizando o fenômeno de shakedown. Além do comportamento das curvas, ao se analisar a taxa de acréscimo, percebe-se que o valor alcançado foi da ordem de 10^{-7} , simbolizando o acomodamento do fenômeno (DELGADO et al., 2014). Apesar do ensaio 5 apresentar tendência à verticalização, sugere-se que as curvas apresentem comportamento tipo AB, devido ao leve acréscimo da taxa, seguido por uma diminuição. Ainda, as demais curvas apresentam um comportamento que se assemelha ao tipo B, da mesma maneira do apresentado para SP, com o trecho final ocorrendo a curvatura típica desse comportamento.

Para a situação imersa (Figura 4.19b), relata-se que os ensaios 1, 4, 5 e 6 apresentam evidente comportamento tipo B (*plastic creep*), com progressivo aumento de DP ao final, quase constante. Para as curvas 2 e 3, não se observa uma verticalização típica daquela apresentada para o tipo A; por consequência, sugere-se que o comportamento demonstrado seja mais aparente do tipo AB.

Quando se comparam os comportamentos de SE-8.55 e SE-0.5 (Figura 4.17), observa-se que, para a condição seca ao ar, os resultados apresentados na Figura 4.18 evidenciam diferenças na resposta dos materiais à medida que se elevam os níveis de confinamento e de tensão desviadora. O comportamento mais regular observado para o SE-0.5 pode ser interpretado como uma resposta que, embora já reflita a ação da enzima, mantém uma tendência de evolução da deformação permanente semelhante à da matriz do solo. Isso indica que a dosagem de 0,5% é suficiente para alterar a magnitude do acúmulo de deformação permanente, porém sem modificar de forma significativa o padrão de evolução dessa deformação ao longo dos ciclos de carregamento. Em contrapartida, a maior dosagem de enzima (8,55%) intensifica sua atuação no material, resultando em um comportamento típico de compósito, no qual a enzima passa a influenciar de forma mais pronunciada não apenas a magnitude do acúmulo de deformação permanente, mas também a tendência de evolução da resposta mecânica ao longo dos ciclos, o que se reflete em uma mudança de tendência de comportamento, especialmente sob níveis mais elevados de sollicitação.

Para a situação imersa, observa-se que o SE-8.55 apresenta uma concentração das curvas em faixas relativamente menores de deformação permanente vertical acumulada, com uma redução mais acentuada da taxa de acréscimo de deformação permanente ao longo dos ciclos de carga. Mesmo nos ensaios com maiores níveis de sollicitação (80×240 e 120×360), nota-se que as curvas tendem a convergir, indicando um processo de acomodação mais eficiente e precoce. Em contraste, o gráfico de SE-0.5 evidencia um deslocamento expressivo das curvas para valores significativamente mais elevados de deformação permanente acumulada, alcançando ordens de grandeza superiores, especialmente no ensaio 6. Nessas condições, embora também ocorra redução gradual da taxa de acréscimo de deformação permanente, a acomodação se dá de forma mais lenta, refletindo maior mobilização de deformações irreversíveis sob carregamento repetido.

Em síntese, os resultados demonstram que, embora ambos os materiais apresentem tendência à redução da taxa de acréscimo de deformação permanente com o avanço dos ciclos,

o comportamento de SE-8.55 representa uma condição claramente mais favorável, por associar menores deformações acumuladas a um processo de acomodação mais rápido e eficiente.

4.10.1 MODELOS PROPOSTOS POR GUIMARÃES (2009) E MOTA (2024)

A partir do modelo proposto por Guimarães (2009) apresentado na Equação 2.4, calculou-se por regressão não linear com o software Matlab os parâmetros dos resultados obtidos no ensaio de deformação permanente dos compósitos e solo puro, considerando todos os pares de tensão e após os 150.000 ciclos de aplicação de carga.

A Tabela 4.21 apresenta os valores dos parâmetros, bem como os valores de R^2 obtidos. Observa-se para todos os materiais utilizados apresentaram ψ_3 positivo, sendo esse parâmetro referente à tensão desvio, indicando que quanto maior a tensão desvio, maior é a deformação permanente resultante. Em relação ao parâmetro associado ao número de ciclos de carga, ψ_4 , observa-se que os valores obtidos são, de modo geral, positivos e de pequena magnitude, indicando que o efeito do acúmulo de ciclos contribui para o aumento da deformação permanente, porém de forma menos significativa quando comparado à influência das tensões aplicadas.

Tabela 4.21 - Modelo de deformação permanente de Guimarães

Material	ψ_1	ψ_2	ψ_3	ψ_4	R^2
SP	0,09	-0,57	1,15	0,08	0,76
SE-0.5S ¹	0,07	-0,03	0,49	0,03	0,83
SE-0.5I ²	0,09	0,19	0,93	0,10	0,88
SE-8.55S ¹	0,05	0,89	0,90	0,03	0,85
SE-8.55I ²	0,04	-0,17	0,40	0,10	0,66

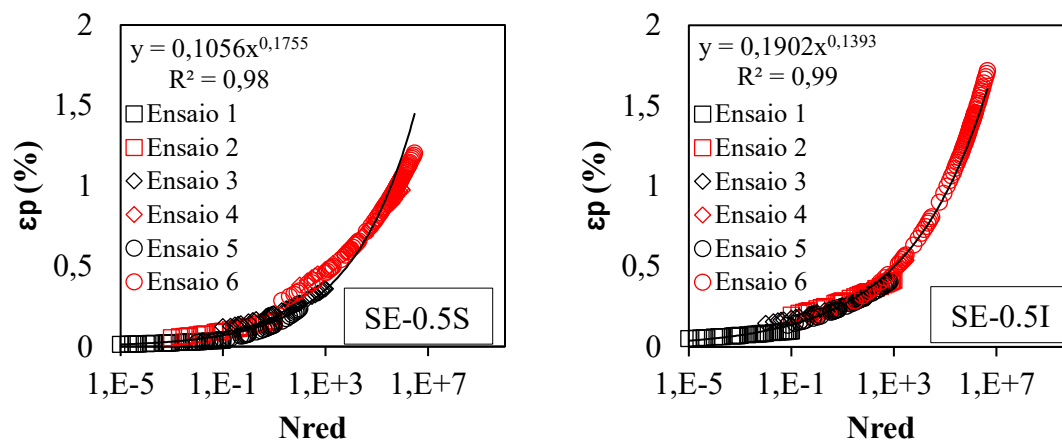
¹ Seco ao ar; ² Imerso.

No que se refere ao parâmetro ψ_2 , associado à tensão confinante, verifica-se variação de sinal entre os materiais analisados. Valores negativos, como observados para o SP, SE-0.5 e SE-8.55, indicam que o aumento da tensão confinante atua de forma benéfica na redução da deformação permanente. Por outro lado, valores positivos de ψ_2 , como nos casos do SE-0.5 e SE-8.55, sugerem que, para essas condições específicas de material e estado de umidade, o confinamento não foi suficiente para restringir a mobilização de deformações plásticas, possivelmente em função da alteração da estrutura interna do compósito (GUIMARÃES, 2009).

Os resultados de deformação permanente para cálculo das curvas mestres, conforme proposição de Mota et al. (2024; 2026), foram obtidos considerando os seis pares de tensão ensaiados, calculando os parâmetros por regressão não linear utilizando o software Matlab e utilizando o par 40 x 120 kPa como referência para construção.

A Figura 4.20 apresenta as curvas mestras para os materiais utilizados, associadas às equações ajustadas para cada curva, sendo possível observar um bom nível de concordância entre os dados experimentais e os modelos propostos. Os elevados valores de coeficiente de determinação (R^2), indicam que as equações potenciais adotadas são adequadas para representar o comportamento de deformação permanente dos materiais analisados ao longo do número reduzido de ciclos (Nred).

Observa-se que todas as curvas apresentam tendência crescente da deformação permanente específica (ϵ_p) com o aumento de Nred, evidenciando o caráter acumulativo e não recuperável das deformações sob carregamento cíclico. As diferenças de inclinação e de curvatura entre as curvas, presentes nas equações, refletem a distinta suscetibilidade dos materiais à deformação permanente. Além disso, nota-se que os materiais mais deformáveis apresentam coeficientes angulares mais elevados, indicando maior taxa de evolução da deformação permanente com o aumento do número de ciclos, enquanto materiais com melhor desempenho mecânico exibem crescimento mais moderado de ϵ_p .



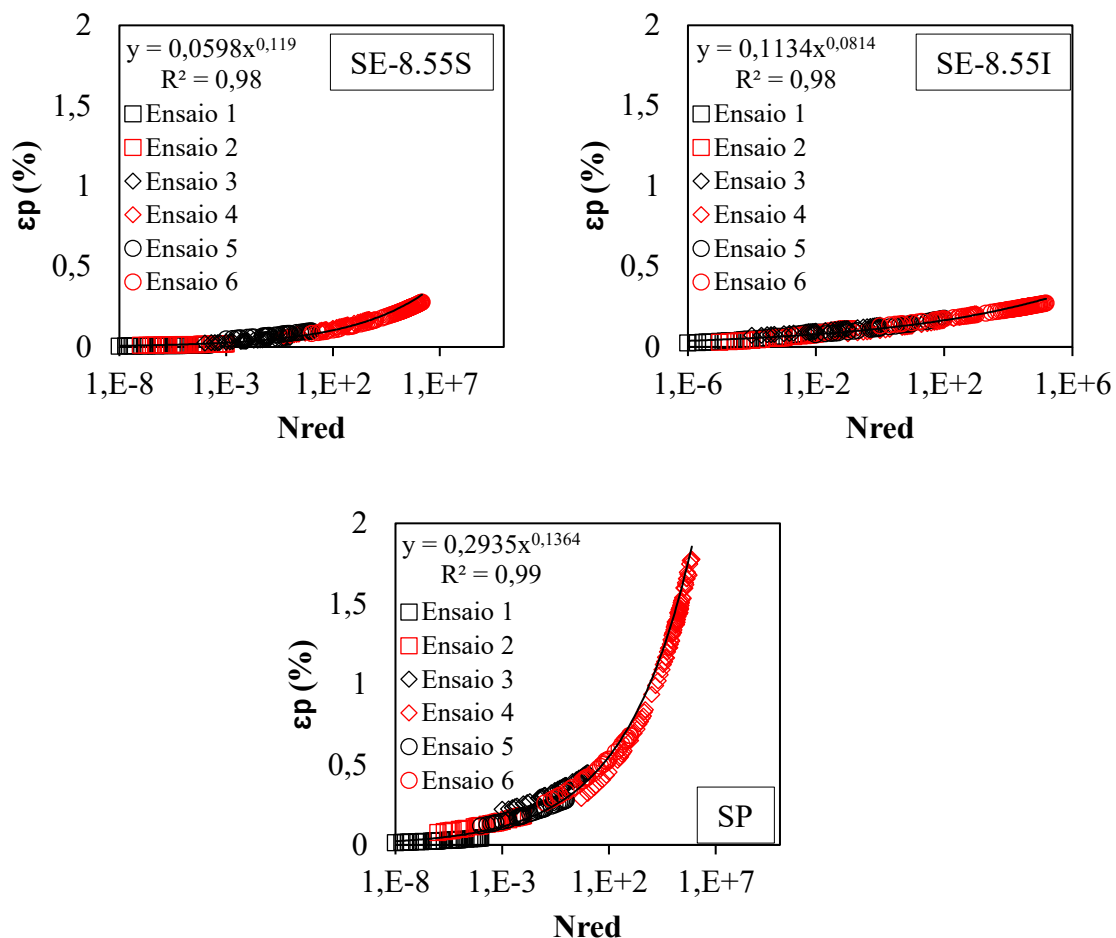


Figura 4.20 – Curvas mestres (PD-S) do solo puro e compósitos com 0,5% e 8,55% de enzima

4.11 LOAD WHEEL TEST (LWT)

Com base nos resultados do ensaio de *Load Wheel Test* (LWT), é sumarizado na Tabela 4.22 as medições feitas com o relógio comparador após 2500 ciclos de passagem da rota. A Figura 4.21 apresenta o desgaste observado a cada 500 ciclos de passagem, além da avaliação do desgaste em massa realizado após o ensaio.

Tabela 4.22 - Desgaste gerado pelo ensaio LWT

Material	Desgaste (mm)	Redução do desgaste (%)	Desgaste em massa (g)
SP-S	4,33	-	7,6
SP -Wot	12,7	-	332,1
SE-0.5	4,27	1,39	33,5
SE-8.55	3,77	12,93	29,1

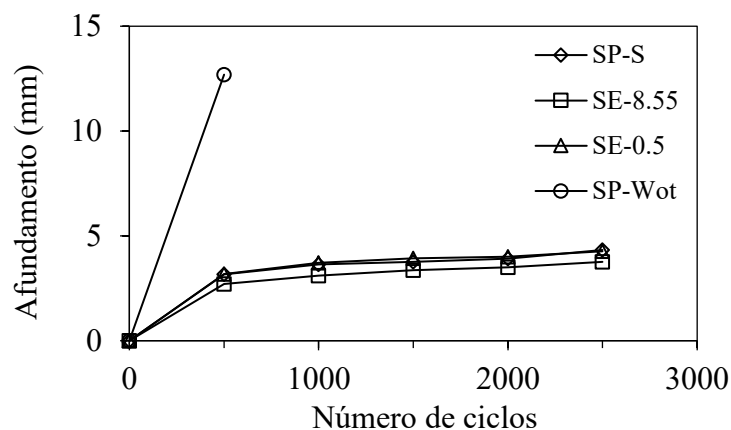


Figura 4.21 - Gráfico de afundamento do ensaio LWT

A análise dos resultados demonstra que, apesar das limitações do estudo e da proximidade entre alguns resultados, a condição SE-8.55 apresentou desempenho mais favorável, evidenciado pela redução do desgaste de 12,9% até 2500 ciclos. Observa-se, ainda, uma elevada proximidade entre os resultados obtidos para SE-0.5 e SP-S, o que indica que os danos associados ao desgaste no solo puro podem ter sido atenuados em razão da perda de umidade durante o processo de secagem ao ar. Além disso, observa-se que a massa desprendida dos compósitos foi superior à do solo puro. Tal comportamento se justifica pelo fato de que o solo puro apresentou apenas desgaste localizado na região central da placa, enquanto nos compósitos o desprendimento ocorreu em diferentes regiões.

Ao avaliar os resultados dos compósitos em comparação com o SP-Wot, correspondente ao solo puro moldado na umidade ótima e ensaiado imediatamente após a moldagem, observa-se que como o efeito da sucção foi minimizado, associada a um grau de saturação maior que SP-S, ocorreu uma mudança significativamente nos resultados. Evidenciando que na condição SP-S, de fato o efeito da sucção mascarou o comportamento mecânico do material, uma vez que, quando ensaiado logo após a moldagem, o corpo de prova não resistiu a 500 ciclos, atingindo o limite máximo de desgaste permitido pelo equipamento.

Complementarmente, a Figura 4.22 apresenta os corpos de prova após a realização do ensaio. Percebe-se que todas as condições experimentais desgastes pronunciados. Com base nas evidências de melhoria obtidas para os solos estabilizados com enzima frente a carregamentos cíclicos perante o módulo de resiliência e deformação permanente, acredita-se que os resultados insatisfatórios obtidos no ensaio LWT para o solo estabilizado podem estar associados a limitações do arranjo experimental adotado. A reduzida espessura da placa utilizada no ensaio pode ter introduzido uma vulnerabilidade estrutural no sistema, tornando-o mais suscetível a

deformações localizadas e instabilidades geométricas, como demonstrado pela Figura 4.22c em que houve a completa desagregação para o compósito SE-0.5.



Figura 4.22 - Ensaio LWT: a) SP-S; b) SE-0.5; c) SE-8.55; d) Ensaio interrompido por afundamento máximo no solo estabilizado para SE-0.5; e) SP-Wot

Além disso, o equipamento empregado consiste em uma adaptação de um sistema originalmente desenvolvido para outra finalidade, o que pode ter resultado em condições de contorno não ideais para a avaliação do comportamento do material ensaiado. Nesse contexto, a elevada rigidez do solo estabilizado pode ter intensificado efeitos de concentração de tensões e instabilidades locais, comprometendo a representatividade dos resultados obtidos.

Dessa forma, os resultados do ensaio LWT devem ser interpretados com cautela, uma vez que as respostas observadas podem refletir limitações do dispositivo experimental

desenvolvido, carga muito elevada de solicitação, e não necessariamente o comportamento mecânico intrínseco do material. Estudos adicionais, com variação da espessura da placa, aprimoramento das condições de contorno e adequação do equipamento à finalidade específica do ensaio, são recomendados para melhor compreender a influência desses fatores nos resultados.

4.12 MICROESTRUTURA

A partir das curvas de distribuição dos macros e microporos obtidos no ensaio de PIM (Figura 4.23), nota-se que o solo estabilizado apresentou modificações na sua microestrutura quando comparado ao solo puro compactado. Primeiramente, observa-se pico significativo na faixa dos microporos, com diâmetros da ordem de aproximadamente 0,01 μm , com coincidência de picos de frequência para o solo puro e estabilizado com 0,5% de enzima. Considerando o solo com 8,55% de enzima, observa-se uma diminuição na frequência, isto é, redução da quantidade de microporos. Como já discutido anteriormente, a parcela de microporos, mesmo frente ao processo de compactação e de solicitações, se mantém constante na estrutura, não participando das alterações de comportamento hidromecânico, logo, atribui-se a redução aos efeitos eletroquímicos de aproximação das partículas decorrentes da presença de enzima no teor de 8,55% (OTÁLVARO et al., 2015; CRIPPA et al. , 2025).

Quanto aos macroporos, identifica-se uma redução do volume incremental na faixa de 10 μm no SE-8.55, fisicamente representada pela diminuição do índice de vazios e aumento obtido na massa específica seca máxima para essa condição. No caso do SE-0.5 é possível notar que há uma translação dos poros na faixa de 10 μm para 100 μm , justificando a queda da massa específica seca máxima para essa condição experimental. Vale mencionar que a análise de PIM tem fins qualitativos e, por esse motivo, qualquer extrapolação para fins quantitativos pode incorrer em imprecisão e erro.

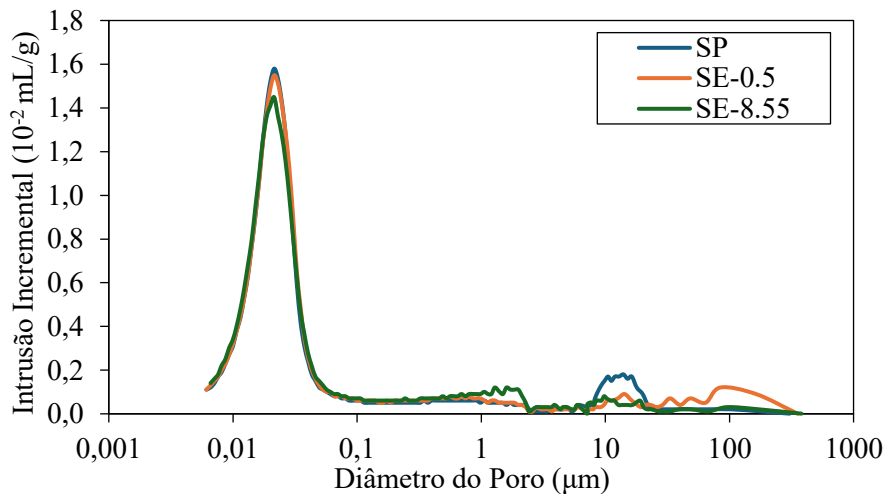


Figura 4.23 - Ensaio de Porosimetria por Intrusão de Mercúrio (PIM).

Essa alteração na distribuição dos poros sugere uma reorganização da microestrutura do solo, caracterizada pela diminuição da fração de poros maiores e pela formação de uma estrutura mais compacta e homogênea. Tal comportamento é coerente com os resultados obtidos no ensaio triaxial, no qual se verificou redução da permeabilidade do solo estabilizado em relação ao solo puro, indicando menor conectividade dos vazios e menor facilidade de percolação de água.

A literatura atribui esse efeito à atuação das enzimas sobre as partículas de argila, promovendo a redução da espessura da dupla camada difusa e, conseqüentemente, diminuindo as forças repulsivas entre as partículas (RAUCH et al., 2002; RENJITH et al., 2020; LI et al., 2025). Com a diminuição dessas forças, ocorre uma aproximação das lâminas de argila, favorecendo o rearranjo das partículas e a formação de uma estrutura mais estável e menos suscetível à movimentação de água. Esse mecanismo é amplamente discutido por autores como Rauch et al. (2002), que relatam que estabilizantes enzimáticos podem alterar o equilíbrio eletroquímico das argilas, resultando em menor plasticidade, menor permeabilidade e redução da expansão.

Finalmente, a Figura 4.24 apresenta as imagens de microscopia eletrônica de varredura considerando o solo puro e estabilizado para ambos os teores de solução enzimática, sob o aumento de 5.000x. Quando se compara as três condições, evidencia-se que o tratamento enzimático promove uma evolução progressiva no arranjo estrutural do solo. Embora não seja possível visualizar qualitativamente diferenças significativas entre as condições SE-0.5 e SE-8.55, quando comparadas ao solo puro, observa-se uma transição de um estado inicial mais

poroso e identificação individual de grãos de quartzo (DELGADO, 2007), para uma estrutura mais compacta e homogênea. Além disso, a textura da superfície é rugosa devido à presença de microporos, conforme indicado na porosimetria (OTÁLVARO et al., 2015).

Esse resultado indica uma maior aglomeração das partículas do solo estabilizado em comparação ao solo em seu estado natural, interligando efetivamente as partículas e ancorando-as, promovendo, assim, o aumento da ligação entre as partículas. A partir desse mecanismo, confirma-se que o solo estabilizado com 8,55% de enzima apresenta uma diminuição no índice de vazios das amostras, uma vez que as partículas tendem a se ligar entre si, restringindo o espaço poroso existente entre elas (CHOUDALAKIS E GOTSIS, 2009; SCHOLEN, 1995; TINGLE et al., 2007). Ainda, o mesmo efeito já foi relatado por outros autores utilizando enzimas, consonante com Ganapathy et al. (2017); Renjith et al. (2020); Li et al. (2025); Pan et al. (2026).

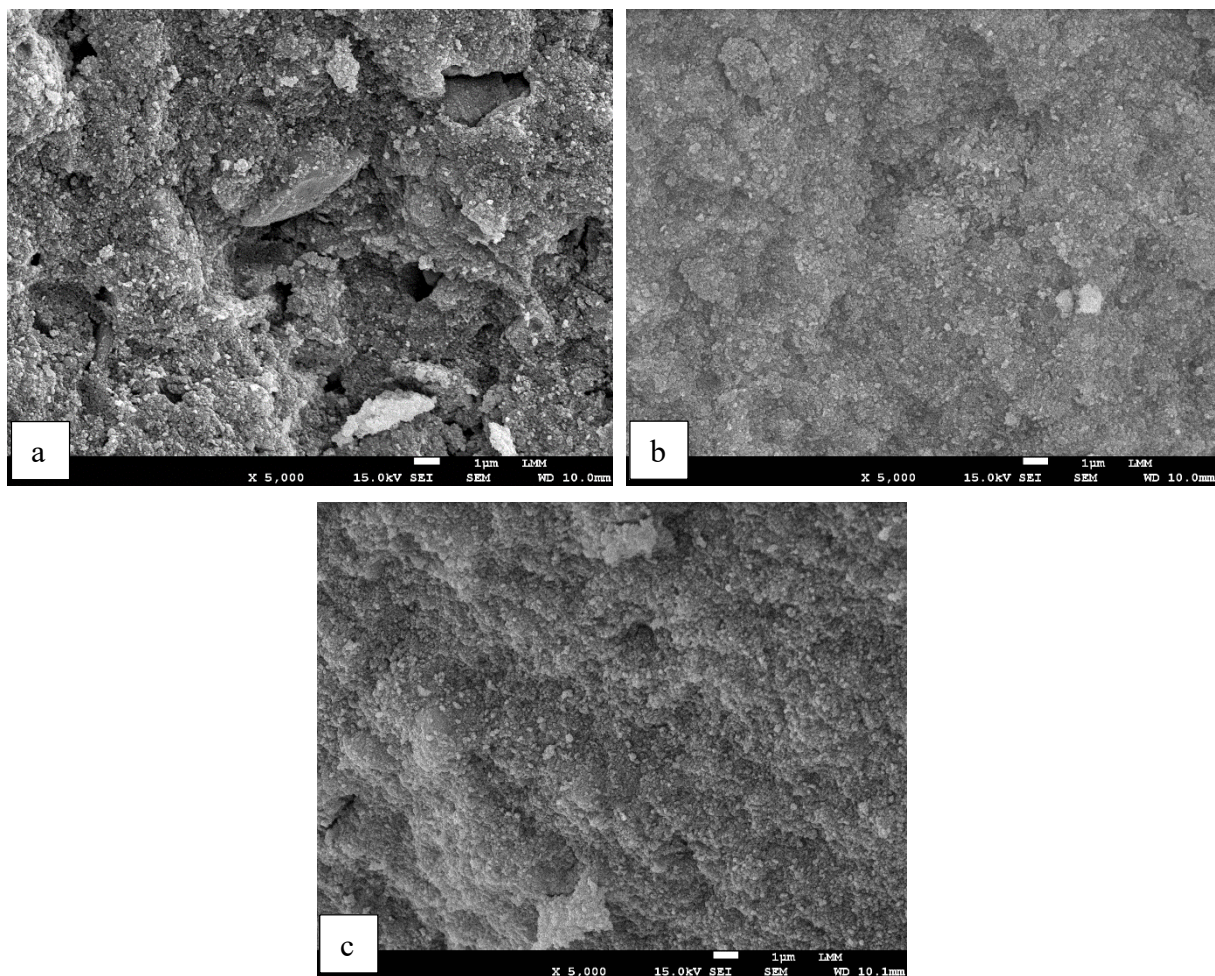


Figura 4.24 – Microscopia Eletrônica de Varredura para: a) SP; b) SE-0.5; c) SE-8.55

A Tabela 4.23 apresenta os resultados semiquantitativos para identificação dos elementos dominantes nos materiais avaliados pela espectroscopia por energia dispersiva (EDS) realizada em conjunto com o MEV.

Tabela 4.23 - Elementos encontrados pela técnica de EDS

Material	Elemento - Percentual em massa (%)								
	C	O	Na	Al	Si	K	Fe	Au	Total
SP	0	21,15	0	13,53	3,28	0,59	7,91	53,54	100
SE-0.5	0	31,9	0,18	16,06	3,27	0	8,54	40,05	100
SE-8.55	0	21,6	0,5	15,2	2,88	0,2	14,02	45,59	100

Os resultados de EDS indicam que não ocorreram alterações significativas na composição elementar do solo com a adição do estabilizante enzimático. Observa-se que as proporções de Al e Si permanecem relativamente constantes entre o solo puro e os solos estabilizados, sugerindo a ausência de reações químicas que modifiquem a composição mineralógica. As variações observadas nos teores de oxigênio e ferro são atribuídas às limitações inerentes à técnica de EDS, tais como a natureza semiquantitativa da análise, a heterogeneidade do solo e a dependência da área analisada. Ressalta-se que a presença do elemento ouro (Au) nas análises é proveniente do processo de metalização.

Ademais, é possível observar um leve incremento de sódio (Na) nos compósitos estabilizados, conforme analisado em ensaios químicos como o FRX e ICP/OES, corroborando com a ideia de que a enzima contém sais solúveis de sódio, justificando seu valor de pH encontrado. A não detecção do elemento carbono nas análises de EDS está associada às limitações da técnica para a quantificação de elementos leves, bem como à influência da metalização com ouro utilizada na preparação das amostras. Assim, a ausência de picos representativos de carbono não indica a inexistência desse elemento no solo, mas sim a limitação do método analítico empregado.

A partir de ambas as análises, PIM e MEV, conclui-se que a solução enzimática promove alterações estruturais no solo argiloso tropical, consequentemente modificando positivamente as respostas mecânicas estáticas e cíclicas do material. Todavia, esse processo de estabilização não resulta na formação de um novo composto químico, como ocorre em estabilizantes tradicionais como cal e cimento e como já foi comprovado pela análise química dos compósitos. Pelo contrário, a solução enzimática modifica as cargas elétricas da superfície dos minerais do solo, promovendo um efeito de aproximação e agregação, diretamente associado a melhoria do comportamento geotécnico do material.

5. CONCLUSÕES

Esta pesquisa teve como objetivo geral compreender o efeito da estabilização enzimática no comportamento mecânico de um solo tropical argiloso, visando sua aplicação em obras de terra e pavimentação. Para tanto, foi desenvolvido um programa experimental abrangente, envolvendo a caracterização físico-química-mineralógica do solo e do estabilizante, bem como a avaliação do desempenho mecânico do material sob solicitações estáticas, carregamentos repetidos e ensaios tradicionalmente empregados em pavimentação. A partir da análise integrada dos resultados, pode-se concluir que:

- A partir da compreensão das características físico-química, mineralógica e térmica do solo e da enzima, evidenciou-se que a estabilização enzimática não promove alterações significativas na composição mineralógica do solo, típica de solos lateríticos, com predominância de caulinita e presença de óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio. Pressupõe-se que o mecanismo de atuação da enzima está associado principalmente à modificação das interações físico-químicas entre partículas finas, à redução da repulsão eletrostática e ao rearranjo microestrutural do solo, e não a reações químicas de natureza cimentante;
- Quanto à influência do teor de dosagem da enzima, observou-se que a estabilização enzimática resulta em ganhos progressivos de resistência até o teor-limite de 8,55%, sobretudo na condição seca ao ar. Na condição imersa, os ganhos de resistência foram menos pronunciados, evidenciando a sensibilidade do mecanismo de estabilização à presença de água, embora os compósitos estabilizados ainda tenham apresentado comportamento superior ao do solo puro, demonstrando sua importância em adoção de ensaios mecânicos em regiões tropicais;
- Sob efeito de solicitações estáticas, a estabilização enzimática contribui de forma significativa para o aumento dos parâmetros de resistência, predominantemente refletido no incremento de intercepto coesivo e ângulo de atrito;
- No comportamento sob carregamento repetido, os compósitos com enzima demonstraram desempenho superior quando comparados aos do solo puro. Para o módulo de resiliência, observou-se uma melhora de 56% para o teor de 8,55% e de 18,3% para 0,5%. Além de apresentarem menores deformações permanentes acumuladas e, em diversos níveis de tensão, redução da taxa de acréscimo de deformação permanente ao longo dos ciclos, especialmente para o teor de 8,55% de

enzima, ocorre uma acomodação mais eficiente do material, com comportamento mais próximo dos regimes tipo A ou AB quando a análise do fenômeno de *shakedown*;

- Os resultados de CBR evidenciaram aumento significativo da capacidade de suporte dos solos estabilizados em relação ao solo puro e diminuição da expansão, confirmando a melhoria global do comportamento mecânico. De maneira geral, os resultados de LWT indicaram redução limitada do desgaste superficial nos compósitos estabilizados, os quais acredita-se serem decorrentes das limitações do sistema experimental desenvolvido;
- A partir das análises microestruturais, confirmou-se que a estabilização enzimática promove uma reorganização da estrutura interna do solo, com maior aglomeração das partículas finas, redução da conectividade dos poros e diminuição da permeabilidade, refletindo-se em tendência de redução dos macroporos na faixa de 10 μm e manutenção dos microporos na faixa de 0,01 μm .

Este estudo demonstrou, por meio de ensaios laboratoriais e análises complementares, que a estabilização enzimática constitui uma alternativa viável para obras geotécnicas. Diferente de abordagens recorrentes na literatura, frequentemente restritas a ensaios de compressão simples e CBR, esta pesquisa utilizou ensaios triaxiais monotônicos e cíclicos para evidenciar ganhos em resistência ao cisalhamento e módulo de resiliência. A consequente redução da deformação permanente ratifica o potencial competitivo deste estabilizante frente às soluções convencionais, consolidando uma contribuição efetiva para o avanço técnico-científico.

5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Com base nos resultados obtidos e nas limitações observadas ao longo do desenvolvimento experimental, apresentam-se, a seguir, algumas sugestões para trabalhos futuros. As propostas visam aprofundar a compreensão do comportamento mecânico dos compósitos estudados, bem como ampliar a aplicabilidade dos métodos e análises adotados nesta pesquisa.

- Adaptação do sistema experimental para o ensaio LWT, contemplando a realização de ensaios com níveis de carga inferiores e/ou com moldes de maior espessura em relação aos utilizados neste estudo;

- Realização do ensaio do papel filtro para a determinação da sucção matricial dos compósitos e do solo puro, com o objetivo de avaliar a possível influência da enzima na curva de retenção do solo;
- Execução do programa experimental sob diferentes energias de compactação, especificamente nas energias normal e modificada;
- Investigar a perda de desempenho ao longo do tempo, simulando envelhecimento acelerado dos compósitos;
- Avaliar o comportamento mecânico para períodos de cura mais longos (14, 28, 60 e 90 dias), verificando se os ganhos observados são transitórios ou permanentes;
- Empregar técnicas adicionais, como BET (área superficial específica) ou microtomografia (μ CT), para quantificar alterações de porosidade e conectividade dos vazios.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABOUKHADRA, Abdullah; ZIDAN, Ahmed F.; GABER, Yasser. Experimental evaluation of strength characteristics of different Egyptian soils using enzymatic stabilizers. *Cogent Engineering*, v. 5, n. 1, p. 1–11, 1 jan. 2018.

AGARWAL, Puneet; KAUR, Suneet. Effect of Bio-Enzyme stabilization on unconfined compressive strength of expansive soil. *IJRET: International Journal of Research in Engineering and Technology*. 2014.

AHENKORAH, Isaac *et al.* A Review of Enzyme Induced Carbonate Precipitation (EICP): The Role of Enzyme Kinetics. *Sustainable Chemistry Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI)*, 1 mar. 2021.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. D 2487-17. Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System), 2017.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. D 3282-15. Standard Practice for Classification of Soils and Soil-Aggregates Mixtures for Highway Construction Purposes, 2015.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. D 440-07(2019). Standard Test Method of Drop Shattered Test for Coal, 2019.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. D 5084-24. Standard Test Methods for Measurement of Hydraulic Conductivity of Saturated Porous Materials Using Flexible Wall Permeameter, 2024.

ANDRADE, Jonathan *et al.* FTIR-ATR determination of protein content to evaluate whey protein concentrate adulteration. *LWT*, v. 99, p. 166–172, 1 jan. 2019.

ARABANI, Mahyar; SHALCHIAN, Mohammad Mahdi. A review of the use of bio-based substances in soil stabilization. *Environment, Development and Sustainability Springer Science and Business Media B.V.*, 1 jun. 2024.

ARAÚJO, H. A. O. Estudo sobre a validação de uma metodologia de classificação de solos lateríticos com vistas à execução de camadas de pavimentos rodoviários. *Dissertação (Mestrado)—Campina Grande: Universidade Federal de Campina Grande*, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6457: Amostras de solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2024.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6459: Solo – determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6508: Grãos de solos que passam na peneira de 4,8 mm – determinação da massa específica. Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7180: Solo – determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2025.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7181: Solo – análise granulométrica. Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2025.

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7182: Solo – ensaio de compactação. Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2025.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9895: Solo – Índice de suporte Califórnia (ISC) – Método de ensaio. Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2025.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12770: Solo – Determinação da resistência à compressão não confinada de solo coesivo. Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2022.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 14841: Misturas asfálticas – Determinação da adesão de areia em microrrevestimentos asfálticos a frio por meio da máquina/LWT. Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2015.
- BERNUCCI, L. B et al. Pavimentação asfáltica: Formação básica para engenheiros. Rio de Janeiro: Petrobras, 2006. 504p.
- BERNUCCI, Liedi Légi Bariani. Considerações sobre o dimensionamento de pavimentos utilizando solos lateríticos para rodovias de baixo volume de tráfego. Tese (Doutorado) – São Paulo: Universidade de São Paulo, 1995.
- BORGES, Camilla Rodrigues. Estudo Microestrutural do Comportamento Hidromecânico do Solo de Brasília-DF. Tese de Doutorado: Universidade de Brasília, 2014.
- BOSZCZOWSKI, Roberta Bomfim *et al.* Laboratório de mecânica dos solos - Ensaio especiais. 2023.
- BRAZETTI, Rubens. Considerações sobre a influência de distintos aditivos orgânicos nas características micromorfológicas, mineralógicas, físicas, mecânicas e hidráulicas de um solo laterítico. Tese (Doutorado)—São Paulo: Universidade de São Paulo, 1998.
- BRAZETTI, Rubens; MURPHY, Sheldon R. General Use of Bio-Enzyme Stabilizers in Road Construction. *In: 32° Annual Meeting on Paving*. Brasília - DF: 2000.
- BRITISH STANDARDS INSTITUTION. BS 1377-7: Methods of test for soils for civil engineering purposes – Part 7: Shear strength tests (total stress). London, 1990.
- BRITISH STANDARDS INSTITUTION. BS 1377-8: Methods of test for soils for civil engineering purposes – Part 8: Shear strength test (effective stress). London, 1990.
- CAETANO, Mateus Ribeiro. Estudo do comportamento mecânico de solos tropicais e materiais britados de pavimentos rodoviários do distrito federal e do estado de Roraima. Dissertação (Mestrado)—Brasília: Universidade de Brasília, 2024.
- CALLAI, Nicole Deckmann. Biocimentação em Solo Argiloso Residual de Basalto. Dissertação (mestrado): Universidade de Passo Fundo, 2021.
- CARDOSO, Fabricio Bueno da Fonseca. Propriedades e comportamento mecânico de solos do planalto central brasileiro. Tese (Doutorado): Universidade de Brasília, 2002.
- CARVALHO, J. C. *et al.* Solos não saturados no contexto geotécnico. 1. ed. São Paulo: AMBS, 2015. v. 1
- CASANOVA, L. V. P. Estabilização de Minerais Argilosos com Cal. Rio de Janeiro: Petrobras: Petróleo Brasileiro S.A., 1988.

- CAVALCANTE MOTA, Bruno *et al.* Optimized characterization of the permanent deformation of unbound soils and granular materials considering the master curve concept. *Transportation Geotechnics*, v. 47, 1 jul. 2024.
- CHANDLER, Neil; PALSON, John; BURNS, Todd. Capillary rise experiment to assess effectiveness of an enzyme soil stabilizer. *Canadian Geotechnical Journal*, v. 54, n. 10, p. 1509–1517, 2017.
- CHERATA, Iulian Dumitru. Caracterização da Caulinita da Região do Rio Capim, Pará. Dissertação (mestrado)—Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2016.
- CHOUDALAKIS, G.; GOTSIS, A. D. Permeability of polymer/clay nanocomposites: A review. *European Polymer Journal*, abr. 2009.
- CNT. Pesquisa CNT de Rodovias 2013: relatório gerencial. Brasília: SEST SENAT, 2013.
- CNT. Pesquisa CNT de Rodovias 2024. Brasília: SEST SENAT, 2024.
- CRIPPA, Mateus Teixeira *et al.* Hydro-Mechanical Behavior of Tropical Soils Reinforced with Recycled PET Fibers: Influence of Weathering on Fiber-Matrix Interaction. *Geotechnical and Geological Engineering*, v. 43, n. 2, 1 fev. 2025.
- DAWSON, A.; KOLISOJA, P.; ROADDEX I. I. Permanent Deformation, Report on Task. 2004.
- DE LIMA, Caroline Dias Amancio; DA MOTTA, Laura Maria Goretti; ARAGÃO, Francisco Thiago Sacramento. Permanent deformation tests: Effect of the number of loading cycles on the interpretation of the behavior of soils and gravels. *Revista Materia*, v. 26, n. 3, 2021.
- DE OLIVEIRA, Alana Dias *et al.* The structure of tropical lateritic soils as an impacting factor in the shape of soil-water characteristic curves. *Soils and Rocks*, v. 45, n. 2, 1 abr. 2022.
- DELGADO, A. K. C. Estudo do Comportamento Mecânico de Solos Tropicais Característicos do Distrito Federal para Uso na Pavimentação Rodoviária. Tese de Doutorado—[S.l.]: Universidade de Brasília, 2007.
- DELGADO, Bruno Guimarães; GUIMARÃES, Antônio Carlos Rodrigues; MOTTA, Laura Maria Goretti. A Teoria do Shakedown Aplicada à Pavimentação com Solos Tropicais. *In: Goiânia/GO*: 2014.
- DEYLAGHIAN, Sajjad *et al.* Non-ureolytic EICP as a novel enzymatic pathway for sustainable soil stabilization. *Scientific Reports*, v. 15, n. 1, 1 dez. 2025.
- DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Diretoria de Planejamento e Pesquisa. Coordenação Geral de Estudos e Pesquisa. Instituto de Pesquisas Rodoviárias. Norma DNIT 134/2018 – ME. Pavimentação – Solos – Determinação do módulo de resiliência – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2018.
- DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Diretoria de Planejamento e Pesquisa. Coordenação Geral de Estudos e Pesquisa. Instituto de Pesquisas Rodoviárias. Norma DNIT 179/2018 – IE. Pavimentação – Solos – Determinação da deformação permanente – Instrução de Ensaio. Rio de Janeiro, 2018.
- DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Diretoria de Planejamento e Pesquisa. Coordenação Geral de Estudos e Pesquisa. Instituto de Pesquisas Rodoviárias. Norma DNIT 258/2023 – ME. Solos – Compactação em equipamento miniatura – Ensaio Mini-MCV e perda de massa por imersão – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2023.

DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Diretoria de Planejamento e Pesquisa. Coordenação Geral de Estudos e Pesquisa. Instituto de Pesquisas Rodoviárias. Norma DNIT 259/2023 – CLA. Solos – Classificação de solos finos tropicais para finalidades rodoviárias utilizando corpos de prova compactados em equipamento miniatura – Classificação. Rio de Janeiro, 2023.

DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Diretoria de Planejamento e Pesquisa. Coordenação Geral de Estudos e Pesquisa. Instituto de Pesquisas Rodoviárias. Norma DNIT 445/2023 – ES. Terraplenagem – Revestimento primário – Especificação de serviço. Rio de Janeiro, 2023.

EUIJINE, Greeshma Nizy; CHANDRAKARAN, S.; SANKAR, N. Accelerated Subgrade Stabilization Using Enzymatic Lime Technique. *Journal of Materials in Civil Engineering*, v. 29, n. 9, set. 2017a.

EUIJINE, Greeshma Nizy; CHANDRAKARAN, Sreedharan; SANKAR, Natesan. The engineering behaviour of enzymatic lime stabilised soils. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Ground Improvement*, v. 170, n. 1, p. 1–11, 1 fev. 2017b.

FADEEVA, V. P.; TIKHOVA, V. D.; NIKULICHEVA, O. N. Elemental analysis of organic compounds with the use of automated CHNS analyzers. *Journal of Analytical Chemistry*, v. 63, n. 11, p. 1094–1106, nov. 2008.

FERREIRA, José Wilson dos Santos *et al.* The feasibility of recycled micro polyethylene terephthalate (PET) replacing natural sand in hot-mix asphalt. *Construction and Building Materials*, v. 330, 2 maio 2022.

GANAPATHY, G. P. *et al.* Bio-Enzymatic Stabilization of a Soil Having Poor Engineering Properties. *International Journal of Civil Engineering*, v. 15, n. 3, p. 401–409, 26 maio 2017.

GUIMARÃES, A. C. R. Estudo de deformação permanente em solos e a teoria do shakedown aplicada a pavimentos flexíveis. Dissertação (Mestrado)—Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2001.

GUIMARÃES, A. C. R. Um método mecanístico-empírico para a previsão da deformação permanente em solos tropicais constituintes de pavimentos. Tese (doutorado)—Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2009.

GUIMARÃES, Antonio Carlos Rodrigues; DA MOTTA, Laura Maria Goretti; CASTRO, Carmen Dias. Permanent deformation parameters of fine – grained tropical soils. *Road Materials and Pavement Design*, v. 20, n. 7, p. 1664–1681, 3 out. 2018.

HOLLER, F. James. *et al.* Princípios de análise instrumental. Bookman, 2009.

Instituto de Pesquisa e Estatística do Distrito Federal – IPEDF. *Atlas do Distrito Federal*. Brasília: IPEDF, 2020. Disponível em: <https://atlas.ipe.df.gov.br/>. Acesso em: 13 de fevereiro de 2026.

JACKSON, Michael; MANTSCH, Henry H. The use and misuse of FTIR spectroscopy in the determination of protein structure. *Critical Reviews in Biochemistry and Molecular Biology*, v. 30, n. 2, p. 95–120, 1995.

JONES, David *et al.* UNPAVED ROAD DUST MANAGEMENT: A Successful Practitioner’s Handbook. Western Transportation Institute. Federal Highway Administration. Central Federal Lands Highway Division. 2013.

- JOSE, Anu; KRISHNAN, J. Murali; ROBINSON, R. G. Resilient and Permanent Deformation Response of Cement-Stabilized Pond Ash. *Journal of Materials in Civil Engineering*, v. 34, n. 1, jan. 2022.
- JUBB, Aaron M.; ALLEN, Heather C. Vibrational spectroscopic characterization of hematite, maghemite, and magnetite thin films produced by vapor deposition. *ACS Applied Materials and Interfaces*, v. 2, n. 10, p. 2804–2812, 27 out. 2010.
- KADLOBICKI, Lucas *et al.* Efeito da adição de cinza de forno de olaria a solo argiloso em estradas não pavimentadas. *Ambiente Construído*, v. 24, dez. 2024.
- KHAN, Tanveer Ahmed *et al.* Strength and volume change characteristics of clayey soils: Performance evaluation of enzymes. *Minerals*, v. 10, n. 1, 1 jan. 2020.
- KHAN, Tanveer Ahmed; TAHA, Mohd Raihan. Effect of three bioenzymes on compaction, consistency limits, and strength characteristics of a sedimentary residual soil. *Advances in Materials Science and Engineering*, v. 2015, 2015.
- KHANNA, Vishal; BERIHA, Brundaban; SAHOO, Umesh Chandra. Mechanical Characterization of a Bio-enzyme Treated Granular Lateritic Soil for Application in Low Volume Roads. *In: DEY, Ashim Kanti; MANDAL, Jagat Jyoti; MANNA, Bappaditya (Orgs.). Proceedings of the 7th Indian Young Geotechnical Engineers Conference. Singapore: Springer Nature Singapore, 2022. p. 185–193.*
- KUSHWAHA, S. S.; KISHAN, D.; DINDORKAR, N. Stabilization of Expansive Soil Using Eko Soil Enzyme For Highway Embankment. *Materials Today: Proceedings*, v. 5, n. 9, p. 19667–19679, 2018.
- LEKARP, F.; DAWSON, A. Modelling permanent deformation behaviour of unbound granular materials *Construction and Building Materials*. 1998.
- LI, Yuhao *et al.* Review of bio-enzyme for soil improvement. *Biogeotechnics* KeAi Communications Co., 1 mar. 2025.
- LIMA, Caroline Dias Amancio de *et al.* Análise de Módulo de Resiliência de Solos Finos Tropicais para Avaliação e Dimensionamento de Pavimentos. *In: Editora Cubo*, 18 ago. 2022.
- LOPERA, J. F. B. Influência da microestrutura no comportamento mecânico dos solos tropicais naturais e compactados. *Dissertação (Mestrado)—Brasília: Universidade de Brasília*, 2016.
- MACÊDO, J. A. G. Interpretação de ensaios defletométricos para avaliação estrutural de pavimentos flexíveis. *Tese (Doutorado em Engenharia Civil)—Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro*, 1996.
- MADEJOVÁ, J. FTIR techniques in clay mineral studies. *Vibrational Spectroscopy*, v. 31, n. 1, p. 1–10, jan. 2003.
- MALKO, José Adriano Cardoso. Aplicabilidade de Enzimas para Melhoramento de Solos em Pavimentação. *Dissertação (Mestrado)—Rio de Janeiro, Brazil: Pontifca Universidade Católica do Rio de Janeiro*, 4 mar. 2015.
- MALKO, José Adriano Cardoso *et al.* Application of Enzymes for Stabilization of Soils in Paving. *Key Engineering Materials*, v. 668, p. 150–159, out. 2015.
- MARANGON, M. Proposição de Estruturas Típicas de Pavimentos para Região de Minas Gerais Utilizando Solos Lateríticos Locais a partir da Pedologia, Classificação MCT e

- Resiliência. Tese (Doutorado em Ciências em Engenharia Civil)—Rio de Janeiro: Programa de Pós-graduação da Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2004.
- MARASTEANU, Mihai O. *et al.* Preliminary Laboratory Investigation of Enzyme Solutions as a Soil Stabilizer. Western Transportation Institute. Federal Highway Administration. Central Federal Lands Highway Division. 2005
- MEDINA, Jacques; MOTTA, Laura Maria Goretti. Mecânica dos Pavimentos. 3. ed. [S.l.]: Editora Interciência, 2015.
- MEKONNEN, Eshetu *et al.* Application of Microbial Bioenzymes in Soil Stabilization. International Journal of Microbiology Hindawi Limited, 2020.
- MGANGIRA, Martin B. Evaluation of the effects of enzyme-based liquid chemical stabilizers on subgrade soils. *In: 28th Southern African Transport Conference*, 2009.
- MILBURN, Justin P.; PARSONS, Robert L. Performance of Soil Stabilization Agents. *In: Kansas: The Kansas Department of Transportation Topeka, Kansas*, 1 maio 2004.
- MITTAL, Ayush. Soil Stabilization Using Bio-Enzyme: A Review. *In: Andhra University, Vi: Visakhapatnam Chapter*, 2020.
- MOLIS, E. *et al.* Initial steps of ligand-promoted dissolution of gibbsite. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, v. 163, n. 2–3, p. 283–292, abr. 2000.
- MOTA, Bruno Cavalcante *et al.* A data-driven approach to optimize the permanent deformation analysis of soils and granular materials based on the construction of master curves. *International Journal of Pavement Engineering*, v. 27, n. 1, 2026.
- MUGUDA, Sravan; NAGARAJ, H. B. Effect of enzymes on plasticity and strength characteristics of an earthen construction material. *International Journal of Geo-Engineering*, v. 10, n. 1, 2019.
- NADEEM, Muhammad *et al.* Evaluation of engineering properties of clayey sand bio-mediated with terrazyme enzyme. *Frontiers in Materials*, v. 10, 2023.
- NATALELLO, Antonino *et al.* Secondary structure, conformational stability and glycosylation of a recombinant *Candida rugosa* lipase studied by Fourier-transform infrared spectroscopy. *Biochemical Journal*, v. 385, n. 2, p. 511–517, 15 jan. 2005.
- NGUYEN, TT; JANIK, LJ; RAUPACH, M. Diffuse reflectance infrared fourier transform (DRIFT) spectroscopy in soil studies. *Soil Research*, v. 29, n. 1, p. 49–67, 1 fev. 1991.
- NORBACK, Carine. Caracterização do módulo de resiliência e da deformação permanente de três solos e misturas solo-brita. Dissertação (Mestrado)—Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2018.
- O'DONNELL, B. *et al.* Guidelines for Enzymatic Soil Stabilization. *In: Springer Science and Business Media Deutschland GmbH*, 2023.
- OHADIAN, Ali *et al.* Soft Clay Modified with Municipal Solid Waste and Stabilized with Nano-MgO for Pavement Subgrade and Embankment Fill Applications. *Transportation Geotechnics*, v. 46, 1 maio 2024.
- OLSZAK-HUMIENIK, Magdalena; JABLONSKI, Maciej. Thermal behavior of natural dolomite. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, v. 119, n. 3, p. 2239–2248, 2015.

- OTÁLVARO, Ivan Fernando; NETO, Manoel Porfírio Cordão; CAICEDO, Bernardo. Compressibility and microstructure of compacted laterites. *Transportation Geotechnics*, v. 5, p. 20–34, 14 maio 2015.
- PACHECO, Bruna. Imobilização da lipase de *Pichia pastoris* em óxido de grafeno: Uma abordagem integrada a hidrólise enzimática com separação simultânea empregando biorreator de membrana. [S.l.]: Universidade Federal de Uberlândia, 10 dez. 2024.
- PAN, Kun *et al.* Terrazyme-enhanced cement stabilization of soft clay: insights from laboratory and field tests. *Canadian Geotechnical Journal*, v. 63, p. 1–13, 1 jan. 2026.
- PARIKH, Sanjai J. *et al.* Soil chemical insights provided through vibrational spectroscopy. *In: Advances in Agronomy*. [S.l.]: Academic Press Inc., 2014. v. 126 p. 1–148.
- PIEROZAN, Rodrigo César. Estudo da Resistência de Interface de Tiras Metálicas e Poliméricas em Diferentes Solos. Tese de Doutorado—Brasília/DF: Universidade de Brasília, 2018.
- POONI, J. *et al.* Durability of enzyme stabilized expansive soil in road pavements subjected to moisture degradation. *Transportation Geotechnics* Elsevier Ltd, , 1 dez. 2019.
- POONI, J. *et al.* Mechanism of Enzyme Stabilization for Expansive Soils Using Mechanical and Microstructural Investigation. *International Journal of Geomechanics*, v. 21, n. 10, out. 2021.
- POZZA, Adélia A. A. *et al.* Adsorção e dessorção aniônicas individuais por gibbsita pedogenética. *Química Nova*, v. 32, n. 1, p. 99–105, 2009.
- RABBANIFAR, Saeed *et al.* Reusing Dredged Material through Stabilization with So-Called Bio-Enzyme Products. *Buildings*, v. 13, n. 10, 1 out. 2023.
- RANGEL VÁZQUEZ, Norma A. *et al.* Análisis de FTIR en la Hidólisis Enzimática y Modelos Matemáticos de Materiales Compuestos de Poliuretano Poroso/Hidroxiapatita *Rev. Iberoam. Polím.* 2009.
- RAUCH, Alan F. *et al.* Measured Effects of Liquid Soil Stabilizers on Engineering Properties of Clay. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, v. 1787, n. 1, p. 33–41, 1 jan. 2002.
- RAVI SHANKAR, AU; RAI, Harsha Kumar; MITHANTHAYA, Ramesha I. Bio-Enzyme Stabilized Lateritic Soil as a Highway Material. *Journal of Indian Road Congress*, p. 553, 2009.
- RENJITH, Rintu *et al.* Optimization of Enzyme-Based Soil Stabilization. *Journal of Materials in Civil Engineering*, v. 32, n. 5, maio 2020.
- ROCHA, Mirella Talitha; DE REZENDE, Lilian Ribeiro. Estudo laboratorial de um solo tropical granular estabilizado quimicamente para fins de pavimentação. *Revista Materia*, v. 22, n. 4, 2017.
- RODRIGUES, John K. G. *et al.* Solos lateríticos: utilização em pavimentos rodoviários. Campina Grande: EDUEPB, 2024.
- ROZENBERG, Mark *et al.* Spectroscopic FTIR and NMR study of the interactions of sugars with proteins. *Spectrochimica Acta - Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, v. 222, 5 nov. 2019.

SAMPAIO, Iara Silva. Estabilização enzimática de solos para pavimento de estradas florestais. Dissertação (Mestrado)—Viçosa, Brasil: Universidade Federal de Viçosa, 2019.

SANTOS, Eliane Fernandes dos. Estudo comparativo de diferentes sistemas de classificações geotécnicas aplicadas aos solos tropicais. Dissertação (Mestrado) – São Carlos, Brasil: Escola de engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2006.

SANTOS, Thais A.; SPECHT, Luciano P.; PINHEIRO, Rinaldo J. B. Caracterização física e mecânica de solos usualmente empregados em subleitos rodoviários no Rio Grande do Sul. *In*: Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica - ABMS, 2016.

SCHOLEN, Douglas E. Non-Standard Stabilizers. United States. Department of Agriculture. Forest Service. Southern Region: 1992

SCHOLEN, Douglas E. Stabilizer Mechanisms in Nonstandard Stabilizers. *In*: Minneapolis, Minnesota: Transportation Research Board, 1995.

SENTHIL KUMAR, R.; RAJKUMAR, P. Characterization of minerals in air dust particles in the state of Tamilnadu, India through FTIR, XRD and SEM analyses. *Infrared Physics & Technology*, v. 67, p. 30–41, 26 nov. 2014.

SHARMA, Jitendra Kumar; KHANDELWAL, Sakshi. Performance Evaluation of Kota's Black Soil Using Perma-Zyme. *In*: Techno-Societal 2022. Cham: Springer International Publishing, 2024. p. 125–136.

SHARP, Richard W.; BOOKER, John R. Shakedown of Pavements Under Moving Surface Loads. *Journal of Transportation Engineering*, v. 110, n. 1, p. 1–14, jan. 1984.

SHUKLA, Bishnu Kant *et al.* Soil Stabilization Through Microbial Bioenzymes: A Comprehensive Review of Recent Developments in Eco-Friendly Approaches. *In*: Springer Science and Business Media Deutschland GmbH, 2024.

SILVEIRA, Virlene Leite *et al.* Recycling Iron Ore Waste through Low-Cost Paving Techniques. *Sustainability (Switzerland)*, v. 16, n. 13, 1 jul. 2024.

ŠIMKOVIĆ, Ivan *et al.* Thermogravimetric data suggest synergy between different organic fractions and clay in soil structure formation. *Geoderma*, v. 454, 1 fev. 2025.

SKEMPTON, A. W. The Poro-Pressure Coefficients A and B. *Géotechnique*, v. 4, n. 4, p. 143–147, dez. 1954.

SVENSON, M. Ensaios triaxiais dinâmicos de solos argilosos. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)—Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro, 1980.

TAKEDA, M. C. A influência da variação da umidade pós-compactação no comportamento mecânico de solos de rodovias do interior paulista. Tese (Doutorado)—São Carlos: Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo (USP), 2006.

THOMAS, A. Geethu; RANGASWAMY, B. Kodi. Strength behavior of enzymatic cement treated clay. *International Journal of Geotechnical Engineering*, v. 15, n. 3, p. 259–272, 16 mar. 2021.

THOMAS, Ansu; TRIPATHI, R. K.; YADU, L. K. A Laboratory Investigation of Soil Stabilization Using Enzyme and Alkali-Activated Ground Granulated Blast-Furnace Slag. *Arabian Journal for Science and Engineering*, v. 43, n. 10, p. 5193–5202, 9 out. 2018.

- TINGLE, Jeb S. *et al.* Stabilization mechanisms of nontraditional additives. *Transportation Research Record*, v. 2, n. 1989, p. 59–67, 2007.
- VERMA, Harshal *et al.* Ground improvement using chemical methods: A review. *Heliyon* Elsevier Ltd, 1 jul. 2021.
- VILLIBOR, D. F. *et al.* Pavimentos de Baixo Custo para Vias Urbanas - Bases Alternativas com Solos Lateríticos Gestão de Manutenção de Vias Urbanas. 2. ed. São Paulo: Arte e Ciência, 2009.
- VILLIBOR, D. F.; ALVES, D. M. L. Pavimentação de baixo custo para regiões tropicais. Projeto e Construção - Novas Considerações. Florianópolis: Tribo da Ilha, 2019.
- VOLKOV, Dmitry S.; ROGOVA, Olga B.; PROSKURNIN, Mikhail A. Organic matter and mineral composition of silicate soils: FTIR comparison study by photoacoustic, diffuse reflectance, and attenuated total reflection modalities. *Agronomy*, v. 11, n. 9, 1 set. 2021.
- WERKMEISTER, Sabine *et al.* Design of Granular Pavement Layers Considering Climatic Conditions. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, v. 1837, n. 1, p. 61–70, 1 jan. 2003.
- ZIMAR, Z. *et al.* Use of industrial wastes for stabilizing expansive clays in pavement applications: durability and microlevel investigation. *Acta Geotechnica*, v. 19, n. 9, p. 6259–6287, 1 set. 2024.