

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

**AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO E
MICROESTRUTURAL DE COMPÓSITOS SOLO-POLÍMERO:
ESTUDO EXPERIMENTAL EM SOLO ARENOSO E
BENTONITA**

NATHÁLIA FREITAS BOAVENTURA, M.Sc.

Orientadora: **MICHÉLE DAL TOÉ CASAGRANDE, D.Sc.**

TESE DE DOUTORADO EM GEOTECNIA

BRASÍLIA – DF, DEZEMBRO DE 2025.

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

**AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO E MICROESTRUTURAL DE
COMPÓSITOS SOLO-POLÍMERO: ESTUDO EXPERIMENTAL EM SOLO
ARENOSO E BENTONITA**

NATHÁLIA FREITAS BOAVENTURA, MSc

**TESE DE DOUTORADO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL DA
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA
A OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR.**

APROVADA POR:

**MICHÉLE DAL TOÉ CASAGRANDE, DSc. (UnB)
(ORIENTADOR)**

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

**RAQUEL SOUZA TEIXEIRA, DSc. (UEL)
(EXAMINADOR EXTERNO)**

**EDUARDO PAVAN KORF, DSc. (UFFS)
(EXAMINADOR EXTERNO)**

DATA: BRASÍLIA/DF, 2º DE DEZEMBRO DE 2025.

FICHA CATALOGRÁFICA

BOAVENTURA, NATHÁLIA FREITAS;

Avaliação do comportamento mecânico e microestrutural de compósitos solo-polímero: estudo experimental em solo arenoso e bentonita (Distrito Federal) 2025.

xvi, - 193., 210 x 297 mm (ENC/FT/UnB, Doutor, Geotecnia, 2025)

Tese de Doutorado - Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

1. Novos Materiais Geotécnicos 2. Compósito Solo-Polímero

3. Obras Geotécnicas 4. Bentonita

I. ENC/FT/UnB II. Título (série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

BOAVENTURA, N.F. (2025). **Avaliação do comportamento mecânico e microestrutural de compósitos solo-polímero: estudo experimental em solo arenoso e bentonita**. Tese de doutorado, Publicação G.DT-212/2025 Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 193p.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: NATHÁLIA FREITAS BOAVENTURA

TÍTULO DA TESE DE DOUTORADO: **Avaliação do comportamento mecânico e microestrutural de compósitos solo-polímero: estudo experimental em solo arenoso e bentonita**

GRAU / ANO: Doutor / 25.

É concedida à Universidade de Brasília a permissão para reproduzir cópias desta tese de doutorado 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.

Nathália Freitas Boaventura

SQSW 104, Bloco B, Apt 612, Sudoeste
CEP: 70.670-402 – Brasília/DF – Brasil

“” In modico fidelis!” – fiel no pouco... – O teu trabalho, meu filho, não é só salvar almas, mas santificá-las, dia a dia, dando a cada instante – mesmo aos aparentemente vulgares – vibrações de eternidade.”

São Josémaria Escrivá

AGRADECIMENTOS

Neste momento, deixo um pouco de lado a linguagem técnica para registrar algo mais simples e verdadeiro: a minha gratidão. Talvez esta seja uma das partes menos lidas de uma tese, mas é a que carrega muito do que me trouxe até aqui.

Esta pesquisa começou a ser desenhada em 2020, exatamente quando o mundo parou. Vivemos um período difícil, marcado por incertezas e perdas. Dedico este trabalho às vidas que foram interrompidas pela pandemia e agradeço profundamente aos profissionais que mantiveram o funcionamento da sociedade e permitiram que a ciência salvasse vidas. A pandemia marcou o início deste caminho, e a ciência foi o que nos sustentou.

Agradeço à minha família, que esteve comigo durante toda a caminhada. À minha avó Luiza, pelas orações e por tentar entender cada etapa do meu percurso acadêmico, mesmo nos dias mais desafiadores. Ao meu avô Heli, que partiu antes de me ver doutora, mas que já me chamava assim muito antes. À minha tia Flávia, que se foi cedo demais, mas sempre fez questão de fazer parte de tudo que era importante para mim.

À minha mãe, minha “person”, meu porto seguro. Ela é minha maior incentivadora e exemplo de força, firmeza, amor e alegria. Agradeço por estar ao meu lado desde o momento em que decidi seguir pela pesquisa e pela docência, e por caminhar comigo em cada segundo, inclusive nos momentos em que tudo parecia pesado.

Ao meu irmão, tão esperado e tão essencial na minha vida. Meu amigo de todas as horas e, no meu coração, para sempre o meu “pitcheno”.

Ao meu esposo, Thiago, meu amor, que me sustentou emocionalmente em muitos momentos e não permitiu que eu desistisse. Ele esteve comigo em dias longos de laboratório, me ajudou em revisões, me ouviu, me acalmou e segurou a barra comigo. Muito do que está aqui só existe porque ele acreditou em mim quando eu mesma duvidei.

À minha filha Maria Teresa, que nasceu no meio desta tese e mudou completamente a forma como eu vivo e vejo o mundo. Ela é minha razão e meu impulso. Seus sorrisos me lembram todos os dias o que realmente importa.

À minha enteada, Duda, menina luz na minha vida, sempre carinhosa e presente.

À minha sogra, Meiruze, que me acolheu com amor de mãe e sempre me apoiou. Sou grata pelo incentivo constante, pelas palavras que me faziam continuar e por ser uma mulher tão admirável.

Agradeço também aos meus familiares, primos, tios e amigos, por todo apoio e incentivo.

À minha orientadora, Michéle Casagrande, por ter sido a escolha mais acertada que eu poderia ter feito. Além de parceira acadêmica, tornou-se amiga e conselheira, alguém com quem aprendi muito. E, acima de tudo, sou grata pela alegria de ser madrinha do Arthur.

Ao grupo de pesquisa New Geotechnical Materials, pela ajuda constante e pela parceria. Quem faz pesquisa experimental sabe que nenhuma etapa é solitária.

Aos meus colegas da UDF, pela parceria e pela convivência que tanto contribuíram nesta fase. Aos meus alunos, que me motivam a buscar mais conhecimento e a ser melhor como professora.

À empresa WaterFlows, especialmente ao Newton Vasconcelos, pelo apoio e pela confiança na pesquisa brasileira.

Ao CAIQ, ao Instituto de Geociências e ao Departamento de Pós-Graduação em Biologia, pela colaboração nas análises. Ao Dr. Marcos Henrique de Pinho Maurício e ao professor Sidnei Paciornik, do DEQM/PUC-Rio, pelas análises realizadas. Ao Instituto de Geociências especificamente ao laboratório de micropaleontologia e ao técnico Lucas Antonietto.

Por fim, agradeço ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio à pesquisa e à ciência no Brasil.

Esta pesquisa avaliou o comportamento mecânico e microestrutural de dois materiais geotécnicos de naturezas distintas: um solo arenoso e uma bentonita, ambos estabilizados com polímero sintético. O estudo teve como objetivo compreender os mecanismos de interação entre o polímero e os solos, identificar os efeitos do tempo de cura sobre o desempenho mecânico e propor uma abordagem racional de dosagem baseada em parâmetros estruturais e de resistência. Foram realizados ensaios de compactação, resistência à compressão não confinada, cisalhamento direto, módulo de resiliência, sucção total, difração de raios X (DRX), espectrometria de emissão óptica por plasma acoplado indutivamente (ICP-OES), microscopia eletrônica de varredura (MEV) e microtomografia de raios X (μ CT). No solo arenoso, a adição de 4 % de polímero resultou em aumento da densidade seca máxima, leve redução da umidade ótima e ganhos expressivos de resistência e rigidez. A resistência à compressão simples evoluiu de 0,5 MPa aos 2 dias para cerca de 2,5 MPa aos 30 dias, enquanto a coesão obtida em cisalhamento direto atingiu aproximadamente 400 kPa aos 45 dias. O módulo de resiliência variou entre 250 e 1200 MPa, valores significativamente superiores aos observados no solo natural. As análises microestruturais mostraram redução da porosidade, formação de filmes poliméricos contínuos envolvendo os grãos e manutenção da mineralogia original, composta predominantemente por quartzo e caulinita. Na bentonita, a incorporação do polímero reduziu a expansibilidade e promoveu ganhos substanciais de resistência. O compósito B25 atingiu cerca de 6,4 MPa e o B50, 7,8 MPa em compressão simples, com interceptos coesivos superiores à 2200 kPa em cisalhamento direto. As análises de DRX e ICP-OES indicaram reorganização lamelar e redução da fração inorgânica, enquanto as imagens de MEV e μ CT evidenciaram microestrutura compacta e homogênea. Os resultados confirmam que o polímero atua como aglomerante e estruturante, promovendo estabilidade volumétrica e aumento nos parâmetros de resistência em materiais geotécnicos de diferentes naturezas. O método racional de dosagem proposto, baseado na relação entre porosidade e teor volumétrico de polímero, apresentou forte correlação com a resistência obtida, demonstrando aplicabilidade prática e contribuindo para o avanço da estabilização polimérica em engenharia geotécnica.

Palavras-chave: estabilização de solos; polímero; solo arenoso; bentonita; comportamento mecânico; microestrutura; dosagem racional.

ABSTRACT

This research evaluated the mechanical, chemical, and microstructural behavior of two soils of distinct natures: a sandy soil and an expansive soil composed of bentonite, both stabilized with a synthetic polymer. The study aimed to understand the interaction mechanisms between the polymer and the soils, identify the effects of curing time on mechanical performance, and propose a rational mix design approach based on structural and strength parameters. The experimental program included compaction, unconfined compressive strength, direct shear, resilient modulus, total suction, X-ray diffraction (XRD), inductively coupled plasma optical emission spectrometry (ICP-OES), scanning electron microscopy (SEM), and X-ray microtomography (μ CT) tests. In the sandy soil, the addition of 4 % polymer resulted in an increase in maximum dry density, a slight reduction in optimum moisture content, and significant gains in strength and stiffness. The unconfined compressive strength increased from 0.5 MPa at 2 days to approximately 2.5 MPa at 30 days, while the cohesion obtained from direct shear reached about 400 kPa at 45 days. The resilient modulus ranged between 250 and 1200 MPa, values considerably higher than those of the natural soil. Microstructural analyses showed a reduction in porosity, the formation of continuous polymer films around the grains, and the preservation of the original mineralogy, predominantly composed of quartz and kaolinite. In the bentonite, polymer incorporation reduced expansibility and produced substantial strength gains. The B25 composite reached approximately 6.4 MPa and the B50 composite 7.8 MPa in unconfined compression, with cohesive intercepts exceeding 2200 kPa in direct shear tests. XRD and ICP-OES analyses indicated lamellar reorganization and an increase in organic fraction, while SEM and μ CT images revealed a compact and homogeneous microstructure with total porosity below 2 %. The results confirm that the polymer acts as a cementing and structuring agent, promoting volumetric stability and increased strength in soils of different natures. The proposed rational mix design method, based on the relationship between porosity and volumetric polymer content, showed strong correlation with measured strength, demonstrating practical applicability and contributing to the advancement of polymer-based soil stabilization in geotechnical engineering.

Keywords: soil stabilization; polymer; sandy soil; bentonite; mechanical behavior; microstructure; rational mix design.

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1	19
INTRODUÇÃO	19
1.1. OBJETIVOS	21
1.2. ESTRUTURA DA TESE	21
CAPÍTULO 2	23
REVISÃO DE LITERATURA	23
2.1. ESTABILIZAÇÃO E MELHORAMENTO DE SOLOS	23
2.1.1. ESTABILIZAÇÃO MECÂNICA	24
2.1.2. ESTABILIZAÇÃO QUÍMICA	25
2.2. MÓDULO DE RESILIÊNCIA	28
2.3. ESTABILIZAÇÃO COM POLÍMEROS	32
2.4. CARACTERÍSTICAS DAS MATRIZES DE MATERIAIS GEOTÉCNICOS	40
2.5. DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS CHAVE	43
CAPÍTULO 3	46
MATERIAIS E MÉTODOS	46
3.1. MATERIAIS E PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS	46
3.1.1. SOLO ARENOSO	46
3.1.2. BENTONITA	48
3.1.3. POLÍMERO	49
3.1.4. DOSAGENS DOS COMPÓSITOS	52
3.1.4.1. TEMPO DE CURA	53
3.2. PROGRAMA EXPERIMENTAL	53
3.2.1. ENSAIO DE COMPACTAÇÃO	55
3.2.1.1. COMPÓSITOS ARENOSOS E SOLO ARENOSO	55
3.2.1.2. COMPÓSITOS BENTONÍTICOS E BENTONITA	55
3.2.2. DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO NÃO CONFINADA ...	58
3.2.3. ENSAIO DE CISLHAMENTO DIRETO	59

3.2.4. DETERMINAÇÃO DO MÓDULO DE RESILIÊNCIA.....	61
3.2.5. DETERMINAÇÃO DA SUCCÃO TOTAL.....	63
3.2.6. DIFRAÇÃO DE RAIOS-X (DRX)	65
3.2.7. ESPECTROMETRIA DE EMISSÃO ÓPTICA POR PLASMA ACOPLADO INDUTIVAMENTE (ICP-OES).....	65
3.2.8. MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV).....	66
3.2.9. MICROTOMOGRAFIA DE RAIOS X (μ CT)	67
3.2.10. DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS CHAVE	68
CAPÍTULO 4	70
RESULTADOS E DISCUSSÕES: SOLO ARENOSO E COMPÓSITO AREIA-POLÍMERO	70
4.1. COMPACTAÇÃO	70
4.2. ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO NÃO CONFINADA.....	72
4.3. ENSAIO DE CISALHAMENTO DIRETO	78
4.4. ENSAIO TRIAXIAL CÍCLICO - MÓDULO DE RESILIÊNCIA.....	90
4.5. DETERMINAÇÃO DA SUCCÃO TOTAL	101
4.6. DIFRAÇÃO DE RAIOS X (DRX).....	103
4.7. ESPECTROMETRIA DE EMISSÃO ÓPTICA POR PLASMA ACOPLADO INDUTIVAMENTE (ICP-OES).....	106
4.8. MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV)	108
4.9. MICROTOMOGRAFIA DE RAIOS X (μ CT)	111
4.10. DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS CHAVE	112
4.11. CONSIDERAÇÕES FINAIS SOBRE RESULTADOS OBTIDOS.....	116
CAPÍTULO 5	120
RESULTADOS E DISCUSSÕES: BENTONITA E COMPÓSITO BENTONITA- POLÍMERO	120
5.1. COMPACTAÇÃO DA BENTONITA E COMPÓSITO.....	120
5.2. ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO NÃO CONFINADA.....	122
5.3. ENSAIO DE CISALHAMENTO DIRETO	132
5.4. DETERMINAÇÃO DA SUCCÃO TOTAL	151

5.5. AVALIAÇÃO DIMENSIONAL E DENSIFICAÇÃO DOS COMPÓSITOS BENTONITA–POLÍMERO.....	154
5.6. DIFRAÇÃO DE RAIO - X (DRX)	158
5.7. ESPECTROMETRIA DE EMISSÃO ÓPTICA POR PLASMA ACOPLADO INDUTIVAMENTE (ICP-OES)	164
5.8. MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV)	167
5.9. MICROTOMOGRAFIA DE RAIO X (MCT)	173
5.10. CONSIDERAÇÕES FINAIS SOBRE RESULTADOS OBTIDOS.....	177
CAPÍTULO 6	180
CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS	180
6.1. CONCLUSÕES.....	180
6.2. SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS	182
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	184

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 Classificação Austrods para materiais estabilizados com cimento (Yeo et al, 2011)	28
Tabela 3.2. Componentes toxicológicos do produto (Fonte: Fabricante Polímero).....	50
Tabela 3.3. Nomenclatura, proporções e teores de polímero adotados nos compósitos.....	53
Tabela 3.4. Ensaio realizados para os compósitos arenosos e tempos de cura referentes.....	53
Tabela 4.1. Massa Específica seca máxima e umidade ótima dos compósitos arenosos e solo arenoso. (Adaptado – Silva, 2020).	70
Tabela 4.2. Resultados de RCS para 4% de polímero em diferentes tempos de cura.....	72
Tabela 4.3. Valores do intercepto coesivo e ângulo de atrito para SP40.	82
Tabela 4.4. Relação ângulo de atrito, intercepto coesivo para cada compósito de acordo com os tempos de cura (Autor e Silva (2020))	87
Tabela 4.5. Valores de MR do Solo e SP40	90
Tabela 4.6. Os parâmetros do modelo em função da confinante para o solo natural e SP40. .	92
Tabela 4.7. Os parâmetros do modelo em função da tensão desvio para o solo natural e SP40.	95
Tabela 4.8. Constantes de regressão e R^2 para o modelo universal.	97
Tabela 4.9. Resultados da análise de ICP-OES para a areia.	106
Tabela 5.1. Limites de Attemberg bentonita e compósitos.....	120
Tabela 5.2. Resultados de RCS para B25 em diferentes tempos de cura.....	125
Tabela 5.3. Resultados de RCS para B50 em diferentes tempos de cura.....	127
Tabela 5.4. Valores do intercepto coesivo e ângulo de atrito para B25.....	136
Tabela 5.5. Valores do intercepto coesivo e ângulo de atrito para B50.....	144
Tabela 5.6. Resultados da análise de ICP-OES para bentonita e compósitos.....	165

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 Classificação resiliente de solos granulares (DNIT, 2006).....	32
Figura 2.2. Organização dos polímeros. (a) Organização aleatória; (b) Organização alternada; (c) Organização em bloco; (d) Organização grafitizada. (Modificado - Canevarolo, 2006) ...	34
Figura 2.3. Inchamento da bentonita sódica e da bentonita cálcica. (Modificado - Leme, 2024).	41
Figura 3.1. (a) Localização local de coleta do solo (Google, 2020); (b) Solo após secagem. .	46
Figura 3.2. Mapa geológico e de recursos minerais do estado do Tocantins - Cidade de Mateiros (Modificado – Ribeiro et al, 2022).....	47
Figura 3.3 Curva Granulométrica do solo estudado (Modificado – Silva, 2020)	48
Figura 3.4. Distribuição granulométrica da bentonita natural da região de Boa Vista – PB obtida por difração a laser. (Rodrigues et al., 2007).	49
Figura 3.5. Produto utilizado como estabilizante.	50
Figura 3.6. Análise XRF/EDX – Polímero (Fonte: Silva, 2020)	51
Figura 3.7. Análise CHN - Polímero (Fonte: Silva, 2020).....	51
Figura 3.8. Ensaio de compactação adaptado para bentonita e compósitos bentoníticos. (a) Materiais; (b) Bentonita e solução polimérica; (c) Incorporação da solução polimérica na bentonita; (d) Material em repouso para hidratação de 1 hora; (e) Representação de três pontos da curva de compactação; (f) Pistão sobre peso metálico sobre amostra; (g) Superfície após compactação; (h) Extração do corpo-de-prova; (i) Corpo de prova final de um dos pontos da curva de compactação.	57
Figura 3.9. Corpos de prova cilíndricos com 10x5 cm.	58
Figura 3.10. QR CODE do vídeo que demonstra a preparação e moldagem do compósito bentonítico-polímero.	59
Figura 3.11. Método de moldagem dos CPs do ensaio de cisalhamento direto. (a) Solo arenoso; (b) Solo bentonítico.	60
Figura 3.12. Saída de material bentonítico; (a) Bentonita e água; (b) Compósito bentonita-polímero;	60
Figura 3.13. Equipamento MS151 da Owntech (Owntech, 2018).....	62
Figura 3.14. QR CODE do vídeo que demonstra a montagem do ensaio de obtenção do Módulo de Resiliência.	63
Figura 3.15. Materiais e métodos utilizados para determinação da sucção total.	64

Figura 3.16. Método de moldagem para análise da sucção total.....	64
Figura 3.17. Amostras metalizadas.	67
Figura 3.18. Informações utilizadas para os parâmetros chave.....	68
Figura 4.1. Curvas de compactação com energia normal, solo e compósitos (Adaptado – Silva, 2020).....	71
Figura 4.2. Curvas de tensão–deformação obtidas no ensaio de resistência à compressão simples (RCS) para o compósito SP40.....	72
Figura 4.3. (a) SP40 (2 dias de cura) após ruptura; (b) SP40 (7 dias de cura) após ruptura; (c) SP40 (15 dias de cura) após ruptura; (d) SP40 (30 dias de cura) após ruptura;.....	74
Figura 4.4. Curvas Tensão-Deformação do ensaio de RCS (a) SP25; (b) SP50 (Modificado - Silva, 2020)	75
Figura 4.5. Valor RCS (MPa) por tempo de cura para os três teores de polímero.....	76
Figura 4.6. Curvas tensão de cisalhamento por deformação horizontal para o solo para tensões normais de 50 kPa, 100 kPa, 200 kPa e 400 kPa. (Adaptado – Silva (2020))	78
Figura 4.7. Curvas tensão de cisalhamento por deformação horizontal para aplicação das tensões normais de 50 kPa, 100 kPa, 200 kPa e 400 kPa para 4 % de polímero para (a) 0 dia de cura; (b) 1 dia de cura; (c) 2 dias de cura; (d) 4 dias de cura; (e) 7 dias de cura; (f) 15 dias de cura; (g) 30 dias de cura; (h) 45 dias de cura;	80
Figura 4.8. Envoltória de Ruptura para SP40.....	81
Figura 4.9. SP25 1 dia de cura, interior úmido e capinha seca.	82
Figura 4.10. SP40 2 dias de cura, após ruptura.	83
Figura 4.11. SP25 7 dias de dia, após ruptura.	84
Figura 4.12. SP40 com 45 dias de cura, após ruptura	85
Figura 4.13. Curvas de tensão x deslocamento horizontal dos compósitos com 45 dias de cura e solo	86
Figura 4.14. Relação ângulo de atrito e intercepto coesivo por tempo de cura para os compósitos.....	89
Figura 4.15. Gráfico Variação do módulo de resiliência (MR) em função da tensão confinante (σ_3) para o solo natural e para o compósito SP40 % em diferentes tempos de cura.	91
Figura 4.16. Variação do módulo de resiliência (MR) em função da tensão desvio (σ_d) para o solo natural e o compósito SP40 % em diferentes tempos de cura.	93
Figura 4.17. Superfície do Modelo Universal aplicado SP40,0% com 7 dias de cura.....	97
Figura 4.18. Superfície do Modelo Universal aplicado SP40,0% com 15 dias de cura.....	98
Figura 4.19. Superfície do Modelo Universal aplicado SP40,0% com 30 dias de cura.....	98

Figura 4.20. Superfície do Modelo Universal aplicado SP40,0% com 45 dias de cura.....	98
Figura 4.21. Curvas de ψ (MPa) \times tempo para todos os compósitos.	101
Figura 4.22. Curvas pF \times tempo para todos os compósitos.	102
Figura 4.23. Difratoograma de raios X do solo arenoso. (Adaptado – Silva (2020)).....	104
Figura 4.24. Difratoograma de raios X do compósito SP40 %.	105
Figura 4.25. Imagens obtidas por MEV do solo (a) Vista geral mostrando a ausência de material cimentante e estrutura pouco compacta – aumento de 75x; (b) detalhe de grãos individuais com superfície irregular e ausência de ligação entre partículas – aumento de 140x . (Fonte: Silva, 2020).....	108
Figura 4.26. Micrografias obtidas por MEV do compósito SP40 %. (a) Vista geral mostrando a formação de agregados e redução da porosidade; (b–c) detalhes da película polimérica envolvendo os grãos e promovendo cimentação entre partículas; (d) ampliação de 500 \times evidenciando o contato polimérico aderido às superfícies minerais e a formação de zonas de ligação contínuas.	109
Figura 4.27. Reconstrução tridimensional e seções ortogonais do compósito SP40. (a) Corpo de prova em 3D (b) corte superior (c) corte transversal.	111
Figura 4.28. Microtomografia de raio X (μ CT) realizado com SP40. (a) Reconstrução tridimensional (b) Corte da seção ortogonal.	112
Figura 4.29. Curvas de compactação com os compósitos, areia e as variáveis trabalhadas. .	113
Figura 4.30. Relação da RCS com o parâmetro porosidade teor polimérico para umidades de 7% e 9%	114
Figura 4.31. Relação da RCS normalizada para ambas as umidades.....	115
Figura 5.1 Curva de Compactação Bentonita e compósitos (B25 e B50).....	121
Figura 5.2. Corpos de prova B25 e B50 (a) 2 dias de cura; (b) 5 dias de cura.	123
Figura 5.3. Curvas tensão-deformação para B25.	124
Figura 5.4. Corpos de prova B25 após a ruptura. (a) 7 dias; (b) 15 dias; (c) 30 dias; (d) 45 dias.	125
Figura 5.5. Curva tensão- deformação para B50.....	127
Figura 5.6. Corpos de prova B50 após ruptura. A partir do primeiro plano: 45, 30, 15 e 7 dias, respectivamente.	128
Figura 5.7. Valor RCS (MPa) por tempo de cura para os compósitos bentoníticos.	129
Figura 5.8. Material extravasando lateralmente a caixa de cisalhamento. (a) Bentonita; (b) B25_ 1 dia	132

Figura 5.9. Curvas tensão de cisalhamento por deformação horizontal para aplicação das tensões normais de 50 kPa, 100 kPa, 200 kPa e 400 kPa para B50 (a) 2 dias de cura; (b) 4 dias de cura; (c) 7 dias de cura; (d) 15 dias de cura; (e) 30 dias de cura; (f) 45 dias de cura.....	133
Figura 5.10. Envoltória de Ruptura para B25.	136
Figura 5.11. Corpos de prova com 2 dias de cura, após a ruptura. (a) CP após ensaio com 50 kPa; (b) CP após ensaio com 200 kPa.....	138
Figura 5.12. Corpos de prova com 4 dias de cura, após a ruptura. (a) Imagem lateral do CP após ruptura. (b) Imagem superior do CP após ruptura.....	139
Figura 5.13. Corpo de prova B25 com 15 dias de cura após a ruptura	140
Figura 5.14. Curvas tensão de cisalhamento por deformação horizontal para aplicação das tensões normais de 50 kPa, 100 kPa, 200 kPa e 400 kPa para B50 (a) 2 dias de cura; (b) 4 dias de cura; (c) 7 dias de cura; (d) 15 dias de cura; (e) 30 dias de cura; (f) 45 dias de cura.....	142
Figura 5.15. Envoltória de Ruptura para B50.	144
Figura 5.16. Curva tensão de cisalhamento (kPa) x Deslocamento horizontal (mm) para compósitos bentoníticos. (a) Tensão normal de 50 kPa; (b) Tensão normal de 40 0kPa.....	146
Figura 5.17. Relação de dias versus intercepto coesivo (kPa) versus ângulo de atrito (°) para os compósitos B25 e B50.....	148
Figura 5.18. Curvas de ψ (MPa) \times tempo para Bentonita, B25 e B50.....	152
Figura 5.19. Curvas de pF \times tempo para Bentonita, B25 e B50.	152
Figura 5.20. Variações percentuais das propriedades para B25.....	155
Figura 5.21. Variações percentuais das propriedades para B50.....	155
Figura 5.22. relação entre ρ (g/cm ³) e volume (cm ³) para B25.....	156
Figura 5.23. relação entre ρ (g/cm ³) e volume (cm ³) para B50.....	156
Figura 5.24. relação entre ρ (g/cm ³) e massa (g) para B25.	157
Figura 5.25. relação entre ρ (g/cm ³) e massa (g) para B50.	157
Figura 5.26. Difratoograma de raios X da bentonita glicada.	159
Figura 5.27. Difratoograma de raios X da bentonita glicada e aquecida	160
Figura 5.28. Difratoograma de raios X do compósito B25.	161
Figura 5.29. Difratoograma de raios X do compósito B50.	162
Figura 5.30. Micrografias obtidas por MEV de parte interna de CPs com 20x de aumento (a) Bentonita hidratada; (b) B25; (c) B50.....	167
Figura 5.31. Micrografias obtidas por MEV de aumento de parte interna de CPs com 250x (a) Bentonita hidratada com água; (b) B25; (c) B50.	169

Figura 5.32. Micrografias obtidas por MEV de parte externa de CPs com 250x de aumento (a) Bentonita hidratada com água; (b) B25; (c) B50.	171
Figura 5.33. Micrografias obtidas por MEV de parte interior de CPs com 5000x de aumento (a) Bentonita hidratada com água; (b) B25; (c) B50.	172
Figura 5.34. Bentonita hidratada com água (a) reconstrução tridimensional vista lateral; (b) reconstrução tridimensional vista superior; (c) plano ortogonal horizontal; (d) plano ortogonal vertical.	174
Figura 5.35. Compósito B50 (a) reconstrução tridimensional; (b) plano ortogonal superior; (c) plano ortogonal lateral; (d) plano ortogonal vertical.	176
Figura 5.36. Microtomografia de raio X (μ CT) realizado com B50 (a) Reconstrução tridimensional (b) Corte da seção ortogonal.	177

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIACÕES

A	Área das amostras
AASHTO	<i>American Association of State Highway and Transportation Officials</i>
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
A_i	Área da seção transversal da amostra
ASTM	<i>American Society of Testing Materials</i>
c'	Intercepto coesivo
C_c	Coefficiente de curvatura
C_u	Coefficiente de uniformidade
D_{10}	Diâmetro das partículas de solo correspondente a 10% passante em peso
D_{30}	Diâmetro das partículas de solo correspondente a 30% passante em peso
D_{60}	Diâmetro das partículas de solo correspondente a 60% passante em peso
DER	Departamento Estradas de Rodagem
DNER	Departamento Nacional Estradas de Rodagem
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura e Transportes
F	Carga vertical aplicada
FHWA	<i>Federal Highway Administration</i>
H	Altura do corpo de prova
h_o	Altura inicial referência do corpo de prova
k_1	Coefficiente de regressão obtido por ensaio laboratorial
k_2	Coefficiente de regressão obtido por ensaio laboratorial
k_3	Coefficiente de regressão obtido por ensaio laboratorial
m	Massa das amostras
MIT	<i>Massachusetts Institute of Technology</i>
MR	Módulo de Resiliência
NBR	Norma Brasileira
P	Carga aplicada
RCS	Resistência à compressão simples
T	Temperatura

UnB	Universidade de Brasília
USDA	<i>United States Department of Agriculture</i>
Δ	Deformação elástica ou resiliente
Δh	Deslocamento vertical máximo
δ	Massa específica dos grãos
ε	Deformação axial específica
ε_l	Deformação resiliente axial vertical
ε_p	Deformação axial plástica
ε_r	Deformação resiliente axial vertical
ε_t	Deformação axial total
ε_τ	Deformação específica recuperável
μ	Coefficiente de Poisson
σ	Tensão normal
σ_1	Tensão normal vertical
σ_3	Tensão de confinamento ou Tensão normal horizontal
σ_d	Tensão desviadora ou desvio
σ_h	Tensão normal horizontal
σ_v	Tensão normal vertical
σ_τ	Tensão de tração aplicada no plano diametral
ρ	Massa específica
Φ'	Ângulo de atrito efetivo

INTRODUÇÃO

A aplicação de novos materiais geotécnicos é uma realidade crescente na construção civil em nível mundial, fundamentada em dois pilares: o aspecto ambiental e as melhores práticas de engenharia. O avanço das técnicas construtivas e os novos patamares de desempenho exigidos demandam metodologias e materiais capazes de garantir eficiência, eficácia e sustentabilidade genuína.

A estabilização de solos é uma solução antiga e consolidada. No campo da estabilização química, podem-se distinguir dois grandes grupos de agentes: os tradicionais, como cal, cimento, cinzas e materiais betuminosos, e os não tradicionais, que incluem enzimas, polímeros líquidos, resinas, ácidos, silicatos, íons, lignina e derivados. Enquanto os primeiros já contam com normas consolidadas, muitas delas internacionais, e vasta literatura técnica, os agentes não tradicionais ainda carecem de estudos aprofundados e de incentivo para o desenvolvimento de metodologias que atendam simultaneamente aos critérios técnicos, econômicos e ambientais (Baghini *et al.*, 2016).

A utilização de polímeros como modificadores das estruturas de solo já ocorre e é promissora por promover melhorias nas microestruturas das misturas e aumentar a durabilidade dos compósitos (Baghini *et al.*, 2016; Barreto *et al.*, 2018). O uso de polímeros na geotecnia como material estabilizante é uma área de investimento e estudo inesgotável, devido à ampla variedade de materiais poliméricos já disponíveis e às possibilidades de desenvolvimento de novos produtos. No entanto, ainda há uma necessidade de mais estudos e publicações sobre este tema (Al-Khanbashi e Abdalla, 2006; Onyejekwe & Ghataora, 2014; Georgees *et al.*, 2015; Soltani *et al.*, 2017; Berreto *et al.*, 2019; Silva, 2020; Carneiro, 2020; Boaventura *et al.*, 2023).

Diversos estudos atuais estão sendo realizados em regiões de clima subtropical e tropical para avaliar a aplicação de polímeros no melhoramento de solos, como no Qatar (Iyengar *et al.*, 2013), no Irã (Naeini *et al.*, 2012) e na Austrália (Georgees *et al.*, 2015). Entretanto, as pesquisas realizadas em diferentes tipos de solos brasileiros, como citado por Patrício *et al.* (2016), Machado *et al.* (2017), Barreto *et al.* (2018), Silva (2020) e Boaventura *et al.* (2023), são escassas. Portanto, evidencia-se a necessidade de estudos mais abrangentes com solos

brasileiros sobre a aplicação de polímeros no melhoramento de solos para as diferentes áreas geotécnicas, visando investigar de forma aprofundada suas potencialidades e limitações.

O Brasil possui um expressivo número de jazidas de argilas, com destaque para as bentonitas. Essas argilas são constituídas, majoritariamente, por montmorilonita (60–80%), podendo conter outros argilominerais em diferentes proporções, além de minerais como quartzo, feldspato, calcita, pirita e ferro, que influenciam diretamente sua plasticidade e resistência (Huse, 2007; Gutierrez, 2015; Cutrim *et al.*, 2015). As bentonitas dividem-se em cálcicas e sódicas, de acordo com os cátions trocáveis predominantes. A bentonita sódica, em especial, destaca-se por sua elevada capacidade de expansão na presença de água e por ser considerada um material de baixa permeabilidade, características que a tornam amplamente utilizada na construção civil (Cutrim *et al.*, 2015). Contudo, essa argila apresenta baixa resistência à compressão simples e ao cisalhamento direto, o que motivou estudos, como o de Silva (2020), que avaliou a incorporação de soluções poliméricas na bentonita da Paraíba para modificar suas propriedades.

Nesse contexto, mostra-se relevante estudar a estabilização de diferentes tipos de solo com a aplicação de soluções poliméricas. Além disso, a associação desses estudos às metodologias de dosagem propostas por Consoli *et al.* (1996, 2001, 2010, 2012, 2014) representa uma estratégia inovadora. Essas metodologias, originalmente desenvolvidas para solos cimentados, têm como mérito a simplicidade experimental e a obtenção de parâmetros confiáveis de resistência, constituindo um referencial para adaptação ao estudo de compósitos solo-polímero.

A presente pesquisa, portanto, tem por objetivo investigar o efeito da incorporação de diferentes teores de polímeros no comportamento mecânico de dois materiais geotécnicos representativos do território brasileiro: solo arenoso e a bentonita. A escolha se justifica pela ampla ocorrência desses materiais no país e pelos problemas geotécnicos recorrentes que apresentam, como baixa coesão, trabalhabilidade e elevada expansão. Espera-se que os resultados contribuam tanto para o meio acadêmico quanto para a prática de engenharia, difundindo o conhecimento sobre estabilização polimérica e fomentando o desenvolvimento de técnicas mais eficazes, sustentáveis e adequadas às condições brasileiras.

1.1. OBJETIVOS

O objetivo central desta pesquisa é avaliar, de forma integrada, o comportamento mecânico, químico e microestrutural de dois tipos de materiais geotécnicos – um de natureza arenosa e uma bentonita – estabilizados com polímero sintético.

Objetivos específicos se organizam como:

Entender as características física e minerais dos materiais geotécnicos naturais e os compósitos solo-polímero;

- Analisar o comportamento mecânico dos compósitos por meio dos ensaios de compactação, compressão não confinada, cisalhamento direto e módulo de resiliência, considerando a influência do tempo de cura dos compósitos, análise da sucção por WP4C;
- Investigar as modificações composicionais e microestruturais por meio de ensaios de Difração de Raio X e microscopia eletrônica de varredura e microtomografia de raios X (μ CT), relacionando-as aos resultados mecânicos;
- Propor e validar método racional de dosagem com base em parâmetros de porosidade e teor volumétrico de polímero, aplicável à previsão de resistência dos compósitos.

1.2. ESTRUTURA DA TESE

A dissertação está estruturada em seis capítulos. No Capítulo 1 apresentam-se a introdução e a motivação da problemática estudada, além do objetivo geral e dos objetivos específicos do trabalho. O Capítulo 2 reúne uma revisão da literatura sobre o tema, de modo a fornecer ao leitor os conceitos necessários para a compreensão dos capítulos subsequentes. Nesse capítulo, destacam-se os seguintes tópicos: conceitos e tipos de estabilização e melhoramento de solos; breve definição de polímeros; estudos envolvendo bentonitas; e uma síntese dos trabalhos mais recentes sobre compósitos solo-polímero.

O Capítulo 3 descreve os materiais e equipamentos utilizados, bem como as metodologias aplicadas nos ensaios de caracterização física, mecânica, química, mineralógica e morfológica. O Capítulo 4 apresenta os resultados obtidos para o solo arenoso e seus compósitos, com as análises necessárias ao atendimento dos objetivos propostos. O Capítulo 5

reúne os resultados referentes à bentonita e aos compósitos formados com a solução polimérica, incluindo igualmente as análises demandadas pelos objetivos do estudo.

Por fim, o Capítulo 6 traz as conclusões da pesquisa e apresenta sugestões para trabalhos futuros.

REVISÃO DE LITERATURA

2.1. ESTABILIZAÇÃO E MELHORAMENTO DE SOLOS

De acordo com Vargas (1977) estabilização de solos é definida como uma metodologia que atribui a esse material maior resistência estável às cargas, desgaste ou erosão, seja por meio da compactação, ajuste granulométrico e plasticidade seja pela adição de produtos que conferem coesão proveniente da cimentação ou aglutinação dos seus grãos.

Almeida *et al.* (2016) discriminam a estabilização em três tipos: química, mecânica e física. A estabilização química consiste nas reações ocorrem entre a massa de solo, agente estabilizante e a água. Já a estabilização mecânica é um conjunto de operações mecânicas que alteram o arranjo das partículas do solo ou granulometria cujo objetivo principal a redução dos vazios do solo. Por fim a estabilização física consiste na correção da granulometria do substrato, tendo como exemplo a adição de fibras (Pinto, 2008).

Van Impe (1989, *apud* Casagrande, 2005) afirma que a estabilização pode ser temporária, permanente e permanente com adição de novos materiais. Sendo a temporária no período de execução da obra ou certa fase. A permanente sem adição equivale aos processos de compactação e tratamentos térmico. Enquanto a permanente com adição de novos materiais combina compactação e adição de um segundo material.

Casagrande (2005) define melhoramento de solo como tratamentos químicos que visam o incremento das propriedades mecânicas, buscando o aumento da resistência do compósito e diminuição da compressibilidade e permeabilidade do solo natural.

A estabilização de solo com materiais convencionais é uma solução tecnicamente correta e segura por ser recorrentemente utilizada, além de inúmeros estudos, normas e especificações. Os materiais granulares como brita calcária, cascalho, areia de rio são normalmente utilizados como materiais de estabilização em obras de pavimentação e estabilidade de talude, além de matéria prima de filtros geotécnicos e obras de drenagem. Materiais finos como cal e cimento são tradicionalmente utilizados como estabilizantes químicos, ou seja, no melhoramento dos solos (Almeida *et al.*, 2016).

Os materiais alternativos são aqueles que não seguem uma especificação técnica tradicional e não possuem abrangência na utilização. Contudo, eles podem apresentar certas características que os tornam bons substitutos dos convencionais, que estão cada vez mais escassos (Rezende *et al.*, 2015; Roque, 2017).

2.1.1. ESTABILIZAÇÃO MECÂNICA

A estabilização mecânica pode ser definida em dois tipos: a compactação e correção granulométrica. O primeiro método altera o arranjo das partículas do solo, por meio da aplicação de uma força externa que aumenta o contato entre grãos e torna o substrato mais homogêneo. Assim há aumento da densidade do solo e redução dos vazios, ambas mudanças levam alterações de propriedades do solo melhorando-o. Por exemplo, a diminuição do índice de vazios do solo está associada à redução da percolação da água e, assim, do carreamento de finos provocada por tal fenômeno. Com a essa redução de vazios há aumento da densidade, de durabilidade, da compactação, e, conseqüentemente, da resistência mecânica do solo. (Vargas, 1977; Pinto, 2006).

O método de estabilização por compactação atua no melhoramento da estabilidade mecânica para diferentes tipos de solo. Contudo, observam-se casos em que apenas a aplicação da compactação não é suficiente, e passa a ser usada em conjunto com outros métodos de estabilização (Medina *et al.*, 2004; Santos *et al.*, 1995).

Já o segundo método é a correção granulométrica no qual há introdução de dois ou mais tipos de solo. Ela visa o ajuste da curva granulométrica e assim aumenta a estabilidade do solo e da resistência mecânica. A estabilização ocorre por haver um maior contato entre os grãos das partículas maiores e o preenchimento dos vazios pelos grãos das partículas mais finas (Villibor, 1982; Medina *et al.*, 2004).

Alguns estudos avaliaram materiais alternativos para estabilização granulométrica, como por exemplo: resíduos de construção e demolição civil (RCD) (Oliveira & Góngora, 2016), resíduo do corte de rochas ornamentais (Rezende, 2003; Silva *et al.*, 2018). Já a utilização de materiais finos como estabilizantes pode-se citar: polietileno tereftalato (PET) triturado (Louzada *et al.*, 2019) e poliestireno expandido (EPS) (Silveira *et al.*, 2018), borracha granular (Ramirez & Casagrande, 2014). Com o foco de melhoramento de solo, em alguns

estudos, os materiais alternativos utilizados foram: cinzas de carvão mineral (Lopes *et al.*, 2015), resíduo sólido urbano incinerado (Vizcarra *et al.*, 2014), dentre outros.

Aplicações de métodos que utilizem tratamentos térmicos, elétricos, ou seja, em que há alteração da textura do substrato sem alterações químicas e sim estruturais, são métodos que são relacionados à definição de estabilização física.

2.1.2. ESTABILIZAÇÃO QUÍMICA

O termo melhoria de solos vincula-se ao tratamento por meio de processos químicos, ou seja, estabilização química. O melhoramento de solos tem como agentes tradicionais a cal, cimento e cinzas volantes, os quais visam a melhora do comportamento mecânico do solo, promovendo ganhos de resistência, diminuição de permeabilidade e compressibilidade, com consequente aumento da durabilidade (Casagrande, 2005).

A utilização da cal como meio de tratamento de um solo, de maneira geral, pode ser dividida em duas vertentes: como estabilizante químico incrementando valores de resistência e rigidez do solo pelas reações pozolânicas existentes; como modificadora das características físicas do solo (redução da plasticidade, melhora da trabalhabilidade e resistência à erosão).

Para que o uso de cal seja eficaz como tratamento dos solos, o substrato deve ter maiores teores de argila, por efetuar reações entre a cal e materiais argilosos. As reações aumentam a proporção da quantidade de sílica disponível, o que leva ao incremento das propriedades mecânicas do compósito.

Belchior *et al.* (2017) estudaram o emprego de cal hidratada em solos naturalmente expansivos para redução dessa expansão, empregando centrífuga. Observou-se que a taxa de expansão potencial indica que a dosagem de cal necessária para redução de expansão pode ser reduzida com o acréscimo da umidade ótima na compactação ou redução da massa específica seca. Também a dosagem de cal hidratada necessária para evitar a expansão depende da força aplicada (caso de centrífuga, aumento da força g).

Trabalhos desenvolvidos com esses agentes tradicionais foram realizados por Consoli *et al.* (2011), os quais investigaram as variáveis que governam a resistência de misturas sol-cinza-cal, determinando um índice que correlaciona porosidade e quantidade volumétrica de cal na Resistência à Compressão Simples (RCS).

Sandroni e Consoli (2010) mostram que o uso de cimento pode ser para estabilização dos mais diversos tipos de solos, contudo o uso em argilas muito plásticas e orgânicas apresenta maiores dificuldades. Cimentos Portland são cimentos que ganham resistência por meio das reações de hidratação. Na maior parte dos casos, quanto mais fino o solo, ou seja, maior a fração de finos, maior a quantidade requerida de cimento para a estabilização.

Método proposto por Consoli (2007) parte do conceito que a relação entre a resistência à compressão simples e a resistência à compressão diametral é única para cada mistura de solo tratado. Consoli (2014) mostra que o ângulo de atrito de um determinado solo tratado com cal é independente da porosidade e da quantidade de cal, e o intercepto coesivo é diretamente proporcional da função da resistência à compressão simples ou diametral.

Dalla Rosa (2009) quantifica a influência das variáveis da quantidade dos estabilizantes químicos aplicados, porosidade e tempo de cura do solo estabilizado. Além disso, verifica-se a adequação do índice de vazios/cal na estimativa da resistência à compressão simples das misturas. Avaliou-se, também, sucção matricial das misturas.

Outras metodologias desenvolvidas utilizam a relação de diferentes solos melhorados com cimento e cal (Consoli *et al.*, 2010, 2011 e 2012) o que geraram índices de relação entre porosidade e teores volumétricos desses agentes químicos.

O manual de pavimentação do DNIT (2006) faz a distinção entre solo-cimento e solo melhorado com cimento. Solo-cimento é uma mistura de solo, cimento e água. Essa mistura, deve ser conforme com requisitos de densidade, durabilidade e resistência. O compósito formado possui grande rigidez à flexão, é um material duro e cimentado. Normalmente, o teor de cimento varia de 6% a 10%. Já o solo melhorado com cimento possui menores teores de cimento, 2% a 4%, e visa a modificação plástica do solo, não possuindo uma cimentação acentuada, pode-se dizer que o compósito é flexível.

Baghini *et al.* (2016) avaliaram misturas de cimento e emulsão asfáltica em material de base de pavimentação, obtendo resultados satisfatórios para as adições de 4 % de cimento Portland combinado com 3 % de emulsão.

Não obstante a comprovada eficácia dessas técnicas na melhoria das respostas hidráulica, compressiva e de resistência dos solos, efeitos adversos de quantidades elevadas de matéria orgânica, sulfatos, sais, somada à inerente influência do tempo de cura no comportamento mecânico, custo de transporte, quantidades relativamente grandes de aditivo a

um custo significativo para obtenção de melhorias e preocupação ambiental, motivada pela grande emissão de dióxido de carbono para produção de cimento, têm fomentado estudos com estabilizantes alternativos para aprimoramento das técnicas de estabilização (Tingle *et al.*, 2007; Malko *et al.*, 2016; Soltani *et al.*, 2017).

Neste contexto, Tingle *et al.* (2007) citam produtos não tradicionais tais como as enzimas, resinas, ácidos, silicatos, íons, derivados de lignina e polímeros como alternativas atraentes aos agentes químicos tradicionais. De maneira geral, abordam o comportamento geotécnico desses materiais de acordo com o tipo de solo.

Malko *et al.* (2016) avaliaram o uso de três tipos de enzimas em três tipos de solo, de uma mesma cava, contudo de diferentes horizontes. Os pesquisadores concluiriam que o emprego de enzimas leva ao incremento das propriedades geotécnicas e poderiam ser utilizadas como estabilizantes químicos empregados na pavimentação, substituintes dos tradicionalmente utilizados. Sendo necessário maiores estudos para normatização dos órgãos federais.

Soltani *et al.* (2017) compararam a variação volumétrica de solo expansivo australiano para diferentes agentes químicos e fibra. Ainda que as estabilizações com cal e cimento tenham se mostrado mais efetivas na redução da expansão, os autores salientam que a incorporação polimérica e reforço com fibra são obviamente mais sustentáveis e econômicas, sendo consideradas como importantes alternativas para a utilização de cal e cimento em solos expansivos.

Diversas agências reguladoras estabelecem valores normativos, de diversas análises, para a implementação de um material estabilizante na pavimentação. Para a determinação de dosagens de cimento e cal, estabilizantes químicos convencionais, para emprego em obras de pavimentação há manuais com recomendações a serem seguidas e valores mínimos e máximos a serem atingidos (Balbo, 2002; Yeo *et al.*, 2011).

Os dados de RCS não são utilizados diretamente no dimensionamento de pavimentos, contudo podem ajudar a compreender outras propriedades de solos estabilizados quimicamente. Yeo *et al.* (2011) mostram intervalos de valores de RCS determinados pela *Austroroads*, agência Australiana, para materiais estabilizados com cimento (Tabela 2.1).

Tabela 2.1 Classificação Austrods para materiais estabilizados com cimento (Yeo *et al.*, 2011)

Classificação	RCS (MPa)
Modificado	0,7 a 1,5
Levemente Cimentado (estabilizado)	1,5 a 3,0
Cimentado (estabilizado)	> 3,0

Millard (1993) mostra intervalos aceitos na Inglaterra de RCS de acordo com o tipo de tráfego para 7 dias de cura para misturas de solo-cimento, uso em base para tráfego leve é de 1,5 a 3,0 MPa e sub-base de 0,75 a 1,5 MPa. ANTT (2015) mostra que a *Transportation Road Research Laboratory* (TRRT) do Reino Unido limita valores de RCS entre intervalo de 1,7 – 2,7 MPa. Já a força aérea dos Estados Unidos determina que para materiais cimentados o valor mínimo é de 2 MPa (USDT, 2014).

Xuan *et al.* (2012) mostram que na África do Sul, o *National Institute for Transport and Road Research* (NITRR) analisou dosagens de cimento Portland para estabilização de areias. Valores encontrados de RCS para 28 dias de cura para dosagens de 4 e 6% de cimento foram de 0,6 MPa e 1,2 MPa, respectivamente. NITRR (1986) analisou o uso de cimento em uma areia bem graduada e determinou que os valores mínimos aceitáveis para 28 dias de cura para 3% e 5% de cimento é aproximadamente 1,5 MPa e 3,8 MPa, respectivamente.

No Brasil, o DNIT pela norma 143/2010 determina que uma base solo-cimento deve ter um valor mínimo de 2,1 MPa para a resistência à compressão aos 7 dias. Algumas normas, especificações e recomendações de serviço são mais detalhadas quanto ao tipo de solo, tráfego e tempo de cura a ser avaliado. Enquanto outras determinam valores sem muitos critérios. De acordo com o manual de pavimentação (DNIT, 2006) o RCS mínimo de um solo estabilizado com cal é de 1,7 MPa para 7 dias de cura e 3,4 MPa para 28 dias de cura.

2.2. MÓDULO DE RESILIÊNCIA

No dimensionamento de pavimentos os critérios adotados devem ser mais detalhados e controlados. Em métodos elásticos e com camadas, o módulo de resiliência é um parâmetro de entrada para o dimensionamento. Existindo intervalos de valores para cada uma das camadas, tipos de tráfegos, característica dos materiais utilizados, dentre outros (DNIT, 2006).

Desde 1986, nos Estados Unidos, os modelos de dimensionamento dos pavimentos utilizam módulo de resiliência, por especificação da AASHTO. O termo resiliência é definido

como energia acumulada em um material deformado elasticamente. Essa energia, a qual devolve-se quando não há mais tensões que causam deformação no material, é definida como energia potencial de deformação (Medina & Motta, 2015 apud Gómez, 2016).

O Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes na norma 134/2017 determina comportamento resiliente do material como:

O comportamento resiliente do material representa sua resposta elástica resultante de uma carga aplicada em pulsos de curta duração. O resultado deste ensaio pode ser usado para determinar valores de módulo elástico, a diferentes níveis de tensão, ou parâmetros de modelos elásticos não lineares, usados na análise numérica de dimensionamento de pavimentos.

Medina & Motta (2015) descrevem as expressões matemáticas as quais definem o módulo de resiliência, MR, no ensaio de triaxial de cargas repetidas:

$$MR = \frac{\sigma_d}{\mathcal{E}_1} \quad (2.1)$$

Em que:

$$\mathcal{E}_1 = \frac{\Delta h}{h_o} \quad (2.2)$$

Em que: σ_d é a tensão desvio; \mathcal{E}_1 é a deformação resiliente axial; Δh é o deslocamento vertical máximo e h_o é a altura inicial de referência do CP.

A cada aplicação da tensão desvio a deformação axial possui uma pequena parcela de natureza plástica permanente (\mathcal{E}_p), contudo apenas a primeira parcela (\mathcal{E}_r ou \mathcal{E}_1) que se considera para a determinação do módulo resiliente.

$$\mathcal{E}_t = \mathcal{E}_r + \mathcal{E}_p \quad (2.3)$$

Para a obtenção do módulo resiliente, aplica-se uma carga cíclica em forma de onda haversine, com pulsos de 0,1 s seguidos por descarregamento de 0,9 s, resultando em frequência de 1 Hz.

De acordo com Medina & Motta (2015) o módulo de resiliência para solos depende da sua natureza e constituição (mineralogia, textura, fração fina, arranjo estrutural e cimentação), tensão de sollicitação (representação da ação do tráfego no pavimento) e condição de estado (massa específica aparente e umidade).

O comportamento resiliente dos solos e materiais estabilizados sob carregamentos repetidos é comumente representado por modelos empíricos que relacionam o módulo de resiliência (MR) a variáveis de estado, como a tensão confinante (σ_3) e a tensão desvio (σ_d). Diversas formulações foram propostas ao longo das últimas décadas, buscando representar de forma simples e eficiente o comportamento não linear desses materiais.

O modelo MR para solos arenoso, expressa a relação matemática entre o módulo de resiliência em função da tensão confinante. Esse modelo normalmente é aplicado para solos arenosos ou granulares (menos de 50% passante na peneira nº 200), sendo expresso pela Equação proposta dos Hicks (1970):

$$MR = k_1 \cdot \sigma_3^{k_2} \quad (2.4)$$

Em que: σ_3 é a tensão confinante; k_1 e k_2 são as constantes de regressão do modelo.

Esse modelo foi originalmente proposto para solos arenosos e materiais granulares, nos quais o comportamento elástico depende fortemente da pressão confinante. O parâmetro k_1 representa o nível de rigidez básica do material, enquanto k_2 expressa sua sensibilidade ao confinamento, isto é, o grau de aumento da rigidez com o acréscimo da tensão confinante. (Medina & Motta, 2015).

Trata-se de um modelo simples, de fácil aplicação e ajuste, amplamente utilizado em estudos de pavimentos e em programas de calibração de modelos constitutivos. Entretanto, sua limitação principal está no fato de desconsiderar o efeito da tensão desvio, o que pode reduzir sua precisão para materiais com algum grau de coesão ou tratados com aditivos estabilizantes (Guimarães & Motta, 2000).

Modelo proposto por Svenson (1980) é uma relação matemática entre o módulo de resiliência em função da tensão desviadora. Esse modelo normalmente é aplicado para solos finos ou com mais de 50% passante na peneira nº 200 e é dada por:

$$MR = k_1 \cdot \sigma_d^{k_2} \quad (2.5)$$

Em que: σ_d é a tensão desvio; k_1 e k_2 são as constantes de regressão do modelo.

Esse modelo é mais apropriado para solos finos e coesivos, cuja resposta resiliente é influenciada pela magnitude da deformação imposta e pelo rearranjo das partículas durante o carregamento cíclico.

Nesses materiais, o aumento da tensão desvio tende a gerar deformações não lineares mais significativas, e o módulo de resiliência passa a depender mais da amplitude de carga do que do confinamento em si. O modelo, portanto, é útil para descrever comportamentos dominados pela plasticidade e pela energia dissipada, mas não captura adequadamente o efeito de confinamento em solos granulares (Medina & Motta, 2015).

O Modelo combinado ou universal (Svenson, 1980; Uzan, 1985) relaciona o módulo de resiliência com a tensão confinante e tensão desviador. Esse modelo é dito um modelo genérico quando se considera a granulometria do solo e é dado pela seguinte expressão:

$$MR = k_1 \cdot \sigma_3^{k_2} \cdot \sigma_d^{k_3} \quad (2.6)$$

Em que: σ_3 é a tensão confinante; σ_d é a tensão desvio; k_1 , k_2 , k_3 são as constantes de regressão do modelo.

O modelo universal, também conhecido como modelo combinado, foi desenvolvido para incorporar simultaneamente os efeitos da tensão confinante e da tensão desvio, proporcionando uma representação mais realista do comportamento resiliente de materiais que exibem tanto características granulares quanto coesivas. O parâmetro k_1 reflete a rigidez inicial do material; k_2 indica a influência da tensão confinante; e k_3 quantifica a sensibilidade à variação da tensão desvio.

Esse modelo apresenta melhor capacidade preditiva para materiais estabilizados como os compósitos solo-polímero, nos quais o comportamento mecânico depende simultaneamente do atrito intergranular e das ligações químicas ou físico-químicas introduzidas pelo agente estabilizante. Apesar de exigir um número maior de parâmetros e ajustes, o modelo de Svenson (1980) é considerado o mais abrangente e o que melhor representa as condições reais de carregamento em estruturas de pavimentos.

Contudo, é importante frisar que não existem modelos específicos que representem adequadamente todos os tipos de solos. Como os parâmetros são obtidos a partir de ensaios laboratoriais, a análise dos resultados deve ser conduzida de forma estatística (Medina & Motta, 2015)

O manual de pavimentação (DNIT, 2006) utiliza-se do parâmetro MR para classificação de solos granulares por grupos (Figura 2.1). Ressalta-se que K_1 , K_2 e K_3 são as constantes de progressão encontrada no ensaio para determinação do Módulo de Resiliência.

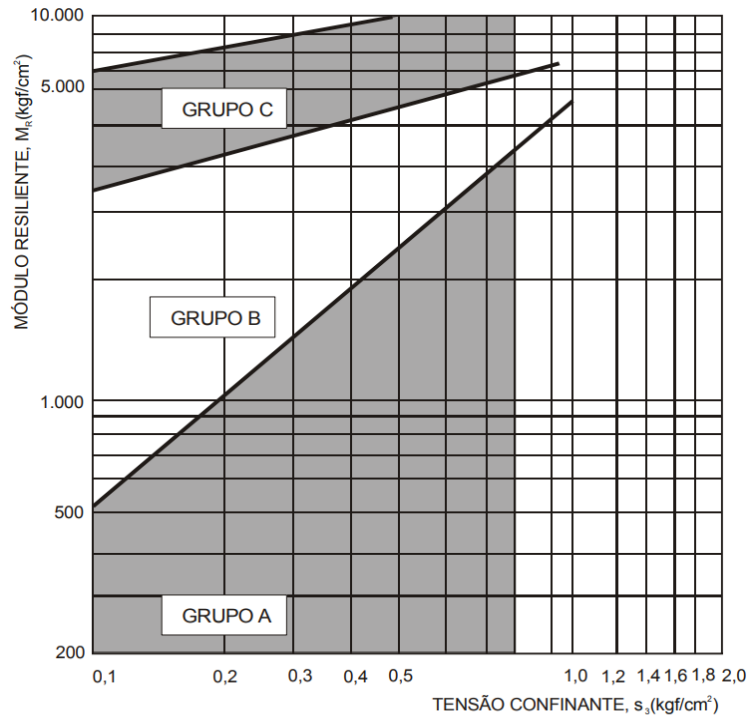


Figura 2.1 Classificação resiliente de solos granulares (DNIT, 2006)

O Grupo A são solos com alto grau de deformação resiliente e por isso não devem ser empregados em estruturas de pavimento. O Grupo B é formado por solos com grau de resiliência intermediário, permitindo assim o emprego para estruturas como base, sub-base e reforço do subleito, o comportamento pendente das seguintes condições: $K_2 \leq 0,50$; bom comportamento; $K_2 > 0,50$; comportamento dependente da espessura da camada e da qualidade do subleito. Por fim o grupo C, que são solos com baixo valor de deformação resiliente e não há restrições quanto ao seu uso nas camadas de pavimento. (DNIT, 2006).

2.3. ESTABILIZAÇÃO COM POLÍMEROS

Polímeros são componentes químicos produzidos a partir de moléculas que se repetem, essas moléculas são chamadas de monômeros. Eles podem ser sintéticos ou naturais. De maneira geral, os polímeros sintéticos possuem como matéria prima o petróleo, alguns exemplos: nylon, teflon e PVC. Já os polímeros ditos naturais são aqueles que seus componentes são encontrados na natureza, como por exemplo: DNA, RNA e celulose. Um recorrente equívoco é definir como sinônimo o polímero ser natural e biodegradável. Alguns

polímeros sintéticos são feitos para serem biodegradáveis, por exemplo o plástico de poliácido láctico (PLA) (Palmeira, 2018; Lam & Jefferis, 2018).

Na engenharia civil, há variadas aplicações dos polímeros, seja em produtos, seja em técnicas. Como exemplo de produtos poliméricos, pode-se citar, dentre outros: produtos para redução da quantidade de água requerida ou melhora da trabalhabilidade de concretos, primers para revestimentos de superfícies. Em obras geotécnicas, as técnicas que utilizam polímeros buscam a melhora de parâmetros de resistência de diferentes tipos de solo. Além da existência de possibilidade de aplicação em áreas como: aterros de solo mole, fundações superficiais, estabilidade de taludes (Barreto *et al.*, 2018), contenção de fluidos durante escavação de fundações profundas e em obras subterrâneas (Lam & Jefferis, 2018), pavimentação, estabilização granulométrica com borracha e asfaltos modificados – asfalto-borrachas e com adição de polímeros (Forde, 2009), geossintéticos e suas inúmeras aplicações (Palmeira, 2018).

A nomenclatura de polímeros segue as regras da *International Union of Pure and Applied Chemistry* (IUPAC, 2009). Basicamente, o nome é poli (em inglês, *poly*) como prefixo acompanhado pelo manômetro constituinte. Por exemplo, polietileno ($\text{CH}_2 = \text{CH}_2$, o manômetro), poliestireno $(\text{C}_8\text{H}_8)_x$, policloreto de vínica (PVC) $(\text{C}_2\text{H}_3\text{Cl})_x$, etc. Contudo, há polímeros cujos nomes não começam com o prefixo poli, como o exemplo Carboximetilcelulose (CMC) que é um polímero natural advindo da celulose, pode ser utilizado como bentonita para suporte de líquidos. Outro exemplo são os polímeros do grupo dos Lignosulfonatos que são utilizados como superplastificantes de concretos.

Outra forma existente de nomear e classificar os polímeros é de acordo com o arranjo químico. Utilizando a técnica de classificação pela distribuição dos monômeros, arranjo químico, pode-se dizer que são homopolímeros (cadeia principal existe apenas único mero) ou copolímeros (cadeia principal há dois meros diferentes) (Canevarolo, 2006; Lam & Jefferis, 2018).

Os polímeros, ainda, podem ser classificados de acordo com a carga elétrica existente na molécula. Aniônicos são aqueles que possuem agentes tensoativos que ao contato com uma solução aquosa seus íons são carregados negativamente. Já os catiônicos possuem agentes tensoativos que ao ionizar com uma solução aquosa fornecem íons positivos.

Além do citado anteriormente, há outras classificações empregadas para os polímeros: quanto à estrutura química (polímeros de cadeia carbônica ou de cadeia heterogênea), quanto ao método de preparação (adição ou condensação), comportamento mecânico (plásticos,

elastômeros ou fibras) e desempenho mecânico (termoplásticos convencionais, especiais, de engenharia ou de engenharia especial).

Os copolímeros possuem diferentes organizações entre os elos existentes na cadeia principal, podendo ser definidos como: aleatório (ou estatístico), alternado, em bloco e grafitizado (Figura 2.2). Contudo, mesmo que haja diferentes distribuições, o peso molecular do polímero não se altera apesar da organização (Sperlind, 2006; Canevarolo, 2006).

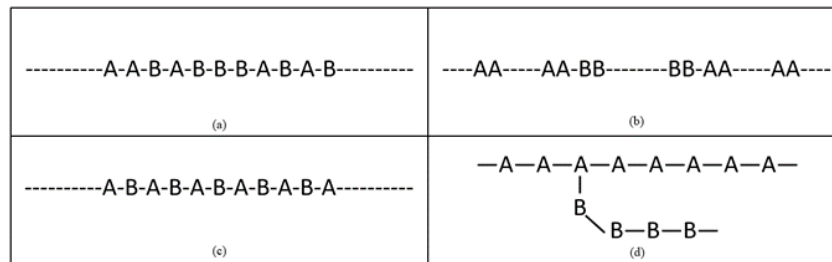


Figura 2.2. Organização dos polímeros. (a) Organização aleatória; (b) Organização alternada; (c) Organização em bloco; (d) Organização grafitizada. (Modificado - Canevarolo, 2006)

Há polímeros que são fornecidos por seus fabricantes em forma líquida em maior concentração, sendo necessária a dissolução em água. De maneira geral, a indústria tem certa predileção por esse tipo de polímero (solução polimérica) do que polímeros em pó, pois no segundo tipo há maiores dificuldades de dissolver e assim não sendo tão eficaz quanto o primeiro tipo. (Canevarolo, 2006; Lam & Jefferis, 2018).

Os polímeros líquidos, são emulsões, ou seja, formado por dois líquidos imiscíveis entre eles. O líquido em maior quantidade é chamado de dispersante, enquanto o em menor quantidade é o disperso. Normalmente, na engenharia civil, esses polímeros são emulsões do tipo água em óleo (A/O), conhecida como emulsão inversa. Nesse tipo de emulsão as gotas de água estão dispersas em um tipo de óleo. Os monômeros e catalisadores são inseridos nesse sistema A/O, gerando infinitas reações com cada gota de água. Ao fim do processo de polimerização o sistema é constituído por diversas gotículas de água com moléculas poliméricas dissolvidas em um meio contínuo oleoso (Lam & Jefferis, 2018).

A viscosidade da emulsão polimérica é controlada pela viscosidade do óleo, pois as gotículas de água são isoladas no meio e entre si. Dessa maneira, ao utilizar o polímero, se adiciona água externa ao sistema, gerando um comportamento ainda mais líquido e com menor viscosidade.

Ao considerar o uso de polímeros na estabilização do solo, pode-se categorizá-lo em três grandes grupos: geopolímeros, biopolímeros e polímeros sintéticos. Os geopolímeros são substâncias inorgânicas de aluminossilicato com combinações de outros elementos. Os biopolímeros são produzidos com base em biomassa bacteriana e são comuns na natureza. Por fim, os polímeros sintéticos, criados em laboratórios humanos, são baseados em estruturas principais e ramificadas. (Khatami & O’Kelly, 2013; Davidovits, 1991; Khalaf *et al.* 2020; Soldo *et al.*, 2020; Huang *et al.*,2021; Alelvan *et al.*, 2022; Samir *et al.*, 2022; Almajed *et al.*,2022; Wang *et al.*, 2023 Kodabandeh *et al.*, 2023; Bozyigit *et al.*,2023)

Os polímeros sintéticos, sendo fabricados pelo homem, podem ser manipulados para adquirir características desejadas. Consequentemente, muitos polímeros sintéticos estão sendo desenvolvidos para serem menos prejudiciais ao meio ambiente (desde a produção até o uso), mais duráveis e economicamente viáveis para a estabilização do solo. (Huang *et al.*,2021; Almajed *et al.*,2022; Wang *et al.*, 2023)

Brazetti (1996) em seu estudo mostra que o início da utilização de polímeros para a estabilização química de solos está atrelado aos momentos da Segunda Grande Guerra (1939 – 1945) e as guerras advindas da Guerra Fria (1947 – 1991). Nessas épocas era necessário desenvolver produtos que facilitariam a construção emergencial de pavimentos, tanto para o desembarque de equipamentos bélicos nas regiões de praia, construção de pista de aterrissagem em regiões afastadas quanto o deslocamento em locais intransitáveis.

Por essa urgência a utilização de estabilizantes como cal e cimento, pelo grande volume a ser transportado e tempo de endurecimento, tornou-se um empecilho. Assim, o governo americano incentivou o desenvolvimento de pesquisas de novos materiais para diferentes solos tornassem adequados para os objetivos militares. Pelos estudos, principalmente do *Massachusetts Institute of Technology* (MIT), definiu-se que a resposta estava na utilização de estabilização química. Isto é, desenvolvimento de produtos que realizavam interações e ligações químicas com as partículas de solo. (Woodring, 1952; Lambe, 1952; Murrey, 1952; Benzetti, 1996).

Com o passar dos anos o a utilização de polímero na geotecnia foi bastante difusa, desde o controle de erosão de encostas (Green & Stott, 1999), controle de expansão de solos finos para uso em pavimentação (Petry & Little, 2002), até a utilização de melhoramento de solos para aeroportos de pequena capacidade (Ajayi-Majebi *et al.*, 1991). Com o avançar da tecnologia os polímeros foram aprimorados facilitando sua utilização.

Polímeros estabilizantes mais utilizados são os vinis acetinados e copolímero acrílico suspenso em uma emulsão por surfactantes. Muitos estudos na literatura observaram que diferentes solos estabilizados com polímero há maior durabilidade, resistência a ataques de sulfatos, derretimento de gelo e difusividade iônica do que com cimento Portland (Baghini *et al.*, 2016).

Contudo, estudos mostram que o tipo de polímero, dosagem e o tipo de solo utilizado variam na resposta obtida na estabilização. Os solos arenosos, considerados inertes, verifica-se a criação de vínculos entre os grãos, concedendo assim uma coesão ao solo, aumentando sua resistência e diminuindo a permeabilidade, como observado por Silva (2020).

Já solos argilosos a interação entre eles ocorre quimicamente, o que altera as propriedades do solo argiloso. Assim, a eficiência da inserção do polímero está intimamente ligada às cargas elétricas do solo e do produto (Daniels & Inyang, 2004).

De forma geral, Naeini *et al.* (2012) afirmam que a introdução de polímeros em solos torna-os mais rígidos, podendo essa característica ser alterada de acordo com o índice de plasticidade (IP).

Hérmendez *et al.* (2005) comparou um solo expansivo sendo melhorado com cal e com dois tipos de copolímeros. Os resultados com ambos os polímeros se mostram favoráveis quando comparados com cal e melhores que o com solo puro, aumentando os valores de índice de suporte Califórnia (ISC) e reduzindo a o coeficiente relativo de expansão.

Naeini *et al.* (2012) estudaram a influência de emulsões aquosas de polímeros à base de acrílica em solos argilosos não saturados. Utilizaram 0-5% de teor de polímero em relação ao teor de umidade ótima do solo analisado. Fizeram estudo mecânico de compressão não confinada para 0, 2, 4, 6, 8 e 14 dias de cura. O teor de 4% de polímero foi considerado o teor ótimo, após essa dosagem percebeu-se queda da resistência do solo, e para 8 dias de cura também se verificou o tempo de cura ótimo.

Khatami & O'Kelly (2013) avaliaram diferentes dosagens de um biopolímero adicionado em um solo arenoso. Com o aumento da porcentagem de polímero adicionado na amostra houve incremento dos valores de compressão, rigidez e aumento da tensão desviadora e melhora de todos os valores do solo arenoso não tratado.

Lam *et al.* (2014) estudaram os efeitos combinados de fluidos de suporte à base de polímero e de bentonita sobre o comportamento de cisalhamento em interfaces concreto-areia.

O trabalho buscou reproduzir condições típicas de escavações profundas e estacas moldadas in loco. Os resultados mostraram que a presença de bentonita pura reduziu a resistência interfacial, devido à formação de uma película lubrificante entre as superfícies. Entretanto, quando o fluido foi parcialmente substituído por polímero, a resistência aumentou significativamente, sugerindo a formação de uma camada de transição mais coesa e aderente. As análises complementares apontaram que o polímero melhora a ligação entre partículas e reduz o teor de água livre, explicando o aumento de resistência observado.

Garcia *et al.* (2015) verificou altos incrementos nas forças de cimentação, tração e resistência ao cisalhamento de um solo arenoso adicionados com polímero quando comparado com a areia pura e outra areia com cimentação artificial.

Kolay *et al.* (2016) avaliaram a utilização de polímero com base acrílica em um solo argiloso e um solo siltoso. Utilizaram o teor de polímero variando de 2-5% de acordo com o peso seco do solo com três tempos de cura (7, 14 e 28 dias). Avaliaram limites de Atterberg, compactação, compressão não-confinada e ISC (Índice de Suporte Califórnia). O solo argiloso com polímero obteve maior ganho de resistência não confinada e melhora no ISC enquanto não observou ganhos significativos para o solo siltoso. Poucas alterações nos ensaios de caracterização foram observadas para ambos os tipos de solos.

Barreto *et al.* (2018) em seu estudo constatou que houve melhoria nos parâmetros de resistência ao cisalhamento das amostras adicionais com o copolímero, para diferentes tempos de cura e dosagens, quando comparado com a areia pura.

Özhan (2019) avaliou os parâmetros de resistência ao cisalhamento de misturas de areia e bentonita com diferentes teores de polímero aniônico, variando de 0,5 % a 20 % em massa. Foram realizados ensaios de compactação e cisalhamento direto sob tensões normais de 50, 100 e 200 kPa. O autor observou que pequenas adições de polímero (até 2 %) aumentaram a resistência máxima ao cisalhamento em cerca de 15 %, elevando o valor de coesão e reduzindo levemente o ângulo de atrito. Constatou ainda que o excesso de polímero provocou aumento da umidade ótima e redução da densidade seca máxima, em função do recobrimento das partículas e do aumento da viscosidade da mistura. O estudo concluiu que a adição controlada de polímero pode melhorar significativamente a estabilidade mecânica de compósitos bentonita-areia, embora a resistência seja fortemente dependente do equilíbrio entre teor polimérico e grau de compactação.

Silva (2020) avalia em seu estudo a utilização do polímero Terrafix 11 (CAS: 25035-69-2) como adição a um solo arenoso proveniente da região do Jalapão, no estado do Tocantins. O copolímero utilizado é acrílico-estirenado. Avaliou dois teores de polímero 2,5% e 5% em relação a massa seca de solo para 0, 1, 2, 4, 7, 15, 30 e 45 dias de cura. Estudos de comportamento mecânico (estáticos e dinâmicos) e hidráulico foram realizados. Para ambos os teores se observou significativa melhora no comportamento mecânico e hidráulico.

Carneiro (2020) utilizou o copolímero Terrafix 11 em adição em rejeito de minério de ferro, avaliou dois teores, os mesmos de Silva (2020). Além disso, também avaliou a inserção de fibras de polipropileno. Realizou, também, estudos de comportamento mecânico (estáticos e dinâmicos), hidráulicos, químicos e ambiental. Observou-se grande melhora para ambas as dosagens, além de bom comportamento com adição das fibras em detrimento do rejeito puro, sendo um método interessante para estabilização dos estéreis e barragens de rejeitos.

Li *et al.* (2020) investigaram o comportamento ao cisalhamento da interface entre polímero e bentonita, comparando amostras com bentonita pura e com diferentes teores de polímero sintético aniônico. Os ensaios de cisalhamento direto indicaram que a presença do polímero aumentou a resistência da interface e reduziu a deformabilidade, evidenciando o efeito de ancoragem e recobrimento superficial promovido pelas cadeias poliméricas. As análises microestruturais por MEV mostraram uma textura mais homogênea e compacta, com preenchimento dos poros pela fase polimérica. Os autores concluíram que o polímero atua como agente de ligação entre as partículas de bentonita, reduzindo a lubrificação entre lamelas e elevando a resistência interfacial, especialmente em baixas tensões normais.

Reddy *et al.* (2021) analisaram a influência de parâmetros químicos sobre o comportamento expansivo e a resistência ao cisalhamento de solos contendo bentonita. O estudo enfatizou o papel das trocas iônicas entre Na^+ , Ca^{2+} e K^+ na modificação das propriedades de inchamento e de resistência ao cisalhamento. Utilizando análises químicas e ensaios de cisalhamento direto, os autores observaram que a substituição de Na^+ por cátions de maior valência resultou em aumento expressivo da coesão e redução da expansividade. Os resultados indicaram que a modificação química da bentonita, por meio da troca iônica controlada, é capaz de alterar a estrutura coloidal do material, promovendo uma microestrutura mais estável e resistente.

Huang *et al.* (2021) estudaram a eficácia de estabilizadores de solo poliméricos comerciais na redução da expansão do solo expansivo em comparação com cal viva e cinza

volante. Foram testados quatro polímeros em relação à cal e cinza volante, mostrando que, embora os polímeros fossem menos eficazes na redução do inchamento e no aumento da resistência do solo em comparação com os outros estabilizadores, eles reduziram significativamente a condutividade hidráulica do solo, sugerindo mecanismos de ação diferentes.

Bozyigit *et al.* (2023) aplicaram três tipos de polímeros, sendo dois biopolímeros e um polímero sintético de caráter aniônico em uma argila caulinita para avaliar a resistência ao congelamento e descongelamento visando a aplicação em regiões frias. Os compósitos com biopolímeros tiveram melhor desempenho que o com polímero sintético, contudo, aplicando os ciclos de congelamento e descongelamento a maior resistência foi do compósito com polímero sintético.

Liang *et al.* (2024) avaliaram a condutividade hidráulica de misturas de bentonita com diferentes teores de polímero sintético, buscando compreender a influência da modificação química na estrutura do material. Os resultados indicaram que a incorporação de polímero reduziu a permeabilidade e aumentou a coesão do sistema, refletindo maior interação entre as cadeias poliméricas e os minerais da fração fina. O estudo destacou que, com o avanço do tempo de cura, a matriz apresentou rearranjo interno e redistribuição das fases, originando uma estrutura mais compacta e resistente. Os autores concluíram que o uso de polímeros em misturas bentoníticas pode simultaneamente melhorar a estanqueidade e a resistência ao cisalhamento, desde que o teor adicionado não exceda o limite de saturação das superfícies lamelares.

Moraes *et al.* (2025) avaliaram o uso do lignossulfonato de cálcio (LS), subproduto biodegradável da indústria de papel, na estabilização de uma argila sódica dispersiva do sul do Brasil. Foram testadas diferentes dosagens e com diferentes tempos de cura. Os autores perceberam que com maior dosagem e tempo de cura observou-se um aumento de até 50% do valor inicial e praticamente eliminou a dispersibilidade. Ainda nas análises de MEV e DRX confirmaram maior agregação de partículas e microestrutura mais densa.

Liu *et al.* (2025) avaliaram a aplicação da emulsão polimérica Renolith como estabilizante de argilas expansivas em subleitos de pavimentos. Foram testados diferentes teores (0–2%) em massa de solo seco, com ensaios mecânicos, hídricos (e análises microquímicas). O teor de 1% apresentou o melhor desempenho, promovendo aumento de até 170% no CBR, 40% no módulo de resiliência e 44% na coesão, além de reduzir em 18% o índice de expansibilidade. As análises microestruturais evidenciaram a formação de filmes

poliméricos ligando as partículas de argila e reduzindo a porosidade, confirmando o potencial do polímero como alternativa sustentável ao cimento e à cal.

Lopes *et al.* (2025) avaliaram a estabilização de rejeitos ultrafinos de minério de ferro com um copolímero acrílico–estirênico, investigando simultaneamente resistência mecânica e microestrutura. Os autores observaram aumentos expressivos de resistência, de 49 kPa para até 3324 kPa, e atribuíram esse ganho ao efeito aglutinante do polímero, que promoveu formação de agregados e redução da macroporosidade, conforme evidenciado por análises SEM e μ CT. A permeabilidade permaneceu na ordem de 10^{-6} cm/s, indicando que o polímero não preenche os vazios, mas liga as partículas.

No âmbito da sustentabilidade, o artigo publicado na Zvierieva *et al.* (2025) discutiu a aplicação de biopolímeros na estabilização de solos, destacando seu potencial como alternativa ambientalmente favorável aos estabilizantes tradicionais. A revisão apontou ganhos em propriedades como resistência mecânica, permeabilidade e durabilidade, mas ressaltou desafios relacionados à variabilidade de desempenho, custos de produção e ausência de metodologias padronizadas de dosagem. Os autores enfatizam a necessidade de integrar análises de ciclo de vida (ACV) às pesquisas geotécnicas, de forma a alinhar a seleção de aditivos às demandas de sustentabilidade e eficiência ambiental

2.4. CARACTERÍSTICAS DAS MATRIZES DE MATERIAIS GEOTÉCNICOS

Grim e Guvem (1978) definem que bentonita é, essencialmente, uma argila com argilominerais esmectíticos, independentemente da origem geológica. O grupo das esmectitas são formados por duas folhas de tetraedros (sílica no centro e oxigênio nas pontas) com uma folha central de octaédricos (hidróxido de alumínio), sendo dita 2:1 (Fernandes *et al.*, 2023; Cutrim *et al.*, 2015).

Uma outra definição de bentonita advém de Ross e Shannon (1926) a qual pode ser descrita como uma rocha composta principalmente por um argilomineral chamado montmorilonita (ou esmectita). Ela se forma a partir da desvitrificação e posterior alteração química de um material vítreo de origem ígnea, geralmente um tufão ou cinza vulcânica, em ambientes alcalinos com circulação limitada de água. As concentrações de montmorilonitas nas bentonitas variam de 60 a 95%, sendo, esse argilomineral o mais abundante do grupo das esmectitas. (Pereira, 2017)

Enumera-se diversas características a bentonita, contudo, suas principais características são a capacidade de expansão, alta área de superfície, elevada capacidade de troca cátions e tixotropia (Venezuela-Diaz, 2011; Silva, 2011; Leme, 2024)

As bentonitas têm a capacidade de expandir quando em contato com a água, sendo que as que apresentam essa propriedade de forma mais acentuada são as que possuem sódio como cátion interlamelar. As bentonitas sódicas, ao serem expostas à umidade atmosférica, absorvem água até formar uma camada monomolecular em torno de cada partícula. Contudo, quando imersas em água, adsorvem continuamente várias camadas de moléculas de água, o que provoca inchaço e aumento de volume. Esse contínuo processo de adsorção resulta no desfolhamento das partículas (Cutrim *et al.*, 2015).

As bentonitas são conhecidas por sua elevada Capacidade de Troca de Cátions (CTC), presença de Cátions Trocáveis (CT). A montmorolonita comumente apresenta excesso de cargas negativas, devido a substituições isomórficas. Essas cargas são compensadas por cátions intercambiáveis na região interlamelar. Devido à fraca ligação química desses cátions com a lamela, eles podem ser substituídos. (Silva, 2011; Leme, 2024). Na Figura 2.3 está representado o inchaço da bentonita sódica e da bentonita cálcica.

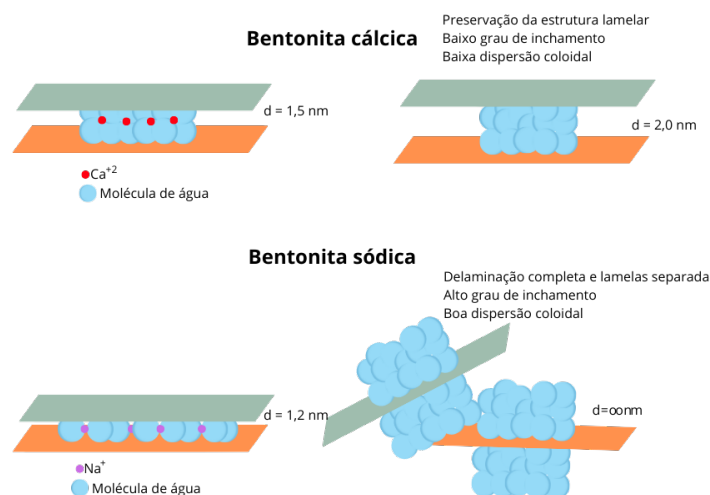


Figura 2.3. Inchaço da bentonita sódica e da bentonita cálcica. (Modificado - Leme, 2024).

Elas podem ser classificadas como homocatiônicas, quando possuem predominantemente um único tipo de cátion trocável, como sódio ou cálcio, ou policatiônicas, quando não há um cátion trocável predominante. (Pereira, 2017; Cutrim *et al.*, 2015).

A bentonita exibe uma variedade de propriedades que a tornam valiosa em diversas aplicações industriais, além das citadas anteriormente pode-se enumerar: a fina granulometria permite a produção de pós delicados; enquanto sua grande área superficial específica ($\sim 800 \text{ m}^2/\text{g}$) facilita sua interação com outros materiais em processos como branqueamento de óleos e catálise; A capacidade de hidratação e dispersão em meios aquosos, evidenciada por sua reologia, a torna essencial em fluidos de perfuração e tintas; A resistência a altas temperaturas a torna indispensável em aplicações refratárias, como na fundição; A adição de bentonita aumenta irreversivelmente a viscosidade de fluidos, crucial para a estabilidade em fluidos de perfuração; Sua tixotropia permite ajustar o comportamento reológico de fluidos em diversas aplicações. (Silva, 2011; Cutrim *et al.*, 2015; Pereira, 2017; Fernández, 2023; Leme, 2024).

A produção de bentonita no Brasil é liderada pelo estado da Paraíba, aproximadamente, 80% da produção total da bentonita advém das cidades de Boa Vista, Pedra Lavrada e Cubati (inseridas na unidade geológica do Planalto de Borborema). O Brasil, em 2020, estava na 10ª posição no ranking mundial de produtores de bentonita (MME, 2021; Cutrim *et al.*, 2015).

Os solos arenosos são constituídos predominantemente por partículas de areia (diâmetro entre 0,075 mm e 4,75 mm, segundo o Sistema Unificado de Classificação dos Solos – USCS), caracterizando-se por baixa plasticidade, elevada permeabilidade e comportamento essencialmente drenado. O arranjo granular e o grau de compactação são fatores determinantes para seu desempenho geotécnico, influenciando diretamente a densidade, a resistência ao cisalhamento e a deformabilidade.

De acordo com Terzaghi, Peck e Mesri (1996), os solos arenosos apresentam comportamento dominado pelo atrito entre partículas, sendo a coesão aparente praticamente nula. A resistência ao cisalhamento é governada principalmente pelo ângulo de atrito interno (ϕ), o qual depende do grau de compactação e da angularidade dos grãos. A relação entre tensões efetivas e deformações nesses solos é linear em pequenas deformações, mas tende à não linearidade em maiores níveis de tensão.

Segundo Das (2009), a compressibilidade das areias é pequena, e a variação de volume é mais acentuada em materiais soltos sujeitos a carregamentos estáticos ou dinâmicos. A compactação exerce papel fundamental na redução da compressibilidade e no aumento da resistência. O autor também destaca que as propriedades hidráulicas das areias dependem fortemente da granulometria e da uniformidade dos grãos.

Em termos estruturais, Carvalho *et al.* (2015) ressaltam que os solos arenosos, especialmente os encontrados em regiões tropicais, apresentam comportamento distinto das

areias temperadas. Em ambientes tropicais, o intemperismo intenso pode gerar partículas mais finas e recobertas por óxidos de ferro e alumínio, modificando as interações solo-água e as respostas mecânicas. Essa característica faz com que mesmo solos classificados texturalmente como arenosos apresentem comportamento parcialmente não saturado e, em alguns casos, certa coesão aparente devido à sucção matricial.

A caracterização física e o estudo da estrutura dos solos arenosos também podem ser realizados por meio de ensaios de granulometria, densidade relativa, ensaios triaxiais drenados e ensaios de cisalhamento direto, conforme orienta Das (2009). Esses autores reforçam que a resistência ao cisalhamento é afetada pela forma dos grãos, distribuição granulométrica e energia de compactação. Ensaio laboratoriais indicam que, com o aumento da densidade relativa, o ângulo de atrito interno tende a valores superiores a 40°, podendo atingir até 45° em areias angulosas bem compactadas.

O comportamento drenado e a rápida dissipação de pressões neutras nas areias tornam esse tipo de solo preferido para fundações superficiais e materiais de base em pavimentação, desde que adequadamente compactados e protegidos contra erosão e segregação granulométrica. A literatura recente também tem destacado o papel da sucção matricial e do grau de saturação em areias finas, abordados na literatura nacional de solos não saturados (Carvalho *et al.*, 2015), reforçando que a condição parcialmente saturada pode conferir resistência adicional temporária ao material.

2.5. DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS CHAVE

Diversos pesquisadores têm buscado desenvolver métodos racionais de dosagem para solos estabilizados, de modo a prever o comportamento mecânico a partir de variáveis fundamentais de moldagem e teor de aglutinante. Nesse campo, destacam-se os trabalhos de Consoli e colaboradores (2007, 2011, 2012, 2014), que estabeleceram a relação entre porosidade (η) e o teor volumétrico de aglutinante (Civ ou Liv) como parâmetro preditivo da resistência. Em suas investigações com misturas de solo-cimento, solo-cal e solo-cinzas, os autores mostraram que a redução da porosidade e o aumento do teor de ligante levam a incrementos significativos na resistência à compressão simples e à tração. A partir dessa abordagem, tornou-se possível estimar o desempenho mecânico das misturas por meio da relação η/Civ , permitindo extrapolar resultados de ensaios laboratoriais para diferentes condições de moldagem.

Posteriormente, esse conceito foi ampliado e validado em outras condições. Ruver (2011) demonstrou que, em fundações executadas com solos tratados com cimento, tanto o aumento do teor de ligante quanto a redução da porosidade do reaterro elevaram significativamente a capacidade de carga, reforçando a adequação da relação porosidade/aglutinante como parâmetro de previsão. De forma semelhante, Benetti (2015), ao estudar solos residuais tratados com cal, comprovou que a relação vazios/cal é eficaz para estimar propriedades como condutividade hidráulica, resistência à compressão simples e resistência à tração, em diferentes condições de cura. Belchior (2017) também confirmou a aplicabilidade dessa metodologia em estudos de misturas solo-cal, mostrando que a abordagem é válida mesmo em materiais mais complexos, com variações mineralógicas e estruturais.

Mais recentemente, essa linha de raciocínio foi aplicada ao estudo de compósitos solo-polímero. Alelvan *et al* (2022) propôs e validou a utilização da relação V_v/Piv (volume de vazios/volume de polímero incorporado) como parâmetro de estimativa da resistência à compressão simples. Os resultados indicaram forte correlação entre essa razão e os valores de resistência obtidos experimentalmente, confirmando que o modelo desenvolvido por Consoli e colaboradores pode ser estendido para materiais estabilizados com polímeros. Além disso, análises microestruturais (MEV e microCT) demonstraram que o polímero atua tanto na redução da porosidade aberta quanto na ligação preferencial às partículas finas, promovendo ganho de coesão e estabilidade. Esses achados reforçam que a metodologia de dosagem racional baseada na relação V_v/Piv é aplicável e promissora para compósitos solo-polímero, permitindo não apenas prever o comportamento mecânico, mas também fundamentar critérios de projeto e aplicação em campo.

Lopes *et al.* (2025) propuseram um modelo de dosagem baseado no índice porosidade/conteúdo volumétrico de polímero (η/Piv), demonstrando que esse parâmetro composto é capaz de prever a resistência com coeficientes de determinação superiores a 0,90. O estudo evidenciou que o aumento de resistência pode ser obtido tanto pela elevação do teor de polímero quanto pela redução da porosidade, consolidando o η/Piv como variável-chave no dimensionamento de misturas solo-polímero.

2.6. CONSIDERAÇÕES FINAIS DA REVISÃO DE LITERATURA

A revisão de literatura evidencia que as técnicas convencionais de estabilização química com cal, cimento e cinzas estão consolidadas, com procedimentos normativos bem definidos e

faixas de desempenho amplamente aceitas para parâmetros como resistência à compressão simples e módulo de resiliência. Por outro lado, o impacto ambiental associado à produção desses ligantes, aliado às elevadas dosagens necessárias em alguns casos e às limitações em solos muito expansivos ou com teores significativos de sais e matéria orgânica, tem impulsionado a busca por alternativas mais sustentáveis e versáteis.

Nesse contexto, os polímeros surgem como estabilizantes promissores, capazes de atuar tanto na modificação físico-química dos solos finos quanto na introdução de coesão artificial em solos arenosos. Os estudos revisados indicam ganhos relevantes em resistência, redução de expansibilidade e melhoria de desempenho hidráulico para diferentes tipos de polímeros e solos. Contudo, observa-se grande dispersão de resultados e ausência de padronização quanto ao tipo de polímero, faixa de dosagem, procedimento de mistura, tempos de cura e critérios de desempenho, o que dificulta a transposição dos achados de laboratório para recomendações de projeto e aplicação em campo. Destaca-se ainda que os trabalhos com solos tropicais arenosos e bentonitas, sobretudo em condições representativas de pavimentação, ainda são em número reduzido.

Os avanços recentes em métodos racionais de dosagem, baseados em índices que combinam porosidade e teor volumétrico de aglutinante, mostram-se particularmente relevantes para compósitos solo polímero. A extensão do conceito de η/C_v para relações como V_v/P_{iv} ou η/P_{iv} demonstra que é possível prever a resistência a partir de variáveis de moldagem e do conteúdo de polímero, reduzindo a necessidade de campanhas extensas de ensaios. Ainda assim, permanecem lacunas importantes quanto à aplicação sistemática desses índices em compósitos formados por solos de naturezas contrastantes, como um solo arenoso de baixa plasticidade e uma bentonita sódica expansiva, bem como quanto à integração entre desempenho mecânico, comportamento hidráulico e observações microestruturais.

Diante desse cenário, a presente pesquisa se propõe a contribuir para o entendimento e a dosagem racional de compósitos solo polímero nesses dois materiais, buscando fornecer subsídios técnicos para seu uso em infraestrutura viária com enfoque em desempenho e sustentabilidade.

MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta seção serão apresentados os materiais utilizados nesta pesquisa, bem como os métodos empregados para as caracterizações física, mecânica, hidráulica, química, mineralógica, ambiental e microestrutural.

3.1. MATERIAIS E PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS

Nos subitens subsequentes serão abordados os materiais utilizados na pesquisa, solo, bentonita e polímero, por meio das misturas deles há a formação dos compósitos, apresentando respectivas dosagens, tempo de cura e preparação das amostras.

3.1.1. SOLO ARENOSO

O solo utilizado advém da região da APA-Jalapão, precisamente da rodovia TO-247, no município de Mateiros – TO. Foi coletado no dia 02 de fevereiro de 2019 nas coordenadas 10°24'32,8'' sul e longitude 47°05'45,2'' oeste a uma altitude de 440 metros. A Figura 3.1 mostra a localização e o solo após a secagem.



Figura 3.1. (a) Localização local de coleta do solo (Google, 2020); (b) Solo após secagem.

O ecossistema do Jalapão possui solo arenoso úmido e uma vegetação rala de campo de cerrado. Estima-se que a região, que possui altitude variante de 200 a 500 metros acima do nível

do mar, tendo sido assoalho oceânico há 60 milhões de anos. As serras foram recobertas com material arenoso pela ação de erosões naturais e do tempo, dando, então, origem à enorme quantidade de areia que cobre a parte sudoeste do estado do Tocantins. O município de Mateiros concentra a maior parte dos atrativos da região e, portanto, é relativamente mais associado ao turismo regional. (SEPLAN, 2003; Marinho *et al.*, 2016; ICMBio, 2013).

A área de estudo está inserida no Grupo Urucua, formado durante o Mesozoico, Cretáceo (K), conforme apresentado no mapa geológico (Figura 3.2). Segundo Ribeiro *et al.* (2022) essa unidade é caracterizada principalmente por arenitos de coloração vermelha e branca, com estratificações cruzadas de grande porte, além de camadas com fragmentos de rochas maiores e arenitos de granulação média a grossa, com estratificações planares de médio porte.

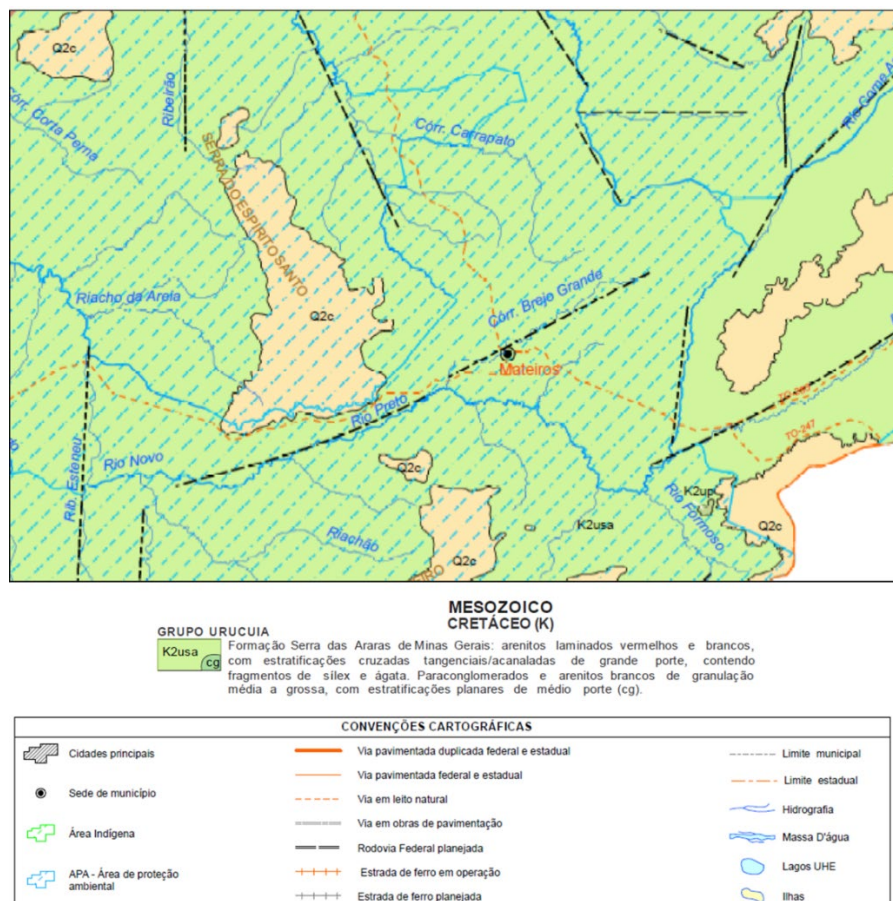


Figura 3.2. Mapa geológico e de recursos minerais do estado do Tocantins - Cidade de Mateiros (Modificado – Ribeiro *et al.*, 2022)

Essa caracterização justifica a predominância de solos arenosos na região, de textura média a grossa, derivados do intemperismo desses arenitos. Tais solos apresentam baixa coesão

natural, alta permeabilidade e menor capacidade de retenção de água, fatores que tornam relevante o estudo de estabilização com agentes químicos não tradicionais, como os polímeros, para aplicação em obras de infraestrutura.

Segundo Silva (2020), o solo arenoso estudado apresenta massa específica de $2,7 \text{ g/cm}^3$ e é classificado como não plástico (NP). De acordo com a classificação da AASHTO, enquadra-se como um solo tipo A-3, enquanto pela SUCS corresponde a uma areia mal graduada (SP). A análise granulométrica indicou coeficiente de não uniformidade (CNU) de 3,25 e coeficiente de curvatura (CC) de 1,08, valores que confirmam tratar-se de uma areia uniforme. A curva granulométrica do solo utilizado está representada na Figura 3.3.

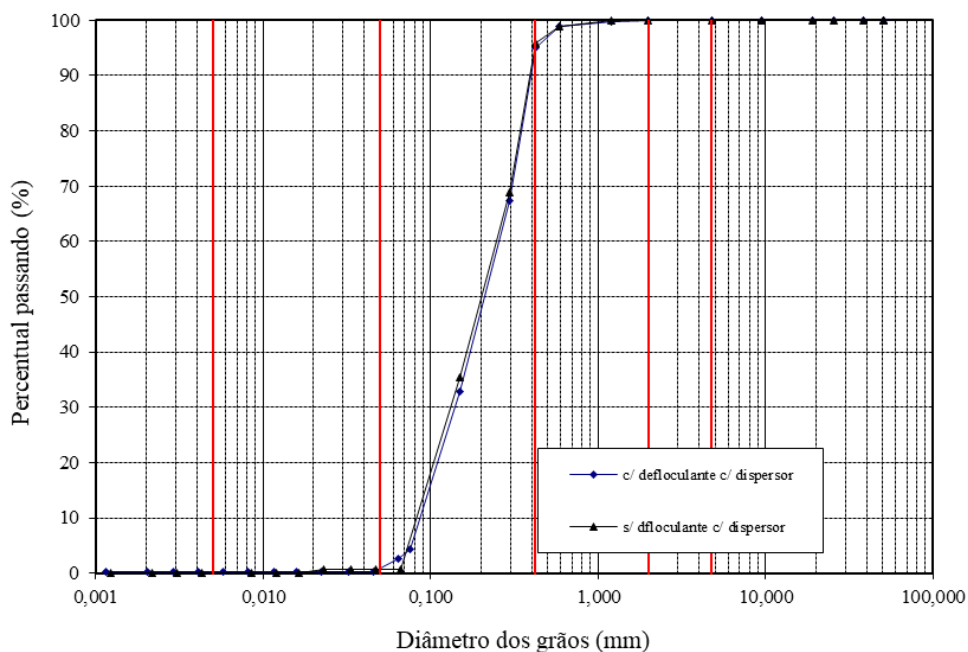


Figura 3.3 Curva Granulométrica do solo estudado (Modificado – Silva, 2020)

3.1.2. BENTONITA

A bentonita empregada nesta pesquisa é proveniente do município de Boa Vista, no estado da Paraíba, e comercializada sob o nome comercial Solominas pela empresa Bentonisa – Bentonita do Nordeste S.A.

Considerando que a bentonita utilizada neste estudo é proveniente da mesma jazida da região de Boa Vista – PB, adotou-se como referência os resultados apresentados por Rodrigues *et al.* (2007). Nesse trabalho, os autores realizaram a análise granulométrica por difração de laser da argila natural, obtendo diâmetro médio de partículas de $3,21 \mu\text{m}$, com

aproximadamente 44% da massa acumulada correspondente à fração menor que 2 μm e concentração predominante de partículas na faixa de 2 a 5 μm (Figura 3.4).

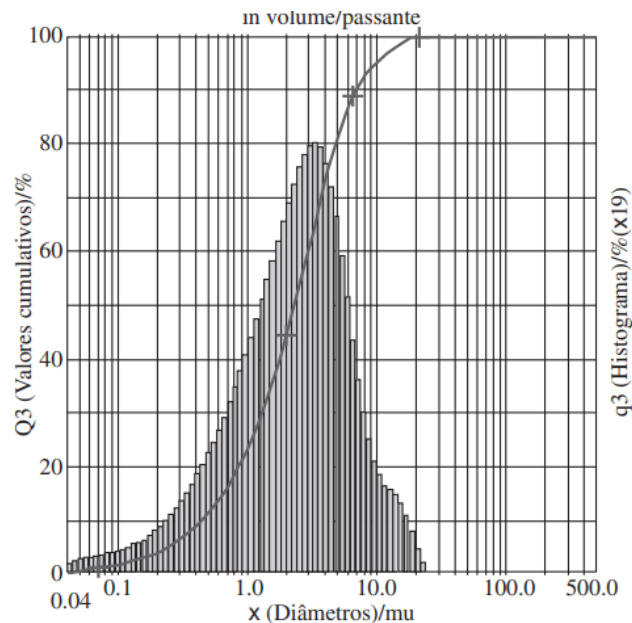


Figura 3.4. Distribuição granulométrica da bentonita natural da região de Boa Vista – PB obtida por difração a laser. (Rodrigues *et al.*, 2007).

Com o intuito de aprofundar a compreensão dos elementos constituintes e possibilitar análises comparativas mais consistentes, foram realizados ensaios de caracterização química e mineralógica da bentonita. Para tanto, aplicaram-se técnicas de difração de raios X (DRX), microscopia eletrônica de varredura (MEV) e espectrometria de emissão óptica por plasma acoplado indutivamente (ICP-OES), conduzidas tanto na bentonita natural quanto nos compósitos produzidos.

3.1.3. POLÍMERO

Na presente pesquisa, utilizou-se o material TERRAFIX 11 (CAS: 25035-69-2), um copolímero sintético acrílico-estirenado obtido de forma aleatória. O produto é disponibilizado como emulsão aquosa de caráter aniônico, fabricado e distribuído pela empresa Waterflows. Suas principais propriedades físico-químicas, conforme informado pelo fabricante, são: pH entre 8,0 e 9,0, densidade variando de 0,98 a 1,04 g/cm^3 , viscosidade na faixa de 3.000 a 10.000 $\text{mPa}\cdot\text{s}$ e total solubilidade em água. Segundo as especificações técnicas, o TERRAFIX 11 pode

ser empregado como selante (reductor de poeira) e estabilizante de solos. Na Figura 3.5 apresenta-se o recipiente de distribuição (galão) e o polímero utilizado:

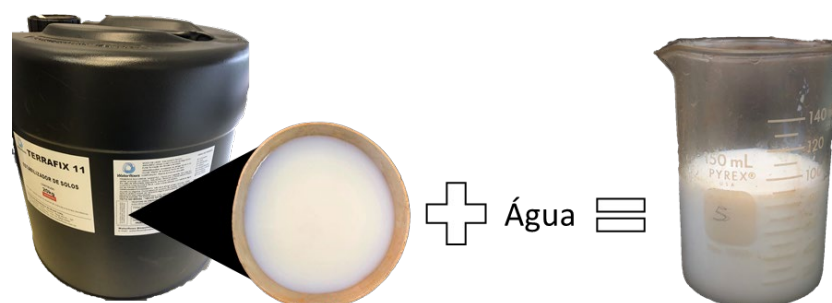


Figura 3.5. Produto utilizado como estabilizante.

A composição quali-quantitativa do material não foi fornecida pelo fabricante, por se tratar de sigilo comercial e industrial. Na Tabela 3.2 compilam-se três compostos que podem possuir impurezas com potencial toxicológico.

Tabela 3.1. Componentes toxicológicos do produto (Fonte: Fabricante Polímero)

Composto Químico	Fórmula Química	Faixa de Concentração (%)
Éster de ácido acrílico na forma livre	C_3H_4O	< 0,5
Vinil Benzeno	C_8H_8	< 0,5
Amoníaco em Solução	H_5NO	< 0,25

A caracterização química do polímero utilizado nesta pesquisa foi previamente estudada em Silva (2020), por meio de Espectrometria de Fluorescência de Raios X (XRF/EDX) e análise elementar CHN. Os resultados da XRF evidenciaram a predominância de enxofre (46,97%) e sódio (33,92%), além da presença de silício (9,37%), potássio (4,50%), alumínio (3,92%) e zinco (1,35%) (Figura 3.6). A elevada participação de sódio e enxofre está associada ao caráter aniônico do polímero, favorecendo a interação com partículas minerais carregadas positivamente presentes no solo e contribuindo para o aumento da estabilidade química dos compósitos.

ANÁLISE XRF/EDX - POLÍMERO

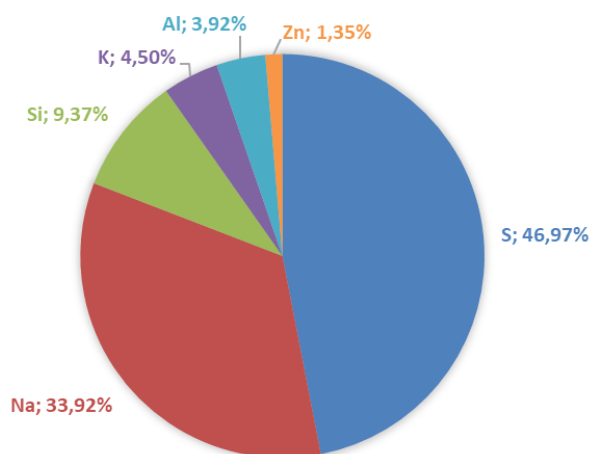


Figura 3.6. Análise XRF/EDX – Polímero (Fonte: Silva, 2020)

A análise elementar CHN, por sua vez, demonstrou a composição do polímero, com predomínio de carbono (69,03%), além de hidrogênio (7,01%) e traços de nitrogênio (0,52%) (Figura 3.7). Esses resultados confirmam a estrutura de base acrílico-estirenada, típica de polímeros sintéticos derivados de petróleo, e explicam a capacidade do material de formar uma matriz coesiva envolvendo as partículas de solo. Essa combinação de componentes inorgânicos e orgânicos evidencia o duplo papel do polímero: de um lado, atuar como agente ligante, promovendo coesão entre as partículas, e de outro, reforçar a estabilidade química do sistema por meio de interações aniônicas.

CHN - POLÍMERO

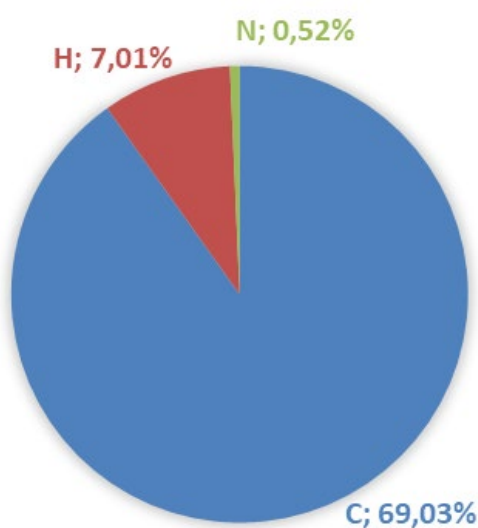


Figura 3.7. Análise CHN - Polímero (Fonte: Silva, 2020)

3.1.4. DOSAGENS DOS COMPÓSITOS

As amostras de compósito destinadas à realização dos ensaios foram preparadas a partir da mistura dos solos com a solução polimérica. Considerando-se que a pesquisa contemplou diferentes tempos de cura, tornou-se necessária a moldagem prévia dos corpos de prova, respeitando-se a energia de compactação e as dimensões específicas de cada ensaio.

Com o intuito de assegurar uniformidade nas condições de cura, todos os corpos de prova foram mantidos em ambiente controlado no Laboratório de Novos Materiais Geotécnicos da Universidade de Brasília, sob temperatura de 20–22 °C e umidade relativa de 20–40%. Durante a mistura entre o solo e a solução polimérica, observou-se que o material apresentava, inicialmente, consistência pastosa, endurecendo gradualmente com a exposição ao ar, processo que evoluía da superfície para o interior das amostras.

Os corpos de prova permaneceram em cura fora dos moldes, uma vez que o processo de endurecimento ocorria em contato direto com o ambiente. A solução polimérica foi preparada mediante diluição do polímero em água, nas dosagens previamente estabelecidas, e misturada manualmente ao solo. Todo o volume obtido era imediatamente utilizado, evitando o armazenamento e possíveis reações químicas indesejadas. Essa prática buscou ainda reproduzir as condições usuais de campo, nas quais o polímero é previamente diluído em caminhões-pipa e, posteriormente, aplicado e homogeneizado com os solos.

As soluções poliméricas foram preparadas em volume, mediante diluição do polímero em água. Para o solo arenoso, adotaram-se as dosagens propostas por Silva (2020), correspondentes a 50% e 25%, acrescentando-se nesta pesquisa uma dosagem intermediária de 40%. Já para o compósito bentonítico, foram consideradas as soluções de 25% e 50%.

A obtenção dos compósitos foi conduzida com a adição da solução em massa de solo seco, de acordo com a umidade ótima determinada previamente nos ensaios de compactação. Esse procedimento foi adotado por representar a prática usual de campo. Ressalta-se que, caso a adição fosse realizada inicialmente apenas com água e, em seguida, com o polímero puro (não diluído), não haveria garantia de homogeneidade na distribuição do aditivo nem da proporção efetivamente incorporada ao solo.

Na Tabela 3.3 apresentam-se as nomenclaturas utilizadas na pesquisa, as respectivas soluções, suas proporções e o teor de polímero correspondente em cada compósito, de acordo com a massa de solo seco.

Tabela 3.2. Nomenclatura, proporções e teores de polímero adotados nos compósitos.

Nomenclatura	Solução polimérica (% em vol.)
SP40	40
B255	25
B500	50

Durante a preparação dos corpos de prova com o solo arenoso, verificou-se uma perda de umidade de aproximadamente 1,5% entre a moldagem e o valor correspondente à umidade trabalhada. Para atingir o par umidade–massa específica seca estabelecidos, foi necessário adicionar uma quantidade suplementar de solução equivalente a 1,5% da massa de solo seco.

3.1.4.1. TEMPO DE CURA

Os tempos de cura avaliados encontram-se organizados no Tabela 3.4, referente aos ensaios realizados com os compósitos arenosos e bentoníticos. Ressalta-se que a cura foi conduzida ao ar livre, uma vez que o endurecimento dos compósitos ocorre pelo contato direto com o ar. A contagem dos dias de cura considerou como marco inicial a data de moldagem dos corpos de prova. A umidade de trabalho é a umidade ótima obtida na compactação intermediária.

Tabela 3.3. Ensaio realizados para os compósitos arenosos e tempos de cura referentes.

Métodos de Ensaio	Compósitos Arenosos	Compósitos Bentoníticos
	Tempos de Cura (dias)	Tempos de Cura (dias)
Determinação da Resistência à Compressão não Confinada	7,15 e 30	7,15 e 30
Cisalhamento Direto	0, 1, 2, 4, 7, 15, 30 e 45	0, 1, 2, 4, 7, 15, 30 e 45
Determinação do Módulo de Resiliência para Solo	7, 15, 30 e 45	Não realizado
WP4C – Medidor de Potencial Hídrico	0, 1, 2, 4, 7, 15 e 30	0, 1, 2, 4, 7, 15 e 30
ICP-OES, DRX, MEV e Tomografia	30	30

3.2. PROGRAMA EXPERIMENTAL

Nos itens subsequentes são apresentados os ensaios realizados para a caracterização física, mecânica e microestrutural dos compósitos estudados. Para ambos os solos e seus

respectivos compósitos, foram conduzidos os ensaios de compactação, cisalhamento direto, resistência à compressão não confinada e determinação da sucção total pelo método WP4C.

No caso do compósito arenoso, realizou-se adicionalmente o ensaio de módulo de resiliência, com o objetivo de avaliar a resposta elástica sob carregamentos repetidos e o comportamento mecânico frente à variação do tempo de cura.

Complementarmente, procedeu-se à caracterização química e mineralógica de todos os materiais — tanto dos compósitos quanto dos solos sem estabilização — por meio de difração de raios X (DRX) e espectrometria de emissão óptica com plasma acoplado indutivamente (ICP-OES).

Para a avaliação microestrutural e morfológica, foram realizadas análises em microscopia eletrônica de varredura (MEV) e ensaios de tomografia em 2D e 3D, visando identificar a interação entre partículas, a distribuição do polímero e eventuais modificações na estrutura porosa.

Por fim, apresenta-se a aplicação do método dos parâmetros-chave, restrita ao compósito arenoso, utilizada para correlacionar os resultados experimentais e estabelecer parâmetros representativos de desempenho.

Os ensaios foram conduzidos em conformidade com as normas técnicas nacionais e internacionais aplicáveis, conforme detalhado nas subseções seguintes, de modo a assegurar a reprodutibilidade e a comparabilidade dos resultados obtidos.

Para a bentonita, a caracterização dimensional e física dos compósitos bentonita-polímero (formulações B25 e B50) foi conduzida por meio do monitoramento sistemático dos parâmetros geométricos e das propriedades físicas ao longo do processo de cura. Para cada corpo de prova, foram registrados os comprimentos característicos (lado e altura), a área superficial, o volume aparente, a massa e a massa específica aparente (ρ).

As medições foram realizadas nas idades de 0, 1, 2, 4, 7, 15, 30 e 45 dias de cura, de modo a acompanhar a evolução da contração volumétrica, a variação geométrica e o processo de densificação decorrente da incorporação do polímero.

Por não existir um procedimento normatizado para esse tipo de avaliação, o método adotado foi desenvolvido especificamente para esta pesquisa, visando quantificar, com base em parâmetros dimensionais e físicos, a influência das diferentes dosagens poliméricas no comportamento volumétrico da bentonita.

3.2.1. ENSAIO DE COMPACTAÇÃO

O item foi subdividido para a apresentação detalhada dos procedimentos de compactação aplicados ao solo arenoso e aos respectivos compósitos, bem como à bentonita e aos compósitos bentoníticos.

3.2.1.1. COMPÓSITOS ARENOSOS E SOLO ARENOSO

O ensaio de compactação foi realizado conforme a NBR 7182 (ABNT, 2016), equivalente à D1557-12e1 (ASTM, 2014), tomando-se como referência a metodologia descrita por Silva (2020) e incluindo, nesta pesquisa, o estudo adicional do compósito arenoso com 40% de solução polimérica (SP40).

Para os compósitos arenosos, a execução do ensaio foi adaptada em relação ao prescrito em norma: em vez da adição de água em cada ponto da curva de compactação, foi utilizada a solução polimérica previamente preparada na dosagem desejada. Essa solução foi incorporada em massa de solo seco, de modo a garantir homogeneidade na mistura.

O ensaio de compactação do solo natural foi conduzido na energia intermediária, conforme os procedimentos normativos. A escolha por esta energia foi devido a possibilidade de aplicação em pavimentação e/ou lastro de ferrovias, além de *binders* de aterros sanitários, sendo para estas aplicações recomendado a utilização de energia intermediária.

3.2.1.2. COMPÓSITOS BENTONÍTICOS E BENTONITA

Para os compósitos bentoníticos (B25 e B50) e para a bentonita natural, não foi possível realizar o ensaio de compactação conforme a NBR 7182 (ABNT, 2016), em razão da elevada plasticidade do material.

Com o intuito de superar essa limitação, foi adotado um procedimento alternativo de compactação, baseado na aplicação de força normal em velocidade constante sobre o material. A metodologia desenvolvida foi estruturada de acordo com os passos descritos a seguir:

- Foram preparados cinco pontos de umidade distintos. Para padronizar a hidratação e a trabalhabilidade, a mistura do solo com a solução polimérica foi deixada em repouso por 1 hora antes da moldagem (Figura 3.8 (e));

- Foi utilizado o cilindro pequeno descrito na NBR 7182 (ABNT, 2016), previamente dividido em alturas iguais para padronizar a espessura de cada camada (Figura 3.8 (a));
- Para cada ponto, foram separados 1 kg do material com a devida quantidade de solução, o qual foi fracionado em três camadas (Figura 3.8 (b));
- Cada camada foi compactada mediante aplicação de carga com velocidade de 4,25 mm/min até atingir a altura pré-determinada. O cilindro permaneceu fechado na base para evitar perdas de material e, na parte superior, foi posicionado um disco metálico de 1 kg. O pistão foi aplicado de forma centralizada sobre esse disco, de modo a distribuir uniformemente os esforços e evitar a expulsão lateral do material (Figura 3.8 (f));
- O peso do conjunto (solo ou compósito) foi registrado antes e após a compactação, a fim de verificar possíveis perdas de massa.
- Entre as camadas, a superfície compactada foi escarificada para favorecer a aderência entre elas.
- O procedimento foi repetido para as três camadas.
- Ao término, o corpo de prova compactado foi extraído e mantido em estufa a 105 °C por 12 h. Esse tempo de secagem foi definido a partir de tentativas preliminares, nas quais se verificou perda excessiva de umidade, provavelmente associada à desidratação intersticial dos grãos de montmorilonita presentes na bentonita e nos compósitos bentoníticos (Figura 3.8 (i)).



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



(f)



(g)



(h)



(i)

Figura 3.8. Ensaio de compactação adaptado para bentonita e compósitos bentoníticos. (a) Materiais; (b) Bentonita e solução polimérica; (c) Incorporação da solução polimérica na bentonita; (d) Material em repouso para hidratação de 1 hora; (e) Representação de três pontos da curva de compactação; (f) Pistão sobre peso metálico sobre amostra; (g) Superfície após compactação; (h) Extração do corpo-de-prova; (i) Corpo de prova final de um dos pontos da curva de compactação.

3.2.2. DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO NÃO CONFINADA

Realizado a luz da norma NBR 12770 (ABNT, 2022), equivalente à ASTM D1633-17, tem por objetivo a determinação da resistência à compressão não confinada por meio da aplicação de carga axial. Os corpos de prova utilizados apresentam 5 cm de diâmetro e 10 cm de altura, sendo obtidos por compactação.

Como referências complementares, podem ser consideradas as normas DNER-ME 180/94, DNER-IE 004/94 e DNER-ME 201/94. Ressalta-se, entretanto, que a cura do solo-polímero ocorreu ao ar, diferentemente do procedimento adotado em misturas com cimento e/ou cal, em que a cura é realizada em meio submerso.

Adotou-se a velocidade de ruptura de 1,27 mm/min, em conformidade com aplicado por Silva (2020). Para possibilitar melhor comparação entre os compósitos e obtenção da curva completa, o ensaio foi conduzido mesmo após o corpo de prova atingir 20% de deformação ou o valor máximo de resistência (pico), permitindo a avaliação do comportamento pós-pico.

As amostras moldadas apresentaram dimensões de $10 \pm 0,5$ cm de altura e $5 \pm 0,1$ cm de diâmetro. Para os compósitos solo-polímero, a moldagem foi realizada no compactador miniatura, utilizando energia intermediária, em 3 camadas de 7 golpes com soquete grande. Na Figura 3.9 mostra-se o corpo de prova após a moldagem.

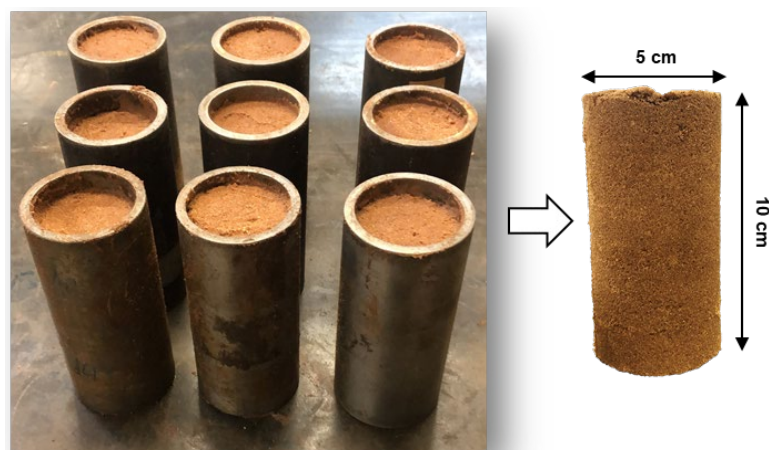


Figura 3.9. Corpos de prova cilíndricos com 10x5 cm.

No caso do solo bentonítico e dos compósitos bentoníticos, empregou-se a mesma preparação descrita para a compactação. Após a homogeneização, todo o material foi introduzido no cilindro miniatura e comprimido até atingir a massa específica requerida para o

ensaio. Na Figura 3.10 apresenta-se um QR Code vinculado ao vídeo que demonstra a preparação e moldagem adotadas.



Figura 3.10. QR CODE do vídeo que demonstra a preparação e moldagem do compósito bentonítico-polímero.

Sempre que possível, o ensaio foi realizado também com o solo natural, de modo a possibilitar comparações. Em solos de matriz arenosa não plástica, entretanto, tal procedimento não foi viável. Para o solo bentonítico, contudo, a moldagem e o ensaio de ruptura foram executados com êxito.

3.2.3. ENSAIO DE CISALHAMENTO DIRETO

O ensaio de cisalhamento direto foi realizado de acordo com a ASTM D3080 (ASTM, 2011). Esse ensaio busca a determinação dos parâmetros de resistência do solo, intercepto coesivo e ângulo de atrito, estabelecendo, então, a envoltória de resistência de Mohr-Coulomb em tensões efetivas.

Os dados aferidos possibilitam a determinação das curvas de tensão cisalhante por deslocamento, de deslocamento vertical por deslocamento horizontal e de tensão normal por tensão cisalhante de pico, que definem a envoltória de ruptura.

O ensaio foi realizado com o material puro (sem polímero) e com os compósitos, para ambas as matrizes de solo trabalhadas. Os corpos de prova foram confeccionados obedecendo o teor de umidade ótima e massa específica seca referente ao ensaio de compactação na energia intermediária. Aplicou-se 50, 100, 200 e 400 kPa de tensão normal para a obtenção da envoltória de resistência de Mohr-Coulomb.

Para o ensaio de cisalhamento direto foram utilizadas amostras com as dimensões de 60x60 mm com 25 mm de altura. Os compósitos foram moldados diretamente no molde. Houve controle da massa específica e umidade para serem feitas nas umidades ótimas. Na Figura

3.11(a) mostra-se como foi realizada a moldagem desse corpo de prova arenoso, e na Figura 3.11(b).

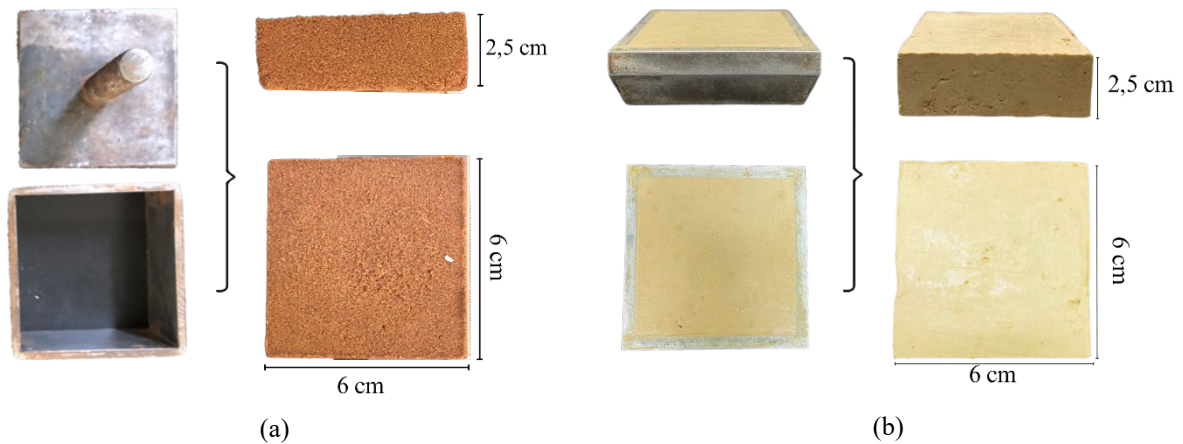


Figura 3.11. Método de moldagem dos CPs do ensaio de cisalhamento direto. (a) Solo arenoso; (b) Solo bentonítico.

Para o solo bentonítico preparado com água não foi possível a realização do ensaio devida a sua plasticidade, assim que se aplicava a força normal a superfície o material saía da caixa de cisalhamento, na Figura 3.12 mostra-se o descrito. O mesmo ocorreu com o compósito bentonítico, para ambas as dosagens, para cura de 0 e 1 dias.

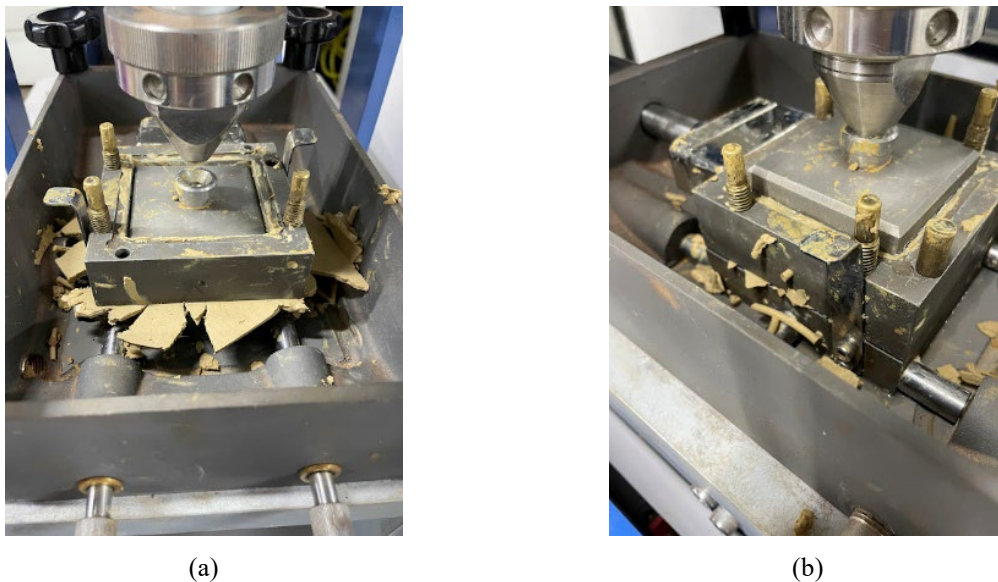


Figura 3.12. Saída de material bentonítico; (a) Bentonita e água; (b) Compósito bentonita-polímero;

Por se tratar de material granular, a etapa de adensamento foi extremamente rápida. A velocidade de cisalhamento foi determinada com base na etapa de adensamento e foi de 0,5 mm/min para ambos os materiais e compósitos.

A velocidade foi determinada pela metodologia “t90” de Casagrande e a velocidade se deu a mesma para ambos os compósitos devido a rigidez que os corpos de prova possuem após a cura.

3.2.4. DETERMINAÇÃO DO MÓDULO DE RESILIÊNCIA

O ensaio foi realizado conforme a norma DNIT 134 (2018), a qual simula as condições físicas e os estados de tensão a que os materiais estão submetidos nas camadas do pavimento em decorrência das cargas móveis do tráfego.

Embora a norma estabeleça sua aplicação para materiais não estabilizados quimicamente, também foi adotada para os compósitos, a fim de possibilitar a avaliação do efeito da tensão confinante. Essa escolha justifica-se, pois, na norma DNIT 181 (2018), direcionada a materiais estabilizados quimicamente, não há aplicação de tensão confinante.

No ensaio, as tensões analisadas corresponderam à normal horizontal ($\sigma_3 = \sigma_h$) e à vertical ($\sigma_1 = \sigma_v$). Para os cálculos, utilizaram-se os pares de tensão confinante (σ_3) e tensão desvio ($\sigma_d = \sigma_1 - \sigma_3$).

Destaca-se que a ausência de tensão confinante tende a resultar em menores valores de módulo resiliente. Esse aspecto é relevante, visto que o desempenho do solo-polímero apresenta forte dependência da presença dessa tensão, especialmente em camadas inferiores do pavimento.

Antes da determinação do módulo, realiza-se a etapa de condicionamento, na qual são aplicados três pares de tensões de confinamento e desvio, sendo cada par submetido a 500 ciclos de tensão desvio. Conforme estabelece a DNIT 134 (2018), essa etapa é essencial para a eliminação da deformação permanente que tende a ocorrer nas primeiras aplicações de carga.

Na fase de condicionamento é dito ciclo de acomodação (aplica-se o valor de 103,4 kPa para ambas as tensões confinante e desvio) e aplica-se um total de 500 aplicações. Seguem-se, então, 15 ciclos, cada um com 100 repetições.

O equipamento Triaxial Cíclico utilizado encontra-se no Laboratório Novos Materiais Geotécnicos da Universidade de Brasília. Ele foi desenvolvido pela empresa Owntech e utiliza ar comprimido para a aplicação de cargas. Consiste basicamente em uma câmara triaxial removível com um dispositivo de carga pneumática. Além disso, no conjunto há o aquisitor de

dados digital o qual coleta os dados dos LVDTs internos à câmara de confinamento (os quais medem as deformações axiais), os dados da célula de carga a qual é responsável para medição da tensão normal vertical e dados referentes à tensão normal horizontal aplicada no interior da câmara de confinamento. Na Figura 3.13 mostra-se o equipamento e seus acessórios.

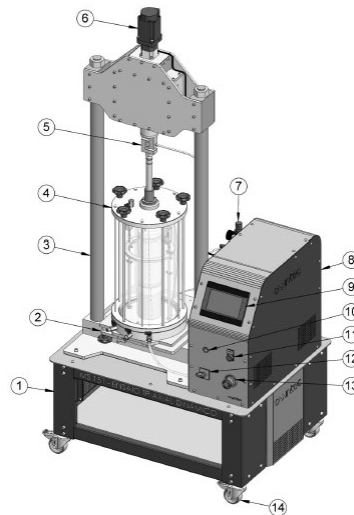


Figura 3.13. Equipamento MS151 da Owntech (Owntech, 2018)

Em que, 1 – Bancada; 2 – Trilho de alinhamento câmara; 3 – Prensa; 4 – Câmara triaxial; 5 – Célula de carga; 6 – Servo motor; 7 – Filtro regulador de pressão; 8 – Totem de controle; 9 – IHM – interface de controle e monitoramento; 10 – Conector USB; 11 – Botão de reset; 12 – Chave geral de energização; 13 – Botão de emergência;

Para a determinação do módulo de resiliência (MR) dos compósitos, foram moldados três corpos de prova. Por se tratar de um ensaio não destrutivo, os mesmos corpos de prova foram ser reutilizados em cada tempo de cura.

Durante o ensaio, os corpos de prova foram envolvidos por membrana de látex e posicionados na base do equipamento. Dois transdutores de deslocamento linear (LVDTs), com capacidade de medição de deformações de até 20 mm, foram instalados internamente à câmara, fixados na parte superior do cabeçote por meio de suporte próprio. Esses sensores registraram as deformações axiais a cada ciclo de carregamento.

O equipamento disponível no laboratório comporta corpos de prova com dimensões de 20×10 cm. A Figura 3.14 apresenta o QR code que direciona para o vídeo que mostra como foi realizada a montagem do ensaio triaxial de cargas repetidas.



Figura 3.14. QR CODE do vídeo que demonstra a montagem do ensaio de obtenção do Módulo de Resiliência.

O ensaio com o material puro, solo do Jalapão, foi realizado adicionando o teor de umidade ótima referente ao ensaio de compactação na energia intermediária. A moldagem se deu diretamente na base do equipamento triaxial dinâmico, sendo necessária a aplicação de pressão de sucção na membrana, com uso de um molde tripartido.

Na presente pesquisa, adotou-se como modelo principal o proposto por Svenson (1980), denominado modelo universal, por considerar simultaneamente os efeitos da tensão confinante (σ_3) e da tensão desvio (σ_d) sobre o módulo de resiliência (MR). Essa formulação foi escolhida por apresentar melhor capacidade de representar o comportamento de materiais arenosos tratados com polímeros, nos quais coexistem mecanismos de atrito intergranular e coesão aparente.

Os ajustes dos modelos potenciais simples foram realizados no Microsoft Excel, utilizando a ferramenta de tendência do tipo potência para obtenção dos coeficientes k_1 , k_2 . Já para o modelo universal, foi empregado o software Labfit, que permitiu a representação tridimensional da superfície do módulo de resiliência em função das tensões, facilitando a visualização e a interpretação integrada dos resultados experimentais.

3.2.5. DETERMINAÇÃO DA SUCCÃO TOTAL

Realizou-se a avaliação das cargas de sucção por meio do ensaio de psicrômetro (WP4C), que determina a sucção total conforme a norma ASTM D6836 (2016). A determinação fundamenta-se na lei psicrométrica, segundo a qual a sucção da água do solo em equilíbrio com o ambiente está termodinamicamente associada à umidade relativa do ar (Fredlund & Rahardjo, 1993). O equipamento registra valores de sucção total na faixa de 0 a 300 MPa, sendo que maiores valores correspondem a menores teores de umidade. O WP4C e seus acessórios encontram-se representados na Figura 3.15.

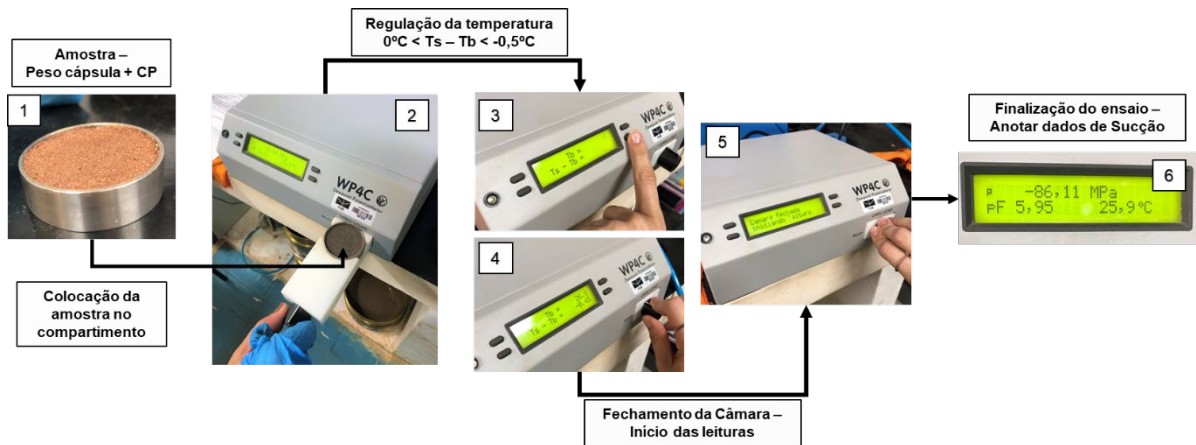


Figura 3.15. Materiais e métodos utilizados para determinação da sucção total.

A determinação da sucção total foi realizada utilizando o equipamento WP4C Dewpoint Potential Meter (Decagon Devices, EUA), que opera pelo princípio do ponto de orvalho para estimar o potencial total de água em amostras de solo. O método é baseado na medição da pressão de vapor de equilíbrio entre a amostra e o ar em uma câmara selada, a partir da qual é determinado o potencial hídrico (ψ) expresso em megapascal (MPa). Essa medida reflete a energia livre da água no solo, englobando as componentes matricial e osmótica do potencial total (Brown & Bartos, 2023).

Para a avaliação da sucção total no equipamento WP4C, foram confeccionadas amostras cilíndricas com as dimensões de 1 cm de altura e com 2 cm de diâmetro. As amostras para esse ensaio foram moldadas, controlando o par de umidade ótima e massa específica seca, e extraídas para o processo de cura. Tanto os equipamentos para a moldagem quanto o corpo de prova final estão representados na Figura 3.16.

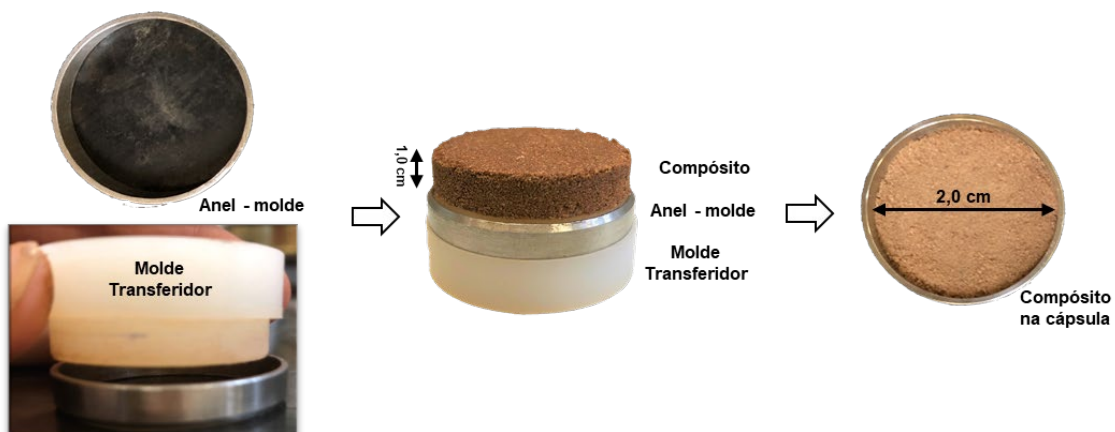


Figura 3.16. Método de moldagem para análise da sucção total.

As leituras foram realizadas em dois momentos diários: uma pela manhã, por volta das 9h, e outra no período noturno, por volta das 18h. Para verificar se havia diferença devido a umidade relativa do ar ter uma alteração significativa entre os horários, contudo como a amostra entra em equilíbrio não foi verificada nenhuma mudança no microambiente avaliado.

Todas as amostras foram monitoradas nessas condições. O objetivo do ensaio não foi a obtenção da curva característica de sucção do material, mas sim a avaliação da evolução da sucção ao longo do tempo, em função do processo de cura do compósito.

3.2.6. DIFRAÇÃO DE RAIOS–X (DRX)

A difração de raios X (DRX) foi realizada no Laboratório de Difractometria de Raios X do Instituto de Geociências da Universidade de Brasília (IG/UnB), utilizando-se o equipamento *X-Ray Diffractometer Ultima IV*, da marca Rigaku. O ensaio possibilita a identificação mineralógica por meio da caracterização da estrutura cristalina do material. Para sua execução, foram utilizadas as frações de solo passantes na peneira #200, abrangendo todas as amostras analisadas.

As amostras foram analisadas com radiação $\text{CuK}\alpha$ ($\lambda = 1,5406 \text{ \AA}$), varredura entre 5° e 60° (2θ) e passo de $0,02^\circ$, utilizando o software Match! (Crystal Impact, 2025) e o banco de dados COD (Crystallography Open Database) para identificação qualitativa das fases minerais.

No caso específico da bentonita pura, devido às suas características granulométricas e mineralógicas, o ensaio foi conduzido em duas etapas complementares: (i) análise glicolada, com tratamento da amostra em etilenoglicol, e (ii) análise após aquecimento, visando confirmar a presença e o comportamento expansivo das esmectitas.

3.2.7. ESPECTROMETRIA DE EMISSÃO ÓPTICA POR PLASMA ACOPLADO INDUTIVAMENTE (ICP-OES)

A análise química foi realizada por meio da técnica de Espectrometria de Emissão Óptica por Plasma Acoplado Indutivamente (ICP-OES, *Inductively Coupled Plasma – Optical Emission Spectrometry*). Trata-se de uma técnica instrumental robusta, amplamente empregada na determinação multielementar, que combina alta sensibilidade, ampla faixa dinâmica e reduzidas interferências químicas. Seu princípio fundamenta-se na introdução da amostra,

previamente preparada em solução, em um plasma de argônio a elevadas temperaturas, onde os elementos são excitados e emitem radiação em comprimentos de onda específicos. Essa radiação é então detectada por espectrômetros ópticos, possibilitando a identificação e quantificação simultânea de diversos elementos em diferentes níveis de concentração (Zhou *et al.*, 2023; Khan *et al.*, 2022).

A aplicação do ICP-OES teve como finalidade a caracterização química dos solos e compósitos analisados, abrangendo tanto os óxidos majoritários quanto elementos-traço. Esses resultados permitem estabelecer correlações entre a composição química e o desempenho mecânico e microestrutural dos materiais.

3.2.8. MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV)

Os microscópios eletrônicos de varredura (MEV) utiliza feixes de elétrons ao invés de fótons, que os microscópios óticos convencionais utilizam. As amostras a serem analisadas são de pequeno diâmetro e são submetidas ao vácuo. O MEV fornece rapidamente informações da morfologia e identificação de elementos químicos de uma amostra, sendo um dos instrumentos mais versáteis para análises de características microestruturais de objetos sólidos. Outra vantagem, são as características tridimensionais que as imagens das amostras possuem (Dedavid *et al.*, 2007).

O MEV utilizado se encontra no Instituto de Geociências no laboratório de micropaleontologia da UnB. O equipamento consiste em um Microscópio Eletrônico de Varredura JEOL JSM 7100F com voltagem de aceleração de 30 KV, resolução de 3nm, aumento até 300.000 X com sistema de microanálise de raios-X EDS.

Anteriormente à etapa de microscopia, as amostras de solo foram submetidas ao processo de metalização por evaporação de alto vácuo. Este procedimento resulta na deposição de uma cobertura ultrafina de material eletricamente condutivo sobre as amostras, neste caso foi usado o ouro (Figura 3.17).



Figura 3.17. Amostras metalizadas.

3.2.9. MICROTOMOGRAFIA DE RAIOS X (μ CT)

A microtomografia computadorizada de raios X (μ CT) foi utilizada para obtenção de imagens tridimensionais não destrutivas das amostras, permitindo caracterizar a distribuição interna de vazios e a organização microestrutural após a cura. As tomografias foram realizadas em um microscópio de raios X Xradia 510 VERSA (Zeiss), equipado com fonte microfocal de alta estabilidade.

As amostras foram posicionadas no suporte rotacional do equipamento e submetidas a varredura completa de 360° , com aquisição de 1601 projeções por tomografia. Utilizaram-se tensões de 80 kV e potência de 7 W para os compósitos com polímero, e 70 kV e 6 W para a amostra de referência contendo apenas bentonita e água. Todas as aquisições foram realizadas com lente macro 0.4X. O tempo de exposição variou entre 1,4 e 2,2 s de acordo com a densidade e capacidade de atenuação de cada material, resultando em tempos totais de varredura entre 1h20min e 1h45min. As reconstruções volumétricas foram geradas com tamanho de pixel de $10 \mu\text{m}$.

As projeções obtidas foram reconstruídas por algoritmo de feixe cônico, gerando volumes tridimensionais posteriormente submetidos a filtragem para redução de ruído. A segmentação foi realizada por limiarização, permitindo distinguir a fase sólida e os vazios internos. As imagens reconstruídas foram utilizadas exclusivamente para caracterização microestrutural e posterior integração às análises físicas e mecânicas realizadas nos capítulos seguintes.

3.2.10. DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS CHAVE

O estudo da dosagem teve como objetivo avaliar a influência do teor de polímero e da porosidade do solo arenoso sobre a resistência à compressão simples (RCS), além de investigar a relação porosidade/teor volumétrico de polímero (V_v/Piv) como parâmetro preditivo da resistência dos compósitos. Essa abordagem segue a proposta de Alelvan (2022), fundamentada nos trabalhos de Consoli *et al.* (2007, 2011, 2014), que demonstraram a aplicabilidade da razão V_v/Piv para materiais estabilizados.

Nesse contexto, V_v corresponde ao volume absoluto de vazios (água + ar), enquanto Piv representa o volume absoluto do polímero incorporado. A análise dos dados buscou identificar a melhor forma de ajuste matemático e de correlação entre esses parâmetros e os valores de resistência obtidos.

Definiu-se que a aplicação do método de dosagem seria avaliada após 30 dias de cura, de modo a considerar o estágio em que as ligações poliméricas já estivessem mais consolidadas. As variáveis aplicadas para o estudo dos parâmetros-chave estão apresentadas na Figura 3.18

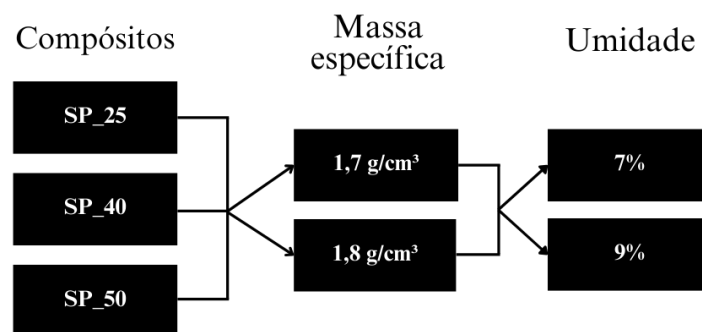


Figura 3.18. Informações utilizadas para os parâmetros chave.

A escolha dos pares de umidade e massa específica seca utilizados na análise decorreu da avaliação das curvas de compactação. Conforme ilustrado na Figura 3.19, adotaram-se as umidades de 7% e 9%, representativas, respectivamente, do ramo seco e do ramo úmido da curva. Essa decisão possibilitou avaliar o comportamento do compósito em condições contrastantes de moldagem. Além disso, as massas específicas secas foram definidas em valores inteiros (1,7 e 1,8 g/cm³), de modo a facilitar a reprodução experimental e assegurar comparabilidade entre os diferentes teores de polímero.

Ressalta-se que o estudo de dosagem foi realizado exclusivamente para os compósitos arenosos, não sendo aplicado aos compósitos bentoníticos. Essa decisão deve-se às

características expansivas da bentonita em presença de água, que poderiam comprometer a aplicação do método baseado na relação V_v/P_{iv} , além de dificultar a obtenção de parâmetros consistentes de compactação e cura.

RESULTADOS E DISCUSSÕES: SOLO ARENOSO E COMPÓSITO AREIA-POLÍMERO

Este capítulo apresenta os resultados obtidos para o solo arenoso natural e para os compósitos formados com a adição da solução polimérica. Foram realizados ensaios de caracterização física, química, mineralógica e microestrutural, além de ensaios mecânicos de compactação, resistência à compressão não confinada, cisalhamento direto, módulo de resiliência e sucção.

A discussão dos resultados tem por objetivo avaliar os efeitos da estabilização polimérica sobre o comportamento do solo, considerando as variações nas propriedades físicas, mecânicas e estruturais. A análise conjunta das diferentes etapas experimentais permite compreender o papel do polímero como agente de ligação física e seu impacto na rigidez, coesão e estabilidade do solo arenoso.

4.1. COMPACTAÇÃO

A Figura 4.1 apresenta as curvas de compactação do solo arenoso natural e dos compósitos preparados com diferentes teores de solução polimérica (2,5%, 4% e 5%). Os valores correspondentes de massa específica seca máxima ($\gamma_{d,max}$) e umidade ótima (wot) estão resumidos na Tabela 4.1. As curvas de compactação do solo arenoso e dos compósitos SP25 e SP50 foram obtidos por Silva (2020) e estão representados juntamente com os dados obtidos por essa pesquisa.

Tabela 4.1. Massa Específica seca máxima e umidade ótima dos compósitos arenosos e solo arenoso. (Adaptado – Silva, 2020).

Material	$\gamma_{d,max}$ (g/cm ³)	wot (%)
Areia	1,78	9,5
SP25	1,80	8,8
SP40	1,83	8,1
SP50	1,84	8,0

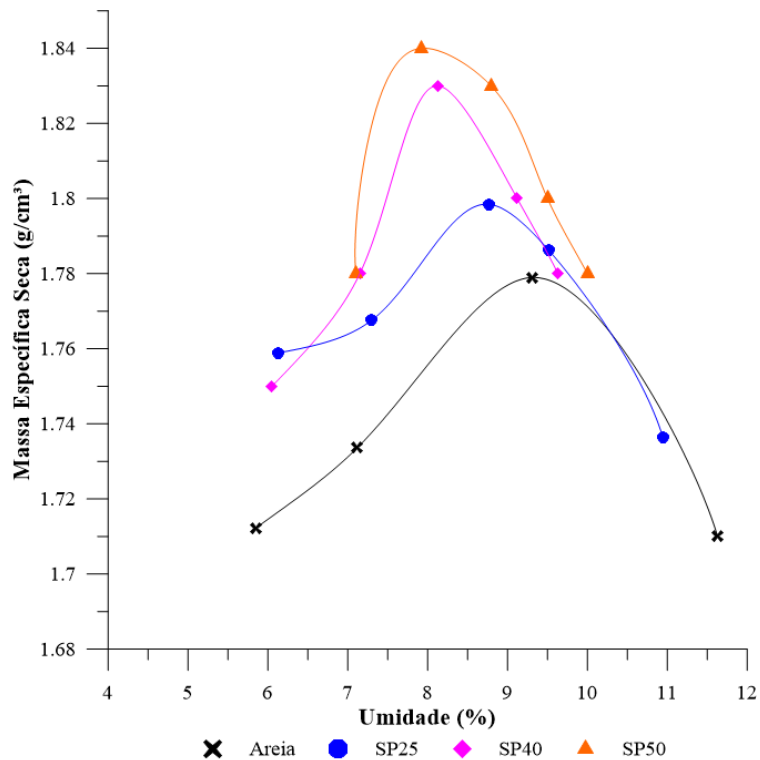


Figura 4.1. Curvas de compactação com energia normal, solo e compósitos (Adaptado – Silva, 2020).

Com a adição do polímero, nota-se uma elevação progressiva da $\gamma_{d,max}$, mais acentuada para os teores de 4% e 5%, que apresentaram valores próximos entre si, evidenciando a capacidade do polímero de promover maior união entre os grãos e reduzir o volume de vazios. Esse efeito também se manifesta na alteração do formato das curvas: enquanto a curva do compósito com 2,5% mostra-se mais suavizada e aberta, as curvas de 4% e 5% apresentam picos mais definidos, indicando maior ganho de densificação.

Quanto à umidade ótima, observa-se que as diferenças entre as misturas não são tão marcantes, mantendo-se em uma faixa próxima, o que indica que a principal contribuição do polímero está associada ao aumento da densidade seca obtida, e não à modificação significativa da umidade necessária para a compactação. Ainda assim, destaca-se que a adição da solução polimérica contribui para uma melhor umectação e dispersão dos grãos, favorecendo o contato e a formação de ligações que resultam em maiores densidades secas.

De modo geral, a análise das curvas demonstra que o polímero induziu um comportamento mais coesivo ao solo arenoso, tradicionalmente classificado como granular e pouco plástico.

4.2. ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO NÃO CONFINADA

Na Figura 4.2 apresenta as curvas de tensão–deformação obtidas no ensaio de resistência à compressão simples (RCS) para o compósito SP40, avaliado nos tempos de cura de 2, 7, 15 e 30 dias.

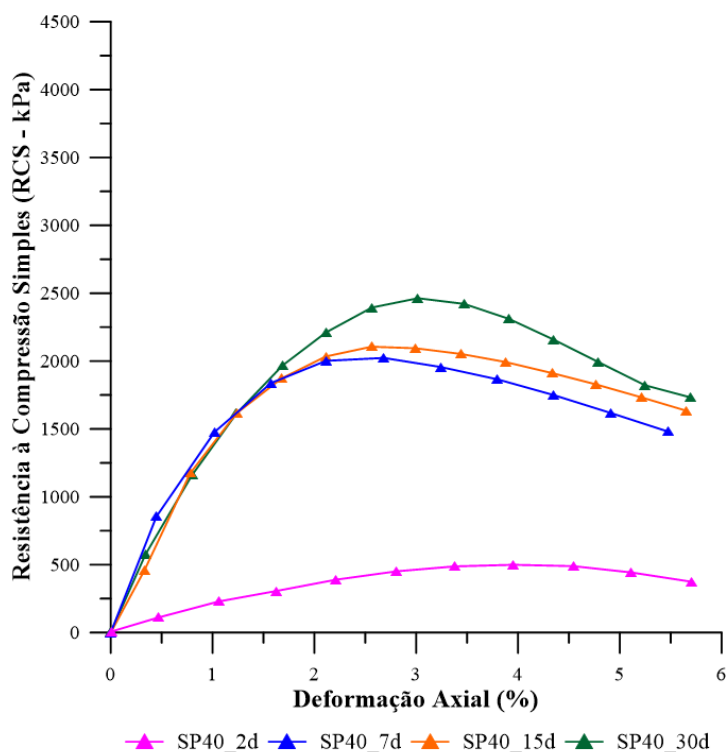


Figura 4.2. Curvas de tensão–deformação obtidas no ensaio de resistência à compressão simples (RCS) para o compósito SP40

A Tabela 4.2 compila o valor de Resistência à Compressão Simples (RCS) de cada dia de cura para o compósito SP40.

Tabela 4.2. Resultados de RCS para 4% de polímero em diferentes tempos de cura.

Valores referentes ao pico	RCS (kPa)	RCS (MPa)
SP40 (2° Dia)	499,63	0,50
SP40 (7° Dia)	2030,15	2,03
SP40 (15° Dia)	2125,86	2,12
SP40 (30° Dia)	2463,17	2,46

Nota-se que, já aos 2 dias de cura, o material apresentou uma resistência inicial próxima de 500 kPa, mas com elevada deformabilidade e ruptura precoce, comportamento associado à formação inicial das ligações poliméricas entre as partículas.

Com 7 dias de cura, houve um ganho expressivo de resistência, atingindo valores em torno de 2.000 kPa, além de maior rigidez inicial, evidenciada pela inclinação mais acentuada da curva. O material, nesse estágio, apresentou comportamento mais coesivo, com capacidade de suportar maiores tensões antes da ruptura.

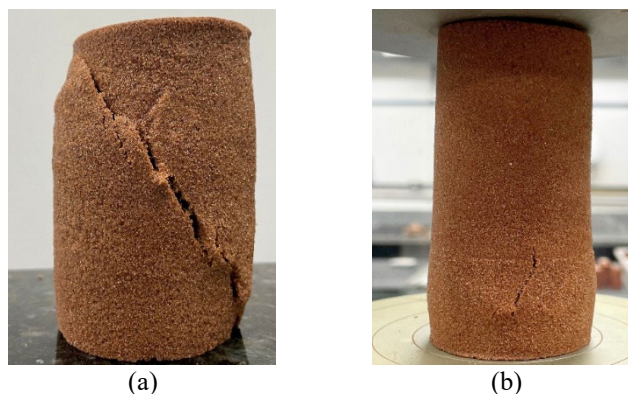
Aos 15 dias de cura, a resistência máxima aumentou ligeiramente em relação ao 7º dia (cerca de 2.100 kPa), observa-se estabilização na forma da curva com inclinação inicial similar, mas verifica-se deslocamento do ponto de ruptura aumento da resistência e evolução microestrutural.

O resultado mais expressivo foi obtido aos 30 dias de cura, quando a resistência atingiu valores próximos a 2.500 kPa, cerca de 12 vezes superior ao valor inicial de 2 dias de cura. A curva também apresentou maior rigidez e menor deformabilidade, evidenciando a consolidação das ligações poliméricas ao longo do tempo de cura.

De modo geral, verifica-se que a evolução da resistência não foi linear: houve crescimento acentuado entre 2 e 7 dias, estabilização relativa entre 7 e 15 dias, e novo incremento aos 30 dias. Esse comportamento confirma que a estabilização polimérica continua em desenvolvimento mesmo após duas semanas, tornando o compósito mais resistente e rígido.

Esses resultados reforçam que, para uma mesma condição de moldagem (umidade, densidade e teor de polímero), o tempo de cura é o principal fator de controle da resistência mecânica, aspecto fundamental para definir o desempenho do compósito em campo.

Na Figura 4.3 mostram-se os corpos de prova após o ensaio de compressão simples, para as amostras SP40, com 2, 7, 15 e 30 dias de curas, respectivamente.



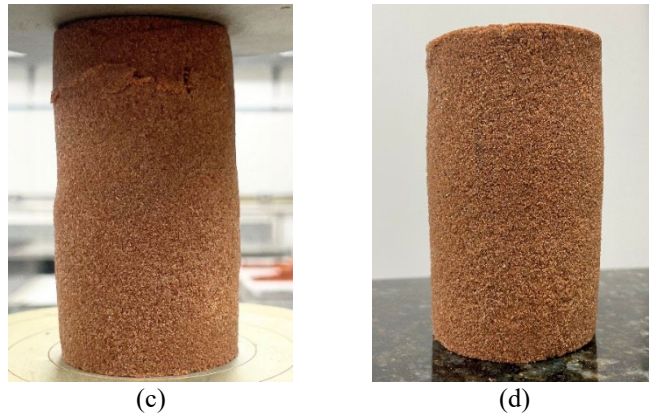


Figura 4.3. (a) SP40 (2 dias de cura) após ruptura; (b) SP40 (7 dias de cura) após ruptura; (c) SP40 (15 dias de cura) após ruptura; (d) SP40 (30 dias de cura) após ruptura;

A análise conjunta das curvas tensão–deformação (Figura 4.2) e das imagens dos corpos de prova após ruptura (Figura 4.3) permite observar a evolução do comportamento mecânico do compósito SP40 ao longo do tempo de cura.

No 2º dia de cura (Figura 4.3a), o corpo de prova apresentou fissura longitudinal bem definida, associada à baixa resistência (~ 500 kPa) e elevada deformabilidade observada na curva. Esse comportamento reflete a baixa coesão inicial do material, em que o polímero ainda não havia formado ligações efetivas entre as partículas.

Aos 7 dias de cura (Figura 4.3b), o corpo de prova apresentou deformação distribuída, com ruptura menos marcada e sem fissura contínua evidente. Esse padrão está de acordo com a curva que atingiu cerca de 2.000 kPa, mostrando maior rigidez e comportamento mais coesivo em comparação aos estágios iniciais.

No 15º dia de cura (Figura 4.3c), observa-se deformação lateral pronunciada e fissuração localizada, associada ao ganho de resistência (~ 2.200 kPa) e à maior inclinação da curva tensão–deformação. O resultado mostra que o polímero aumentou a rigidez inicial do compósito e fez com que a ruptura ocorresse de forma mais gradual, evitando colapso abrupto.

Por fim, aos 30 dias de cura (Figura 4.3d), o corpo de prova apresentou aspecto maciço, sem fissuras evidentes mesmo após a ruptura. Esse comportamento visual corresponde à curva mais rígida e resistente, com pico de aproximadamente 2.500 kPa, indicando que as ligações poliméricas se consolidaram, resultando em um material denso, coeso e de elevada resistência mecânica.

Assim, a evolução das imagens pós-ruptura confirma os resultados obtidos nas curvas tensão–deformação, evidenciando a transição de um comportamento frágil e pouco coeso, nos primeiros dias de cura, para um compósito estável, rígido e resistente após 30 dias.

A Figura 4.4 apresenta os resultados de resistência à compressão simples (RCS) para os compósitos SP25 e SP50, obtidos por Silva (2020), em comparação com o compósito SP40, analisado nesta pesquisa. Todos foram moldados em seus respectivos pares de umidade ótima e massa específica seca máxima, avaliados nos tempos de cura de 2, 7, 15 e 30 dias.

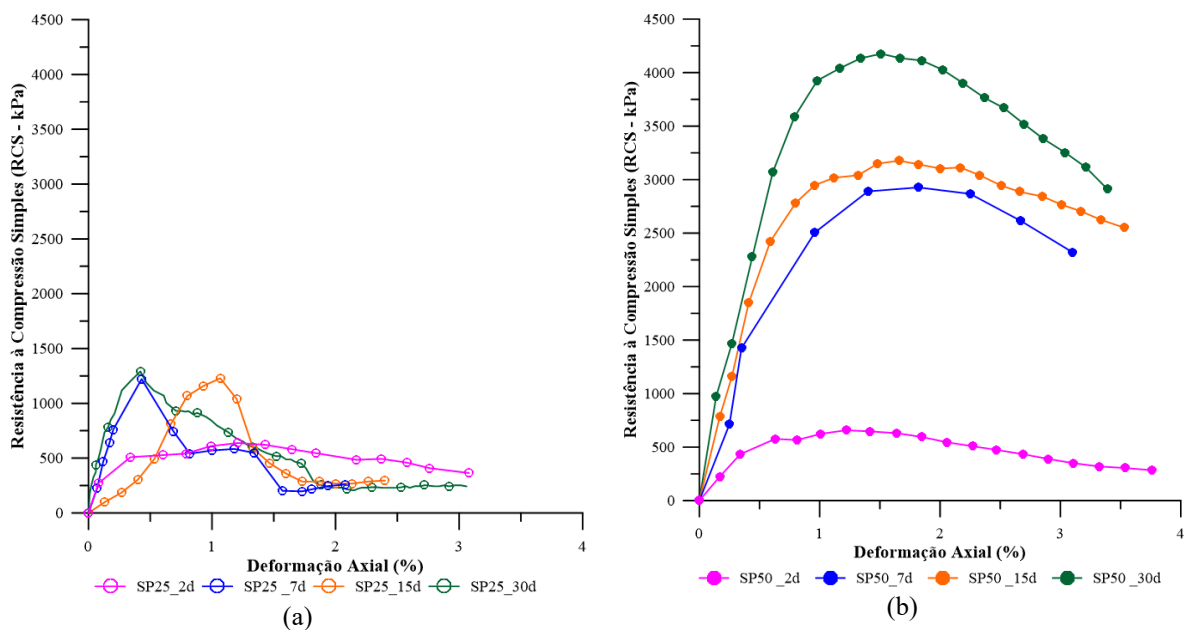


Figura 4.4. Curvas Tensão-Deformação do ensaio de RCS (a) SP25; (b) SP50 (Modificado - Silva, 2020)

De forma geral, observa-se que o teor de polímero influenciou diretamente a resistência e a rigidez dos compósitos. Silva (2020) para SP25 apresentou os menores valores de resistência em todos os tempos de cura, com picos próximos a 1.000 kPa aos 30 dias. As curvas mostraram comportamento mais plástico e com maior deformabilidade, indicando que a quantidade de polímero foi insuficiente para promover ligações coesas mais duráveis.

Já para SP50 Silva (2020) exibiu os maiores valores de RCS, chegando a resistências superiores a 4.000 kPa aos 30 dias, com curvas mais inclinadas e comportamento bastante rígido. O aumento do teor de polímero resultou em maior densificação e maior desenvolvimento das ligações internas, embora também tenha levado a um comportamento mais frágil, com ruptura mais abrupta.

Analisando os resultados de SP40 verifica-se que o compósito apresentou desempenho intermediário, com valores de RCS em torno de 2.500 kPa aos 30 dias. As curvas tensão–

deformação mostram equilíbrio entre resistência e deformabilidade: embora inferiores às do SP50, apresentaram maior ductilidade, com ruptura menos abrupta. Esse comportamento é vantajoso em termos geotécnicos, pois combina ganho de resistência com maior capacidade de acomodação de deformações.

Buscando aprofundar na comparação entre os valores de RCS e dias de cura para cada compósito se obtém o gráfico representado na Figura 4.5.

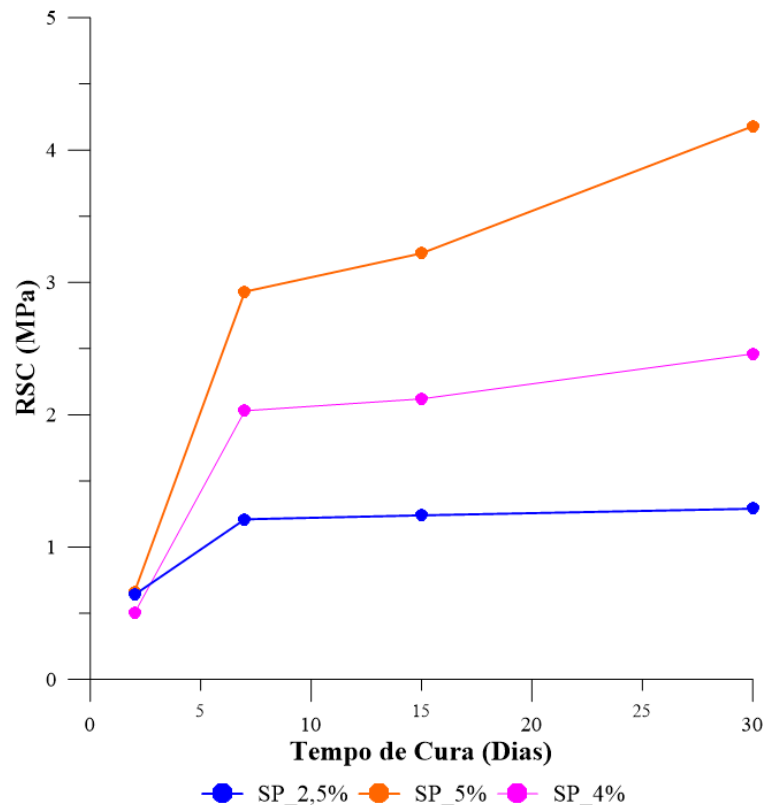


Figura 4.5. Valor RCS (MPa) por tempo de cura para os três teores de polímero.

Observa-se que, independentemente do teor de polímero, ocorre crescimento progressivo da resistência com o aumento do tempo de cura, ainda que em diferentes magnitudes.

Silva (2020) no compósito SP25 apresentou os menores valores de RCS ao longo de todo o período analisado, atingindo pouco mais de 1,3 MPa aos 30 dias. O ganho principal ocorreu entre 2 e 7 dias, seguido de uma tendência de estabilização, indicando que baixos teores de polímero têm efeito limitado na melhoria da resistência.

Já com o SP50, Silva (2020) apresentou os maiores valores de resistência, alcançando cerca de 4,2 MPa aos 30 dias. O ganho inicial foi bastante acentuado, sobretudo entre 2 e 7 dias,

seguido de crescimento gradual até 30 dias. Apesar do alto desempenho, o comportamento sugere maior rigidez e tendência a rupturas mais frágeis, conforme discutido anteriormente.

Considerando os valores de SP40 se observa um desempenho intermediário, com RCS em torno de 0,5 MPa aos 2 dias e aproximadamente 2,4 MPa aos 30 dias. O ganho foi mais consistente ao longo do tempo, sem sinais de estabilização precoce, o que sugere que esse teor favorece um processo contínuo de cura e consolidação do compósito.

Os resultados desta pesquisa para os compósitos solo-polímero demonstraram que o teor de polímero exerce influência direta sobre a evolução da resistência à compressão simples (RCS), com ganhos progressivos ao longo do tempo de cura. O compósito SP25 mostrou desempenho limitado, atingindo apenas 1,3 MPa aos 30 dias, enquanto o SP40 alcançou cerca de 2,4 MPa e o SP50 superou 4,0 MPa no mesmo período.

Quando comparados com parâmetros de referência da literatura e normas técnicas, observa-se que par 7 dias de cura, o SP40 já se enquadra nos intervalos indicados por Millard (1993) (1,5–3,0 MPa para bases sob tráfego leve e 0,75–1,5 MPa para sub-bases) e pela TRRL (ANTT, 2015) (1,7–2,7 MPa), mostrando potencial para aplicação em camadas estruturais de pavimento. Ressalta-se, também, que o valor mínimo de 2,0 MPa exigido pela Força Aérea dos EUA (USDT, 2014) para materiais cimentados também foi atendido pelo SP50 já aos 7 dias e pelo SP40 aos 15 dias de cura.

Em comparação aos resultados reportados por Xuan *et al.* (2012) na África do Sul, que registraram RCS de 0,6 MPa e 1,2 MPa para 28 dias com 4% e 6% de cimento, respectivamente, verifica-se que os compósitos solo-polímero apresentaram desempenho superior, mesmo em tempos de cura menores.

No Brasil, a norma DNIT 143/2010 estabelece RCS mínimo de 2,1 MPa para 7 dias em misturas solo-cimento. Embora o compósito SP40 não tenha atingido esse valor em 7 dias, alcançou-o aos 15 dias, enquanto o SP50 superou o critério desde a primeira semana de cura. Para comparação, o manual de pavimentação do DNIT (2006) recomenda RCS mínimo de 1,7 MPa (7 dias) e 3,4 MPa (28 dias) para solos estabilizados com cal — valores igualmente alcançados ou superados pelos compósitos com maiores teores de polímero.

Contudo, ressalta-se que na norma DNIT o material é submerso por 4 horas antes do ensaio de ruptura, essa pesquisa não realizou essa etapa.

Além disso, é importante mencionar que normas tradicionais de solo-cal e solo-cimento destacam que valores muito elevados de RCS podem tornar a camada excessivamente rígida e suscetível à fissuração, recomendando-se que a resistência não ultrapasse aproximadamente 2,1 MPa para evitar esse comportamento. Nesse contexto, o teor de 4% apresenta-se como uma opção tecnicamente mais equilibrada, pois proporciona ganhos expressivos de resistência sem atingir níveis que possam comprometer a durabilidade da camada por rigidez excessiva.

Portanto, a análise comparativa evidencia que o uso de polímero como estabilizante em solos arenosos apresenta desempenho compatível ou superior a métodos tradicionais de estabilização química (como cal e cimento) em termos de resistência à compressão simples. Ressalta-se, contudo, que a taxa de desenvolvimento da resistência está diretamente relacionada ao teor de polímero e ao tempo de cura, sendo o compósito SP40 o que apresentou equilíbrio mais interessante entre ganho de resistência e ductilidade.

Esses resultados reforçam o potencial do polímero como alternativa sustentável e tecnicamente viável para aplicação em bases e sub-bases de pavimentos, desde que respeitados os critérios de dosagem e tempo de cura necessários para garantir o desempenho esperado.

4.3. ENSAIO DE CISALHAMENTO DIRETO

Na Figura 4.6 apresentam-se as curvas tensão de cisalhamento por deslocamento horizontal para o solo para aplicação das tensões normais de 50 kPa, 100 kPa, 200 kPa e 400 kPa. Nas Figura 4.7 (a-h) são representadas as curvas tensão de cisalhamento por deslocamento horizontal para cada tempo de cura e para aplicação das tensões normais para 4 % de polímero.

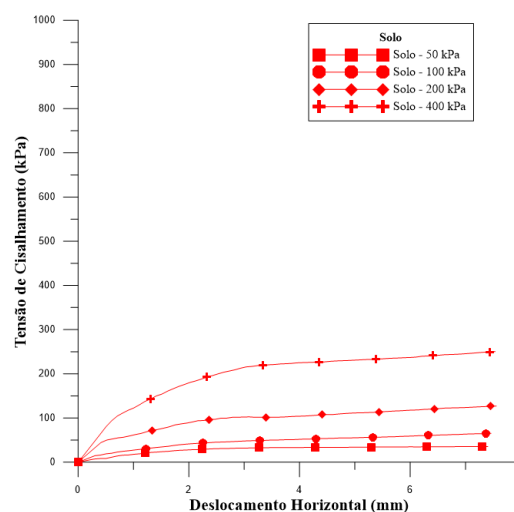
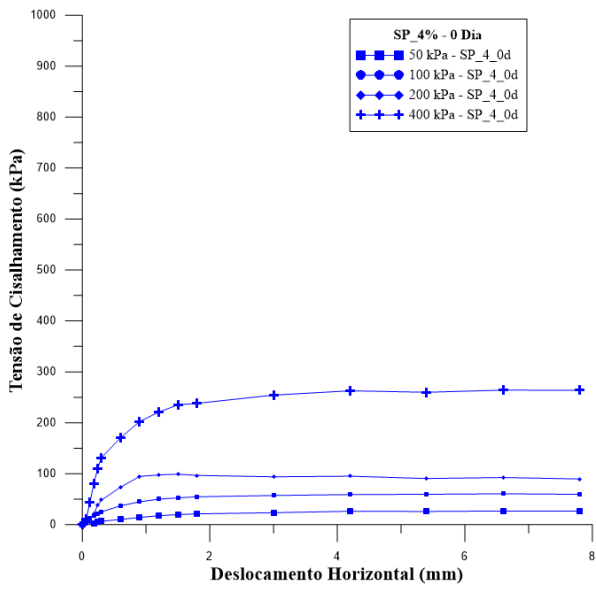
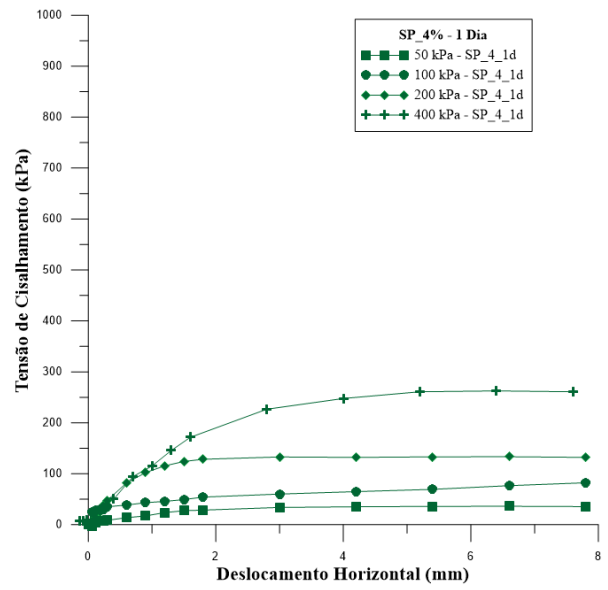


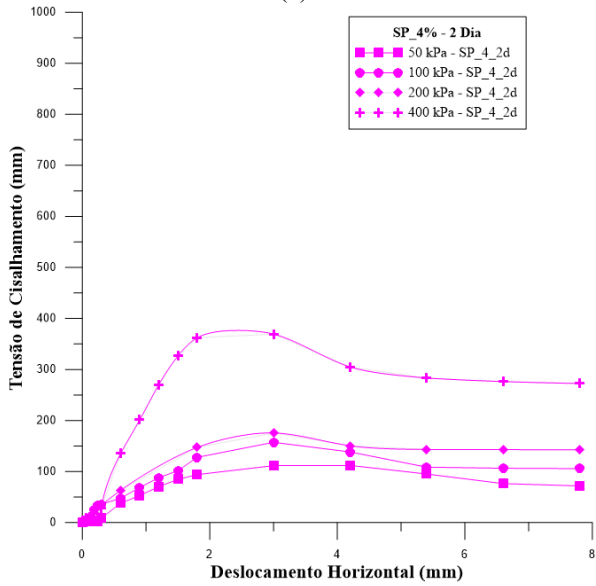
Figura 4.6. Curvas tensão de cisalhamento por deformação horizontal para o solo para tensões normais de 50 kPa, 100 kPa, 200 kPa e 400 kPa. (Adaptado – Silva (2020))



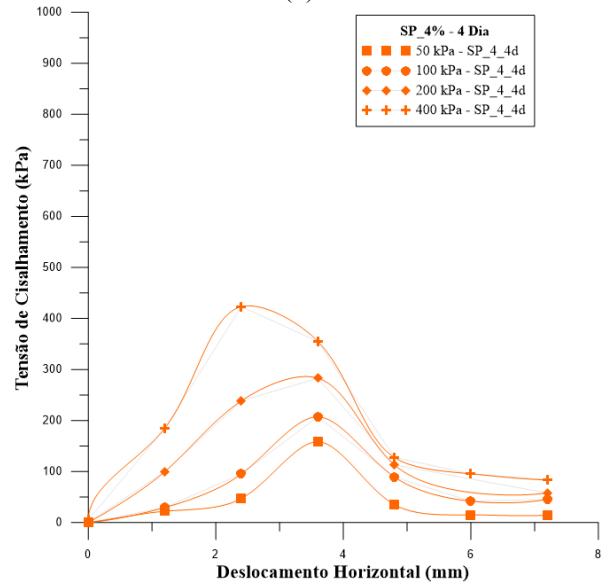
(a)



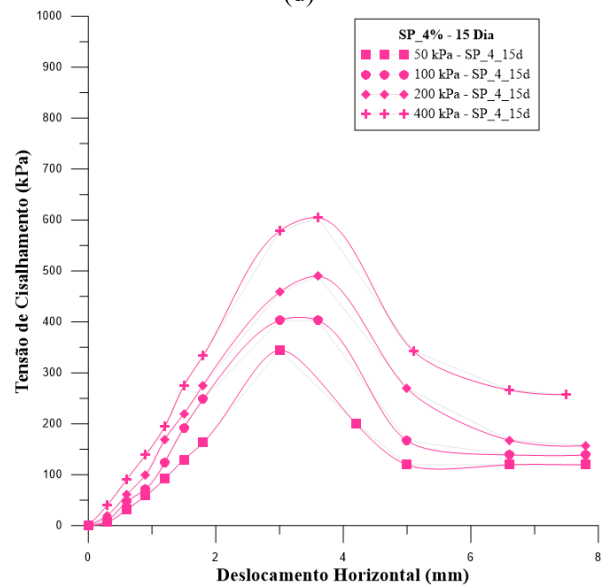
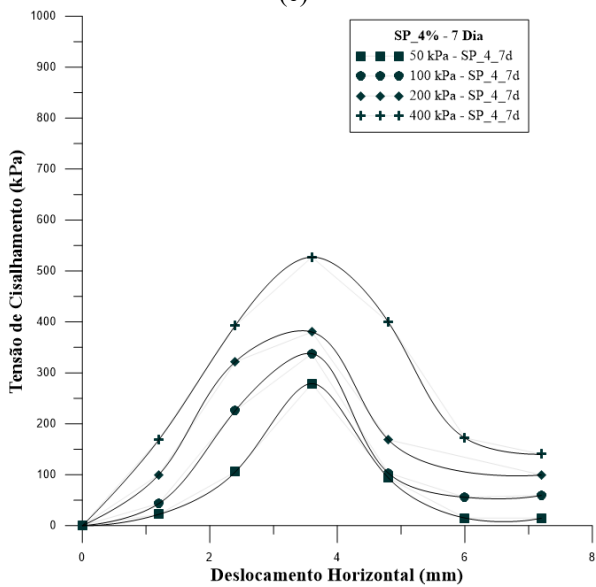
(b)



(c)



(d)



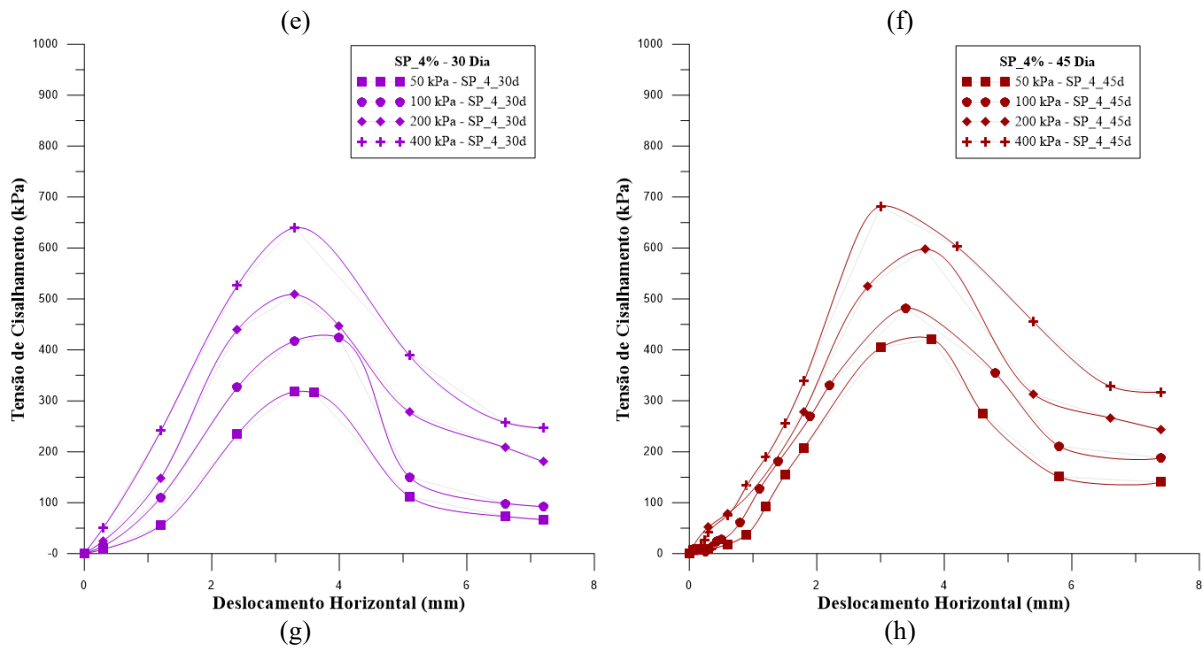


Figura 4.7. Curvas tensão de cisalhamento por deformação horizontal para aplicação das tensões normais de 50 kPa, 100 kPa, 200 kPa e 400 kPa para 4 % de polímero para (a) 0 dia de cura; (b) 1 dia de cura; (c) 2 dias de cura; (d) 4 dias de cura; (e) 7 dias de cura; (f) 15 dias de cura; (g) 30 dias de cura; (h) 45 dias de cura;

As Figura 4.6 e Figura 4.7(a-h) apresentam as curvas de tensão de cisalhamento em função do deslocamento horizontal para o solo arenoso e para o compósito SP40, avaliados nos tempos de cura de 0, 1, 2, 4, 7, 15, 30 e 45 dias. Em todas as condições, observa-se o efeito do incremento da tensão normal, que resulta em maiores valores de tensão cisalhante, confirmando o comportamento esperado do material sob solicitações de cisalhamento direto.

Para o solo arenoso natural, a resposta foi caracterizada por baixos valores de resistência, com curvas rídicas de um solo arenoso com formato linear e ausência de picos bem definidos, o que reforça o caráter não coesivo e a predominância do atrito interno como mecanismo de resistência.

No caso do compósito SP40, a evolução do tempo de cura modificou de forma significativa o formato das curvas. Para os primeiros dias (0 e 1 dia) nota-se pouca deformação e rápida estabilização dos valores de tensão cisalhante. A partir de 2 dias, as curvas começam a apresentar picos mais evidentes, principalmente para maiores tensões normais. Esse efeito é intensificado aos 4 e 7 dias, quando se verifica a formação clara de máximos de resistência, seguidos de redução da tensão, indicando ruptura mais típica de materiais cimentados.

Com 15 dias de cura, a resistência alcança valores superiores, e as curvas exibem maiores diferenças nos picos, evidenciando a contribuição do polímero para a coesão do

sistema. Aos 30 e 45 dias, nota-se não apenas o aumento dos valores de pico, mas também maior definição do pós-pico, caracterizado pela queda da tensão cisalhante após a deformação máxima. Esse comportamento revela o avanço do processo de ligação proporcionado pelo polímero, que confere ao compósito características de material coesivo e mais rígido, distinguindo-o do solo natural.

Verifica-se que após a ruptura os compósitos perdem capacidade de suporte, apesar de ficar acima dos valores do solo, devido à alta resistência adquirida na estabilização polimérica. Uma forma de reduzir essa queda é o incremento de fibras nas matrizes dos compósitos.

Assim, as curvas obtidas indicam que o ganho de resistência não ocorre de forma linear, mas depende fortemente do tempo de cura, evidenciando o papel do polímero como agente estabilizante capaz de modificar o mecanismo de ruptura e conferir maior coesão ao compósito arenoso.

Na Figura 4.8 mostram-se as envoltórias de ruptura dos compósitos com diferentes tempos de cura para 4% de polímero.

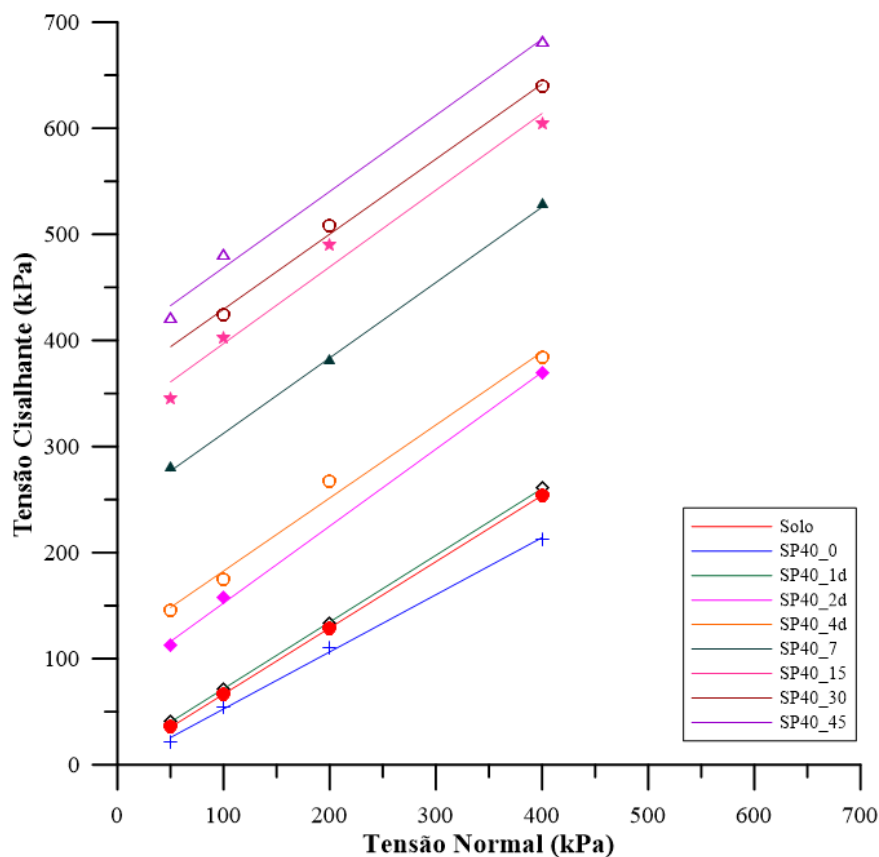


Figura 4.8. Envoltória de Ruptura para SP40.

Na Tabela 4.3 são apresentados os valores de ângulo de atrito efetivo e intercepto coesivo de cada tempo para o compósito SP40. Ressalta-se que para solo arenoso natural, observa-se um comportamento típico de material granular, com baixa coesão e resistência predominantemente associada ao atrito interno.

Tabela 4.3. Valores do intercepto coesivo e ângulo de atrito para SP40.

Material	c' (kPa)	Φ' (°)
Solo	4,05	31,9
SP40 (0° Dia)	0,00	27,9
SP40 (1° Dia)	8,79	29,3
SP40 (2° Dia)	79,91	35,9
SP40 (4° Dia)	137,02	35,6
SP40 (7° Dia)	241,36	35,5
SP40 (15° Dia)	324,78	35,0
SP40 (30° Dia)	358,65	35,0
SP40 (45° Dia)	396,95	35,5

No caso do compósito SP40, observa-se que no tempo inicial (0 dia) o material apresentou ausência de coesão e redução do ângulo de atrito ($\varphi' = 27,9^\circ$), resultado explicado pela condição de elevada umidade e pela ausência de desenvolvimento significativo das ligações poliméricas, fato igualmente evidenciado nas observações visuais dos corpos de prova. Após 1 dia de cura, verifica-se o surgimento de coesão ($c' \approx 8,8$ kPa), ainda modesta, e discreto aumento do ângulo de atrito ($\varphi' = 29,3^\circ$).

De forma semelhante para os compósitos SP25 e SP50 no 1º dia de cura, o compósito SP40 apresentou endurecimento superficial já nesse estágio inicial, enquanto a região interna permanecia úmida. A evolução da cura, que se processa de fora para dentro em razão do contato direto com o ar, explica os valores de ângulo de atrito ainda inferiores aos do solo natural. Na Figura 4.9 apresenta-se um dos corpos de prova após o ensaio, evidenciando esse comportamento.

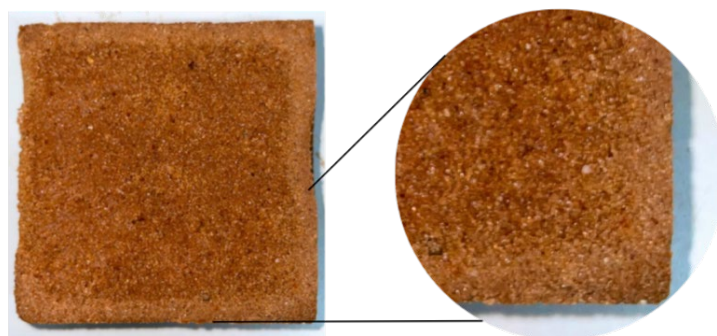


Figura 4.9. SP25 1 dia de cura, interior úmido e capinha seca.

A partir do 2º dia de cura, observa-se uma mudança marcante no comportamento do compósito SP40. O intercepto coesivo aumenta significativamente para $c' \approx 79,9$ kPa, enquanto o ângulo de atrito atinge $\varphi' = 35,9^\circ$, superando inclusive o valor obtido para o solo natural. Esse ganho de resistência está diretamente associado ao avanço da cura para o interior do corpo de prova, favorecendo a fixação do polímero aos grãos e o início da formação de uma estrutura mais cimentada.

Nesse estágio, a rigidez da porção interna do material torna-se mais evidente, ainda que o processo de cura não esteja completo. Na Figura 4.10 está registrado um corpo de prova com dois dias de cura após o ensaio, no qual se observa, no centro da amostra, uma região mais escura em relação às bordas. Esse núcleo úmido contrasta com a parte externa mais seca, evidenciando a progressão do processo de secagem e o caráter gradual da cura de fora para dentro.

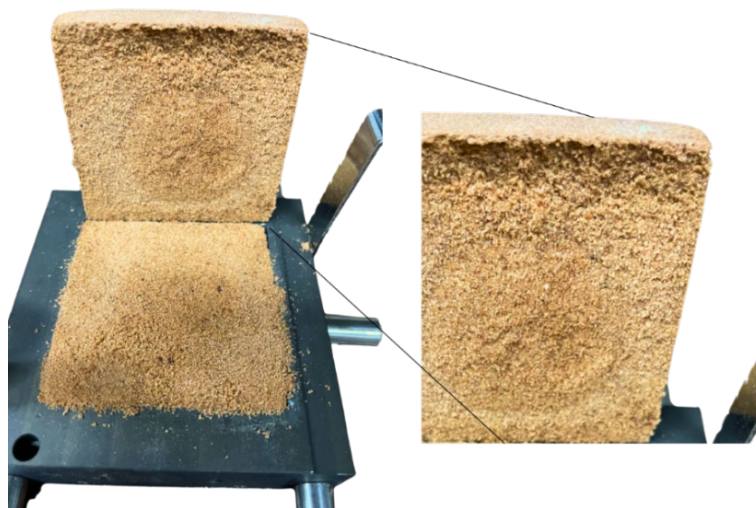


Figura 4.10. SP40 2 dias de cura, após ruptura.

Aos 4 dias de cura, já se evidenciam picos de resistência para todas as tensões normais aplicadas, confirmando que o processo de cura é fundamental para o ganho progressivo de resistência. Nesse estágio, o intercepto coesivo alcança $c' \approx 137,0$ kPa, enquanto o ângulo de atrito se mantém em $\varphi' = 35,6^\circ$. Observa-se que, após a ruptura, não há mais presença de zonas úmidas no interior dos corpos de prova, indicando que a cura já se estendeu de forma mais uniforme por toda a amostra.

Com 7 dias de cura, os parâmetros de resistência continuam em ascensão: a coesão atinge $c' \approx 241,4$ kPa e o ângulo de atrito mantém-se praticamente constante ($\varphi' = 35,5^\circ$). Na Figura 4.11 é possível ver um corpo de prova ensaiado nesse tempo de cura, cuja superfície

evidencia maior rigidez e homogeneidade, com menor presença de partículas soltas. A ruptura assume forma semelhante à dos corpos de prova com maior tempo de cura, sugerindo que o comportamento mecânico tende a se estabilizar.



Figura 4.11. SP25 7 dias de dia, após ruptura.

Aos 15 dias de cura, verifica-se continuidade no aumento da coesão ($c' \approx 324,8$ kPa), enquanto o ângulo de atrito estabiliza-se em $\phi' = 35,0^\circ$. Esse equilíbrio confirma que o polímero atua predominantemente na cimentação das partículas, elevando a coesão, ao passo que o atrito interno passa a sofrer pouca influência adicional com o avanço da cura.

Para 30 dias de cura, os resultados mostram $c' \approx 358,7$ kPa e $\phi' = 35,0^\circ$, mantendo a tendência observada, com ligeiro incremento da coesão e constância do ângulo de atrito.

Finalmente, aos 45 dias de cura, o intercepto coesivo atinge seu valor máximo dentro do intervalo estudado ($c' \approx 397,0$ kPa), enquanto o ângulo de atrito permanece estável em $\phi' = 35,5^\circ$. Na Figura 4.12(a-b) está representado um corpo de prova com esse tempo de cura, cuja aparência e forma de ruptura se assemelham às amostras de 7 dias, confirmando a maturidade do processo de cura.



(a)



(b)

Figura 4.12. SP40 com 45 dias de cura, após ruptura

De modo geral, o aumento do tempo de cura resultou em maior coesão e redução da quantidade de partículas soltas na superfície dos corpos de prova. A diferença de coloração entre as regiões externas e internas, observada em diversos estágios, reforça que a cura ocorre de fora para dentro, devido ao contato direto com o ar. Assim, a elevação da coesão explica a estabilidade do ângulo de atrito, uma vez que, por se tratar de um solo com menos de 12% de finos, o parâmetro que rege seu comportamento é o atrito interno. Nesse contexto, a ação do polímero atua sobretudo na cimentação dos grãos, conferindo o incremento progressivo de coesão identificado ao longo do tempo de cura

Na Figura 4.13 apresentam-se as curvas de tensão x deslocamento horizontal para os compósitos SP_2,5, SP40 e SP50 com 45 dias de cura e para o solo sem melhoramento.

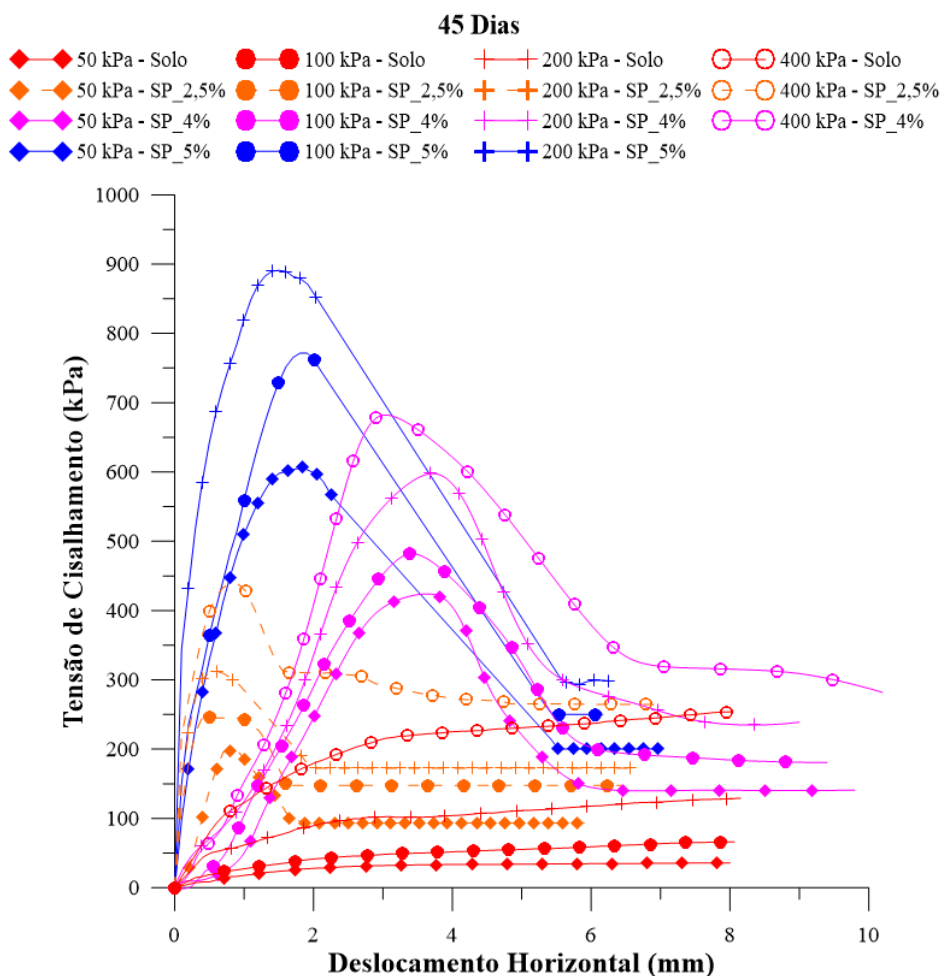


Figura 4.13. Curvas de tensão x deslocamento horizontal dos compósitos com 45 dias de cura e solo

Observa-se, de forma geral, um comportamento crescente da resistência ao cisalhamento com o aumento do teor de polímero, confirmando o papel do aditivo como agente cimentante e promotor de ligações intergranulares.

O solo natural apresenta as menores tensões de cisalhamento em todas as tensões normais aplicadas, com curvas de formato praticamente linear e ausência de picos definidos, comportamento típico de materiais granulares e não coesivos.

O compósito SP25 já demonstra a formação de picos de resistência, embora em magnitudes inferiores às dos demais compósitos. Esse comportamento indica o início da ação do polímero na cimentação das partículas, conferindo alguma coesão ao material, mas ainda com estrutura interna parcialmente consolidada.

O compósito SP40 apresenta desempenho intermediário, com picos bem definidos e tensões de cisalhamento significativamente superiores às do SP25. As curvas exibem

comportamento típico de materiais parcialmente cimentados, aumento rápido da tensão até o pico, seguido por redução gradual, o que sugere ruptura mais progressiva e boa capacidade de redistribuição de tensões.

Já o compósito SP50 alcança as maiores tensões de cisalhamento para todas as tensões normais, apresentando picos mais acentuados e resistência máxima mais elevada. Contudo, observa-se que após o pico ocorre uma redução mais brusca da tensão, indicando um comportamento mais frágil, com menor capacidade de deformação plástica.

Apesar das diferenças de resistência máxima, nota-se que todas as curvas tendem a convergir para um mesmo patamar de estabilização no trecho pós-pico, independentemente do teor de polímero. Essa convergência sugere que, após a ruptura das ligações mais frágeis, o comportamento residual é controlado predominantemente pelo atrito entre as partículas, com pouca influência adicional do polímero já rompido.

Em síntese, o aumento do teor de polímero promove maior resistência máxima ao cisalhamento, mas reduz a ductilidade do compósito. O teor de 4% apresenta comportamento mais equilibrado, combinando boa resistência com pós-pico mais estável, configurando-se como o teor mais adequado para o solo arenoso estudado.

Na Tabela 4.4 apresenta-se a evolução dos parâmetros de resistência, intercepto coesivo (c') e ângulo de atrito efetivo (ϕ'), em função do tempo de cura para os compósitos SP25, SP40 e SP50.

Tabela 4.4. Relação ângulo de atrito, intercepto coesivo para cada compósito de acordo com os tempos de cura (Autor e Silva (2020))

Cura	SP25		SP40		SP50	
	c' (kPa)	Ângulo (°)	c' (kPa)	Ângulo (°)	c' (kPa)	Ângulo (°)
0 Dia	1,06	28,7	0,00	27,9	0,00	26,6
1° Dia	7,37	29,3	8,79	29,3	9,68	31,7
2° Dia	57,81	32,5	79,91	35,9	123,12	38,2
4° Dia	111,19	32,3	137,02	35,6	165,64	41,1
7° Dia	165,70	31,9	241,36	35,5	302,48	53,9
15° Dia	167,59	31,8	324,78	35,0	521,86	57,7
30° Dia	169,67	32,1	358,65	35,0	526,72	60,1
45° Dia	172,53	33,6	396,95	35,5	546,72	58,6

De maneira geral, observa-se que ambos os parâmetros aumentam com o tempo de cura e com o teor de polímero, confirmando a eficiência do aditivo como agente cimentante e modificador da estrutura do solo arenoso.

Nos tempos iniciais (0 e 1 dia), todos os compósitos apresentaram valores muito baixos de coesão e ângulos de atrito semelhantes ou ligeiramente inferiores aos do solo natural. Esse comportamento reflete o estágio inicial de reação do polímero, em que a matriz ainda está úmida e as ligações entre as partículas de solo são incipientes.

A partir do 2º dia de cura, o aumento de c' torna-se expressivo em todas as misturas, indicando o início efetivo do processo de polimerização e fixação do agente nas partículas. O ganho de resistência é acompanhado pelo incremento do ângulo de atrito, que passa a refletir não apenas o atrito entre grãos, mas também o travamento proporcionado pela formação de pontes poliméricas.

Entre 4 e 15 dias de cura, a evolução da coesão é acentuada, especialmente para o SP40 e o SP50, com destaque para o último, que atinge valores de c' superiores a 500 kPa após 15 dias. Nessa faixa, o ângulo de atrito também apresenta forte crescimento no SP50, alcançando $\phi' \approx 57,7^\circ$, comportamento que sugere significativa rigidez da matriz e maior intertravamento entre os grãos.

Após 30 dias, observa-se tendência de estabilização da coesão, embora ainda com ganhos graduais, e manutenção dos ângulos de atrito em patamares elevados. O SP50 mantém o maior valor de resistência global, mas apresenta comportamento mais frágil, com quedas abruptas pós-pico, conforme observado nas curvas de cisalhamento. Já o SP40 exibe um comportamento mais equilibrado: combina altos valores de coesão (≈ 400 kPa) com estabilidade de ϕ' em torno de 35° , apresentando-se como o teor de polímero mais adequado ao equilíbrio entre rigidez, resistência e ductilidade.

Por sua vez, o SP25, embora apresente aumento progressivo da coesão até cerca de 170 kPa, mantém valores de ângulo de atrito próximos a 32° , indicando comportamento menos sensível ao avanço da cura e menor eficiência na formação de ligações poliméricas.

Em síntese, o panorama geral confirma que o aumento do teor de polímero promove ganhos significativos de coesão e elevação do ângulo de atrito, especialmente até os 15 dias de cura, com posterior estabilização. No entanto, o SP40 representa o ponto ótimo entre resistência

e comportamento pós-pico estável, sendo o compósito com melhor desempenho global para o solo arenoso estudado.

Na Figura 4.14 apresenta-se a evolução dos parâmetros de resistência ao cisalhamento, intercepto coesivo (c') e ângulo de atrito efetivo (ϕ'), em função do tempo de cura para os três compósitos analisados.

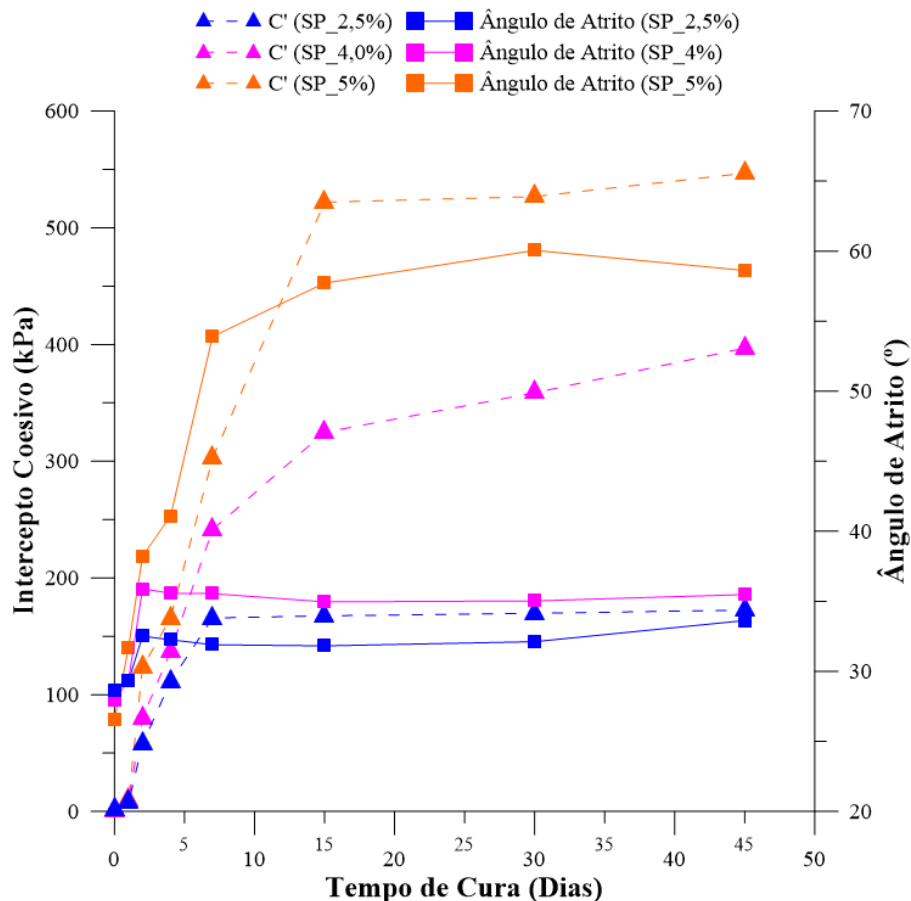


Figura 4.14. Relação ângulo de atrito e intercepto coesivo por tempo de cura para os compósitos.

Observa-se que, de modo geral, ambos os parâmetros aumentam com o avanço da cura e com o teor de polímero, confirmando a contribuição do agente polimérico na consolidação estrutural e no ganho de resistência das misturas.

Nos tempos iniciais, a coesão é praticamente nula e o ângulo de atrito apresenta valores próximos ou inferiores aos do solo natural, devido à elevada umidade e à ausência de ligações significativas entre as partículas. A partir do segundo dia, o avanço da cura e o processo de polimerização promovem elevação simultânea dos parâmetros, indicando o início da cimentação entre os grãos e a formação de uma estrutura mais rígida e estável.

Entre quatro e quinze dias de cura, ocorre o maior ganho de coesão, sobretudo para os compósitos SP40 e SP50, alcançando valores acima de 300 kPa e 500 kPa, respectivamente. O SP40, embora apresente valores inferiores ao SP50, destaca-se por manter comportamento mais estável e gradual, enquanto o SP50 revela respostas mais abruptas e picos de resistência mais definidos, condizentes com um comportamento mais frágil.

Após trinta dias, observa-se tendência de estabilização tanto da coesão quanto do ângulo de atrito, indicando que o processo de cura se encontra praticamente consolidado. O SP40 demonstra equilíbrio entre rigidez e ductilidade, com valores de c' próximos a 400 kPa e ϕ' estabilizado em torno de 35° , sendo, portanto, o compósito com desempenho mais representativo para aplicação prática.

De forma geral, verifica-se que o aumento do teor de polímero resulta em elevação do intercepto coesivo e do ângulo de atrito até determinado limite, a partir do qual o ganho adicional é marginal. Essa tendência, aliada à análise das curvas de cisalhamento, reforça que a evolução da cura proporciona a consolidação das ligações poliméricas e o aumento da resistência, mas também conduz a uma resposta mecânica mais rígida e, em alguns casos, mais frágil no pós-pico. O comportamento do SP40 representa, assim, o ponto ótimo entre desempenho mecânico e estabilidade estrutural, sendo selecionado como referência para as análises subseqüentes.

4.4. ENSAIO TRIAXIAL CÍCLICO - MÓDULO DE RESILIÊNCIA

Os resultados obtidos no ensaio de triaxial cíclico estão repensados na Tabela 4.5 mostram-se as faixas de valores de MR.

Tabela 4.5. Valores de MR do Solo e SP40

Material	MR (MPa)
Solo	104 - 233
SP40 (7° Dia)	249 - 462
SP40 (15° Dia)	243 - 597
SP40 (30° Dia)	282 - 1057
SP40 (45° Dia)	386 - 1223

O compósito SP40 apresentou módulo de resiliência (MR) sistematicamente superior ao do solo natural em todas as idades de cura avaliadas. Mesmo nas condições menos favoráveis, os valores mínimos de MR do compósito superaram os máximos observados para o

solo, evidenciando a eficiência do polímero no reforço da estrutura do material. Aos 7 dias, os valores de MR do SP40 já eram cerca de duas a seis vezes superiores aos do solo, e esse intervalo de ganho aumentou progressivamente com o tempo de cura. Aos 45 dias, o MR do compósito alcançou valores entre aproximadamente 400 e 1200 MPa, enquanto o solo manteve-se entre 100 e 230 MPa, representando um incremento de ordem de grandeza no desempenho resiliente. A variação dos valores mínimos em 15 e 30 dias está associada às diferentes combinações de tensões confinante e desviadora aplicadas, sem comprometer a tendência geral de aumento da rigidez com a cura, confirmada pelos maiores valores e pela análise paramétrica do modelo universal.

A relação entre o módulo de resiliência (MR) e a tensão confinante (σ_3) foi avaliada para o solo natural e para o compósito SP40. Os resultados foram ajustados por regressão potencial, segundo o modelo empírico comumente aplicado a solos arenosos, conforme a metodologia proposta por Hicks (1970). O ajuste foi realizado no Microsoft Excel, e os coeficientes de determinação (R^2) apresentaram valores elevados, indicando boa aderência entre os dados experimentais e as curvas obtidas.

Na Figura 4.15 apresentam-se os ajustes gráficos correspondentes, evidenciando o comportamento do módulo de resiliência em função da tensão confinante ao longo do período de cura.

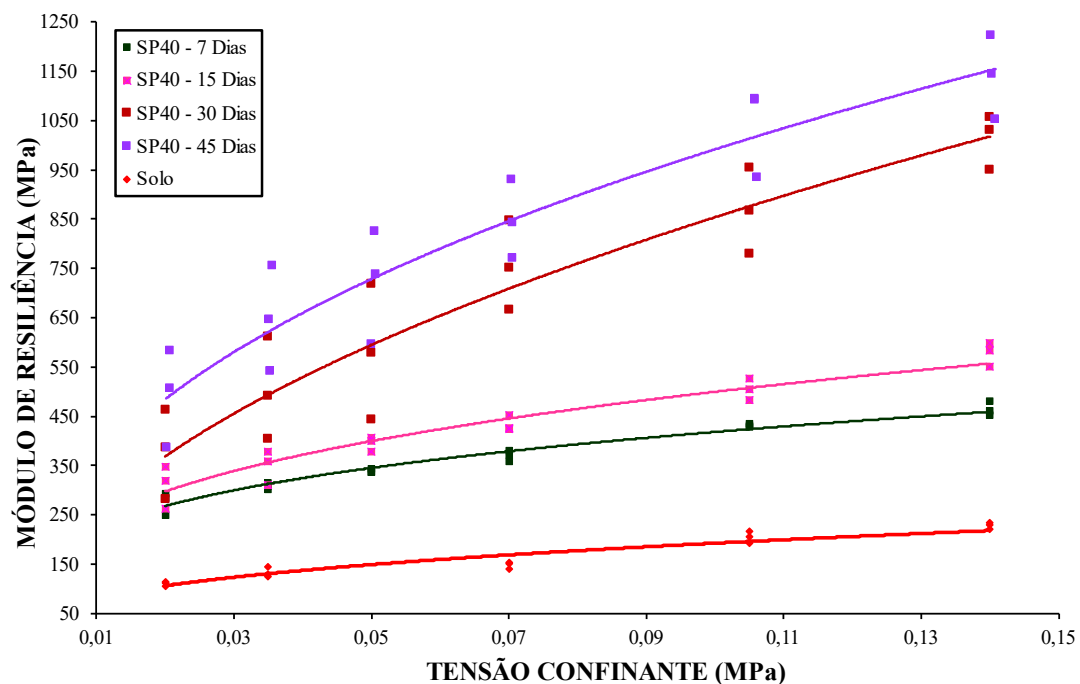


Figura 4.15. Gráfico Variação do módulo de resiliência (MR) em função da tensão confinante (σ_3) para o solo natural e para o compósito SP40 em diferentes tempos de cura.

Na Tabela 4.6 estão organizados os parâmetros de regressão obtidos para cada tempo de cura do compósito SP40, bem como o intervalo experimental observado para o solo natural utilizado como referência.

Tabela 4.6. Os parâmetros do modelo em função da confinante para o solo natural e SP40.

Material	Equação ajustada	K ₁	K ₂	R ²	Faixa de MR (MPa)
Solo	$MR = 450,79 \cdot \sigma_3^{0,3691}$	450,79	0,3691	0,92	104 - 233
SP40 (7° Dia)	$MR = 767,61 \cdot \sigma_3^{0,2764}$	767,61	0,2754	0,96	249 - 480
SP40(15° Dia)	$MR = 1049,40 \cdot \sigma_3^{0,3221}$	1049,40	0,3221	0,93	243 - 597
SP40(30° Dia)	$MR = 2838,90 \cdot \sigma_3^{0,5216}$	2838,90	0,5216	0,87	282 - 1057
SP40 (45° Dia)	$MR = 2761,90 \cdot \sigma_3^{0,4448}$	2761,90	0,4448	0,88	386 - 1223

Observa-se que o modelo apresentou excelente ajuste aos dados experimentais, com coeficientes de determinação (R²) superiores a 0,87 em todas as idades de cura, evidenciando que a relação potencial descreve adequadamente a influência da tensão confinante sobre o módulo de resiliência.

O solo natural apresentou valores de k1 e k2 mais baixos (≈ 451 e $0,37$), condizentes com o comportamento típico de solos arenosos não estabilizados, cuja rigidez é fortemente dependente do confinamento. Com a adição de 4% de polímero, verificou-se aumento expressivo de k1 já aos 7 dias (≈ 768 MPa) e crescimento contínuo até 30 dias, alcançando cerca de 2839 MPa, com estabilização aos 45 dias. Esse comportamento indica a formação progressiva de uma matriz polimérica mais rígida, responsável pelo aumento da capacidade de recuperação elástica do material.

O expoente k2, que representa a sensibilidade do módulo às variações de tensão confinante, também aumentou de 0,27 para 0,52 entre 7 e 30 dias, demonstrando que o material se torna mais responsivo ao confinamento durante a fase de estruturação. A leve redução aos 45 dias (0,44) sugere estabilização microestrutural, típica de compósitos consolidados, em que o comportamento resiliente passa a depender menos do acréscimo de tensão confinante.

A Figura 4.15 ilustra esses resultados, evidenciando o deslocamento progressivo das curvas de MR em relação ao solo natural e o aumento da inclinação das regressões até os 30 dias, seguido de estabilização aos 45 dias.

De modo geral, o comportamento observado confirma que a adição de 4 % de polímero proporcionou ganho expressivo e duradouro de rigidez, compatível com a formação de uma

rede polimérica contínua, capaz de reduzir deformações plásticas e ampliar a recuperação elástica sob carregamentos repetidos.

A relação entre o módulo de resiliência (MR) e a tensão desvio (σ_d) foi analisada para o solo natural e o compósito SP40, conforme apresentado na Figura 4.16.

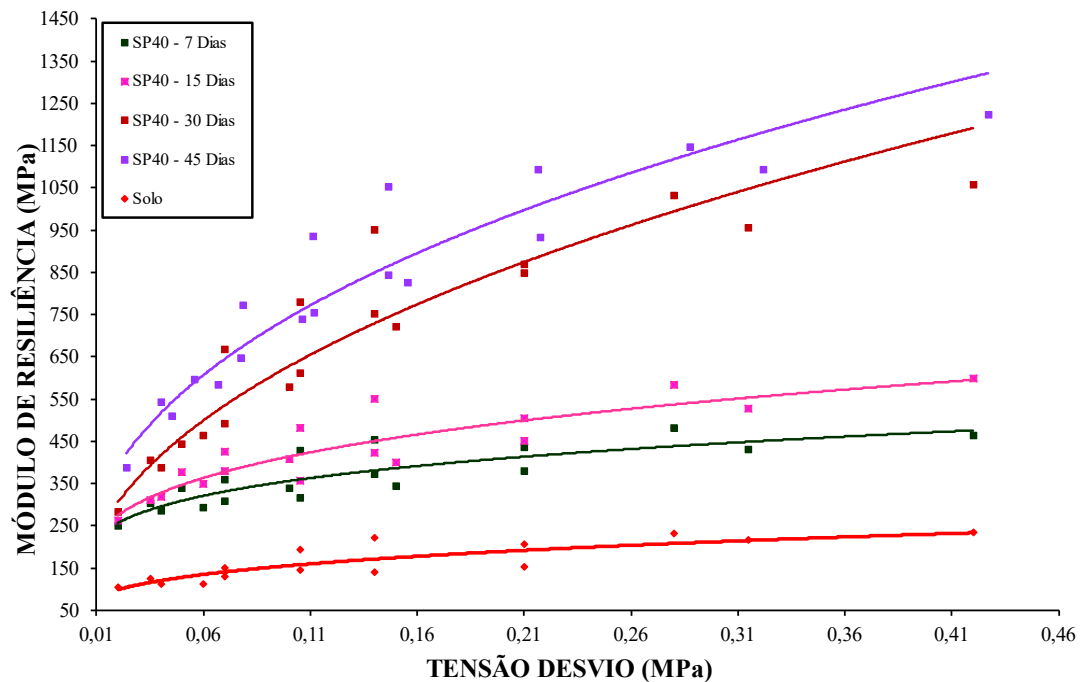


Figura 4.16. Variação do módulo de resiliência (MR) em função da tensão desvio (σ_d) para o solo natural e o compósito SP40 em diferentes tempos de cura.

O modelo potencial ajustado entre o módulo de resiliência (MR) e a tensão desvio (σ_d) apresentou resultados coerentes com o comportamento esperado para materiais tratados, ainda que com coeficientes de determinação (R^2) ligeiramente inferiores aos observados no modelo em função da tensão confinante. Os valores de R^2 para os compósitos variaram entre 0,70 e 0,90, indicando ajuste satisfatório, porém com maior dispersão dos pontos experimentais, especialmente para as idades iniciais.

O solo natural apresentou os menores parâmetros k_1 e k_2 (≈ 324 e $0,29$), caracterizando a rigidez reduzida típica de solos arenosos não estabilizados, cuja resposta resiliente é fortemente dependente da magnitude da carga aplicada. O R^2 para o solo ficou com 0,49 mostrando que não há bom ajuste de dados para esse modelo.

Com a adição de 4 % de polímero, observou-se aumento expressivo do parâmetro k_1 , que evoluiu de aproximadamente 534 MPa aos 7 dias para 1845 MPa aos 45 dias, evidenciando ganho progressivo de rigidez do compósito ao longo da cura. Essa tendência reflete o processo

de estruturação e interligação polimérica, que favorece a recuperação elástica após os ciclos de carga.

O expoente k_2 associado à sensibilidade do MR à tensão desvio, apresentou crescimento moderado entre 7 e 30 dias (de 0,18 para 0,45), com leve redução aos 45 dias (0,39). Esse comportamento indica que, nas fases iniciais de cura, o compósito torna-se mais dependente da tensão aplicada para manifestar rigidez, enquanto em estágios avançados há estabilização microestrutural, reduzindo a influência direta do aumento de carga.

Na Figura 4.16 demonstra visualmente esse comportamento, com deslocamento ascendente das curvas de MR em relação ao solo natural e inclinação crescente até os 30 dias. Aos 45 dias, observa-se tendência de estabilização, refletindo o equilíbrio entre o ganho de rigidez e a menor sensibilidade à variação de carga.

De forma geral, os resultados confirmam que a adição de 4 % de polímero promoveu ganho significativo de rigidez e capacidade resiliente, mesmo sob variações elevadas de tensão desvio, tornando o compósito mais resistente às deformações acumulativas e com comportamento mecânico mais estável ao longo do tempo.

A comparação entre os modelos potenciais ajustados em função da tensão confinante e da tensão desvio permite identificar diferenças relevantes no comportamento do compósito solo-polímero SP40.

O modelo em função da tensão confinante apresentou maior capacidade de correlação com os resultados experimentais, com coeficientes de determinação superiores a 0,87, além de refletir melhor a influência do confinamento no ganho de rigidez do material. Esse resultado é coerente com o caráter arenoso do solo utilizado, uma vez que em materiais granulares o atrito interpartículas e o confinamento exercem papel dominante no comportamento resiliente.

Por outro lado, o modelo em função da tensão desvio apresentou ajustes satisfatórios, mas com maior dispersão dos pontos experimentais, especialmente nas idades iniciais, e coeficientes de determinação variando entre 0,70 e 0,90. Essa resposta indica que o compósito, apesar de conter polímero, não se comporta como um solo coesivo típico, sendo sua rigidez mais influenciada pela pressão confinante do que pela magnitude da carga aplicada.

Ainda assim, o modelo baseado em σ_d mostrou-se útil para compreender a influência do carregamento repetido sobre a recuperação elástica e para evidenciar a estabilização do

comportamento após 30 dias de cura, quando o material passa a responder de forma mais uniforme às variações de carga.

Dessa forma, a análise comparativa confirma que o modelo confinante é o mais representativo para descrever o comportamento do compósito SP40 em estudo, embora o modelo em função da tensão desvio forneça informações complementares sobre a resposta do material sob condições cíclicas de carregamento.

Com base nesses resultados, adotou-se o modelo universal de Svenson (1980) para integrar ambas as variáveis e representar de maneira mais abrangente o comportamento resiliente do material, conforme apresentado na sequência.

Na Tabela 4.7 estão compilados os parâmetros de regressão obtidos para cada tempo de cura do compósito SP40 em função de σ_d , bem como o intervalo experimental observado para o solo natural utilizado como referência.

Tabela 4.7. Os parâmetros do modelo em função da tensão desvio para o solo natural e SP40.

Material	Equação ajustada	K ₁	K ₂	R ²	Faixa de MR (MPa)
Solo	$MR = 324,09 \cdot \sigma_d^{0,2939}$	324,09	0,2939	0,49	104 - 233
SP40 (7º Dia)	$MR = 533,58 \cdot \sigma_d^{0,1839}$	533,58	0,1839	0,70	249 - 480
SP40(15º Dia)	$MR = 684,47 \cdot \sigma_d^{0,2286}$	684,47	0,2286	0,79	243 - 597
SP40 (30º Dia)	$MR = 1745,90 \cdot \sigma_d^{0,4495}$	1745,90	0,4495	0,90	282 - 1057
SP40 (45º Dia)	$MR = 1845,30 \cdot \sigma_d^{0,3988}$	1845,30	0,3988	0,89	386 - 1223

O modelo potencial ajustado entre o módulo de resiliência (MR) e a tensão desvio (σ_d) apresentou resultados coerentes com o comportamento esperado para materiais tratados, ainda que com coeficientes de determinação (R²) ligeiramente inferiores aos observados no modelo em função da tensão confinante. Os valores de R² para os compósitos variaram entre 0,70 e 0,90, indicando ajuste satisfatório, porém com maior dispersão dos pontos experimentais, especialmente para as idades iniciais.

O solo natural apresentou os menores parâmetros k₁ e k₂ (≈ 324 e $0,29$), caracterizando a rigidez reduzida típica de solos arenosos não estabilizados, cuja resposta resiliente é fortemente dependente da magnitude da carga aplicada. O R² para o solo ficou com 0,49 mostrando que não há bom ajuste de dados para esse modelo.

Com a adição de 4 % de polímero, observou-se aumento expressivo do parâmetro k₁, que evoluiu de aproximadamente 534 MPa aos 7 dias para 1845 MPa aos 45 dias, evidenciando ganho progressivo de rigidez do compósito ao longo da cura. Essa tendência reflete o processo

de estruturação e interligação polimérica, que favorece a recuperação elástica após os ciclos de carga.

O expoente k_2 associado à sensibilidade do MR à tensão desvio, apresentou crescimento moderado entre 7 e 30 dias (de 0,18 para 0,45), com leve redução aos 45 dias (0,39). Esse comportamento indica que, nas fases iniciais de cura, o compósito torna-se mais dependente da tensão aplicada para manifestar rigidez, enquanto em estágios avançados há estabilização microestrutural, reduzindo a influência direta do aumento de carga.

Na Figura 4.16 demonstra visualmente esse comportamento, com deslocamento ascendente das curvas de MR em relação ao solo natural e inclinação crescente até os 30 dias. Aos 45 dias, observa-se tendência de estabilização, refletindo o equilíbrio entre o ganho de rigidez e a menor sensibilidade à variação de carga.

De forma geral, os resultados confirmam que a adição de 4 % de polímero promoveu ganho significativo de rigidez e capacidade resiliente, mesmo sob variações elevadas de tensão desvio, tornando o compósito mais resistente às deformações acumulativas e com comportamento mecânico mais estável ao longo do tempo.

A comparação entre os modelos potenciais ajustados em função da tensão confinante e da tensão desvio permite identificar diferenças relevantes no comportamento do compósito solo-polímero SP40.

O modelo em função da tensão confinante apresentou maior capacidade de correlação com os resultados experimentais, com coeficientes de determinação superiores a 0,87, além de refletir melhor a influência do confinamento no ganho de rigidez do material. Esse resultado é coerente com o caráter arenoso do solo utilizado, uma vez que em materiais granulares o atrito interpartículas e o confinamento exercem papel dominante no comportamento resiliente.

Por outro lado, o modelo em função da tensão desvio apresentou ajustes satisfatórios, mas com maior dispersão dos pontos experimentais, especialmente nas idades iniciais, e coeficientes de determinação variando entre 0,70 e 0,90. Essa resposta indica que o compósito, apesar de conter polímero, não se comporta como um solo coesivo típico, sendo sua rigidez mais influenciada pela pressão confinante do que pela magnitude da carga aplicada.

Ainda assim, o modelo baseado em σ_d mostrou-se útil para compreender a influência do carregamento repetido sobre a recuperação elástica e para evidenciar a estabilização do

comportamento após 30 dias de cura, quando o material passa a responder de forma mais uniforme às variações de carga.

Dessa forma, a análise comparativa confirma que o modelo confinante é o mais representativo para descrever o comportamento do compósito SP40 em estudo, embora o modelo em função da tensão desvio forneça informações complementares sobre a resposta do material sob condições cíclicas de carregamento.

Com base nesses resultados, adotou-se o modelo universal de Svenson (1980) para integrar ambas as variáveis e representar de maneira mais abrangente o comportamento resiliente do material, conforme apresentado na sequência. Na Tabela 4.8 está representada as constantes de regressão para o modelo citado e o coeficiente de determinação (R^2) de cada ajuste ao modelo.

Tabela 4.8. Constantes de regressão e R^2 para o modelo universal.

Material	Equação ajustada	K_1	K_2	K_3	R^2	Faixa de MR (MPa)
Solo	$MR = 436,90 \cdot \sigma_3^{0,30} \cdot \sigma_d^{-0,39}$	324,09	0,30	-0,39	0,92	104 - 233
SP40 (7° Dia)	$MR = 768,59 \cdot \sigma_3^{0,23} \cdot \sigma_d^{0,05}$	768,59	0,23	0,05	0,97	249 - 480
SP40 (15° Dia)	$MR = 982,31 \cdot \sigma_3^{0,21} \cdot \sigma_d^{0,11}$	982,31	0,21	0,11	0,95	243 - 597
SP40 (30° Dia)	$MR = 1787,75 \cdot \sigma_3^{0,32} \cdot \sigma_d^{0,19}$	1787,75	0,32	0,19	0,98	282 - 1057
SP40 (45° Dia)	$MR = 2421,78 \cdot \sigma_3^{0,21} \cdot \sigma_d^{0,25}$	2421,78	0,21	0,25	0,98	386 - 1223

Nas Figura 4.17 a Figura 4.20 apresentam-se a superfície obtida pelo ajuste ao modelo universal nos compósitos SP40 para diferentes dias de cura.

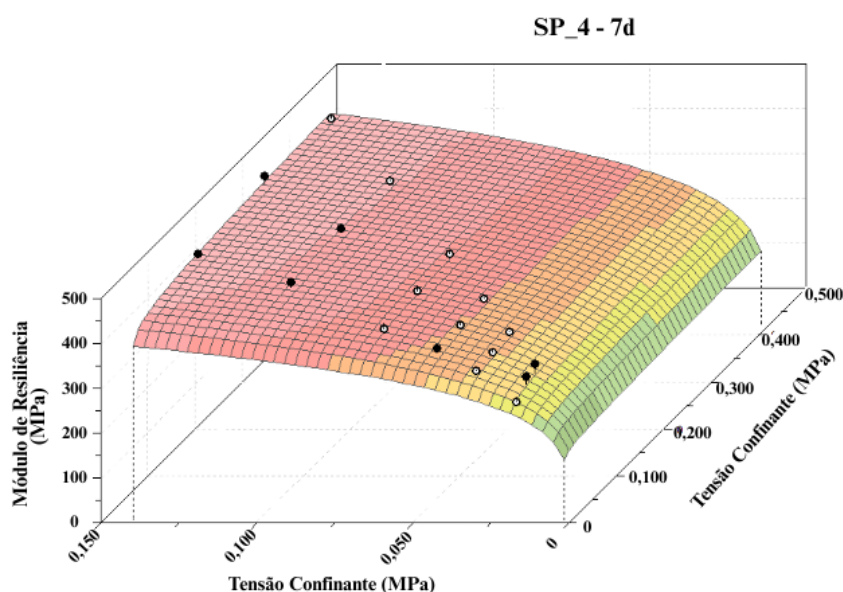


Figura 4.17. Superfície do Modelo Universal aplicado SP40 com 7 dias de cura

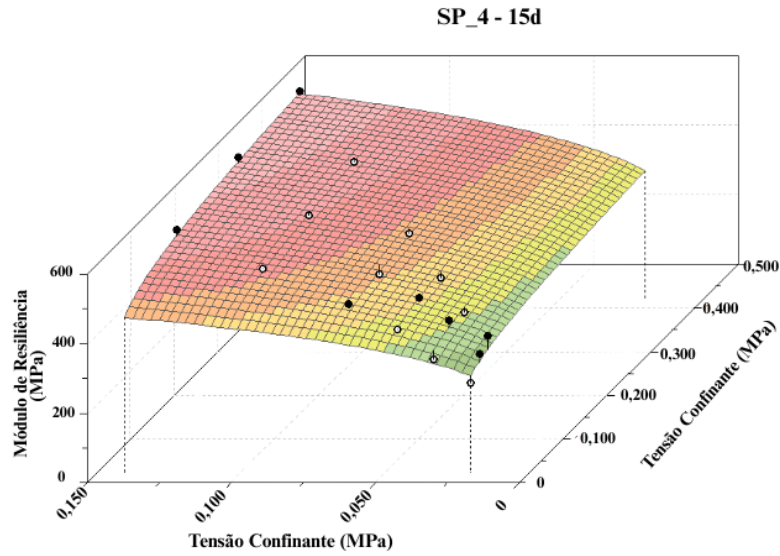


Figura 4.18. Superfície do Modelo Universal aplicado SP40 com 15 dias de cura.

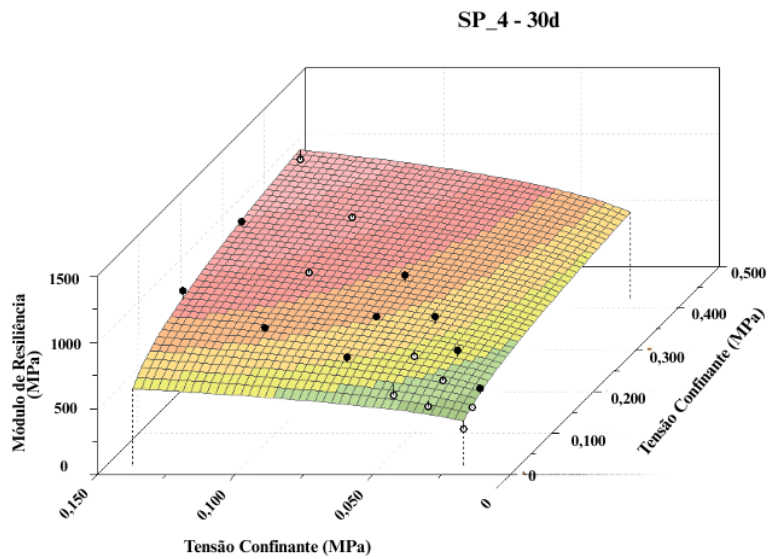


Figura 4.19. Superfície do Modelo Universal aplicado SP40 com 30 dias de cura.

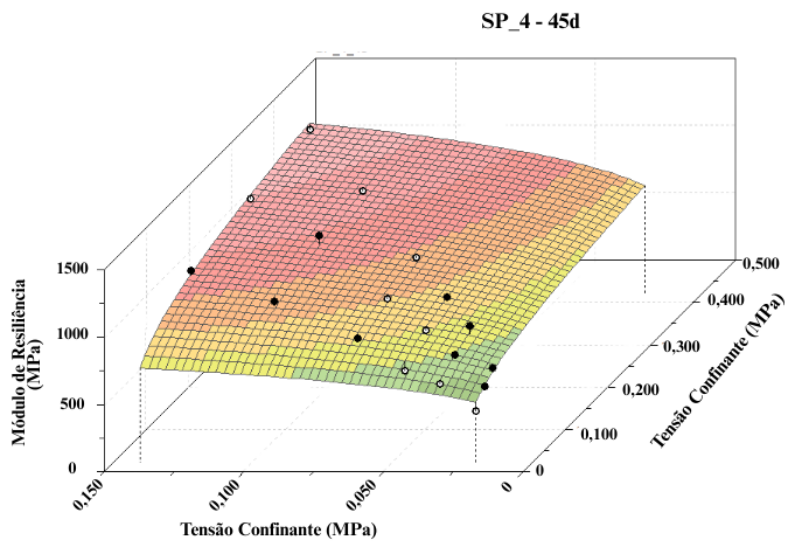


Figura 4.20. Superfície do Modelo Universal aplicado SP40 com 45 dias de cura.

Os resultados ajustados pelo modelo universal indicam excelente aderência entre os valores experimentais e os previstos, com coeficientes de determinação (R^2) variando de 0,92 a 0,98, o que demonstra alta confiabilidade estatística do modelo. Esse comportamento confirma que há adequação da equação proposta por Svenson (1980) aplicada a representação do módulo de resiliência de solos tratados com polímeros.

O solo natural apresentou valores de k_1 e k_2 baixos ($\approx 436,9$ e $0,30$, respectivamente), além de k_3 negativo ($\approx -0,39$). Essa combinação é típica de materiais não estabilizados, cuja rigidez depende fortemente do confinamento e diminui com o aumento da tensão desvio. Ou seja, à medida que a sollicitação cíclica cresce, há maior deformação plástica e consequente redução na capacidade de recuperação elástica do solo.

A introdução de SP40 de polímero alterou de forma expressiva esse comportamento. Nota-se um aumento contínuo de k_1 com o tempo de cura, de 768 MPa aos 7 dias para 2.422 MPa aos 45 dias, refletindo um ganho significativo na rigidez e na capacidade elástica do compósito. Tal evolução está associada à consolidação da matriz polimérica e ao fortalecimento das ligações entre partículas, que reduzem a suscetibilidade à deformação permanente.

Os expoentes k_2 e k_3 também indicam transformações microestruturais relevantes. Enquanto o k_2 (sensibilidade ao confinamento) estabilizou em torno de 0,21, o k_3 passou de 0,05 aos 7 dias para 0,25 aos 45 dias, evidenciando que o material passou a responder positivamente ao aumento da tensão desvio. Esse comportamento inverso ao do solo natural indica que, após a cura, o polímero promove maior coesão interna, permitindo ao compósito armazenar e liberar energia elástica sem colapsar estruturalmente.

Portanto, o modelo universal permitiu identificar de forma clara a evolução da estrutura resiliente do compósito SP40, demonstrando que o ganho de desempenho mecânico decorre tanto do aumento da rigidez básica (k_1) quanto da redução da dependência do confinamento e da melhora na resposta sob tensões desviadoras. Essa tendência é consistente com o desenvolvimento progressivo de uma rede polimérica contínua, que estabiliza o comportamento mecânico e proporciona melhor desempenho sob sollicitações cíclicas típicas de pavimentos.

De forma geral, os resultados obtidos pelo modelo universal apresentaram os melhores níveis de ajuste e coerência física entre todos os métodos analisados, permitindo uma interpretação mais abrangente do comportamento resiliente do material. Esse modelo integra, de maneira simultânea, os efeitos da tensão confinante e da tensão desvio, refletindo com maior precisão as condições de carregamento cíclico atuantes em campo. Além disso, os parâmetros

ajustados demonstraram clara evolução do compósito SP40 com o tempo de cura, evidenciando o ganho progressivo de rigidez e a consolidação da estrutura interna do material. Assim, o modelo universal foi adotado como base para a análise comparativa entre os diferentes compósitos e tempos de cura, servindo como referência principal na avaliação da eficiência do polímero na melhoria do desempenho mecânico dos solos arenosos.

Silva (2020), ao avaliar os compósitos SP_2,5 % e SP_5 % em ensaios triaxiais cíclicos, observou comportamento distinto do verificado no presente estudo. Naquela ocasião, houve redução dos valores de módulo de resiliência (MR) com o aumento do tempo de cura para ambos os teores. Esse decréscimo foi atribuído ao aumento da parcela plástica da deformação ao longo do envelhecimento do material. Segundo Medina e Motta (2015), em sistemas particulados parcialmente saturados, a deformação plástica decorre do escorregamento entre partículas e do rearranjo irreversível de grãos finos nos poros, o que reduz a componente elástica e, conseqüentemente, o MR. Assim, à medida que a cura avança, a redução da deformação resiliente tende a predominar sobre o ganho de rigidez promovido pelo agente estabilizante, resultando na queda dos valores de MR observada por Silva (2020).

No presente estudo, o compósito SP40 apresentou tendência inversas análises de Silva (2020), com aumento dos valores de MR ao longo da cura, alcançando incrementos expressivos entre 7 e 45 dias. Essa diferença de comportamento pode ser explicada pelo maior teor polimérico (4 %), suficiente para promover a formação de uma rede polimérica contínua entre as partículas de solo, capaz de resistir a deformações cíclicas e reduzir o escorregamento interno descrito por Medina e Mota (2015). Assim, enquanto os compósitos avaliados em Silva (2020) possuíam teores que resultavam em subdosagem (2,5 %) que são insuficiente para garantir coesão e continuidade entre as partículas ou superdosagem (5 %) que confere rigidez excessiva e reduz a capacidade de dissipar energia, o teor de 4 % mostrou-se mais equilibrado, proporcionando ganho de rigidez com o tempo e comportamento resiliente mais estável.

Essa constatação reforça a existência de uma dosagem ótima de polímero, a partir da qual o processo de cura não apenas aumenta a coesão, mas também estabiliza as deformações elásticas cíclicas, ampliando significativamente o módulo de resiliência do material. O crescimento progressivo dos parâmetros k_1 , k_2 e k_3 com o tempo de cura indica o fortalecimento das ligações poliméricas e a consolidação da estrutura interna, confirmando o desenvolvimento de uma matriz elástica e duradoura. Dessa forma, a dosagem de 4 % representa o ponto de equilíbrio entre resistência e deformabilidade, condição ótima para o solo

arenoso estudado, capaz de assegurar desempenho mecânico elevado e comportamento resiliente estável ao longo do tempo.

Ressalta-se que, segundo Medina e Motta (2015), não existe um modelo inerente ao solo, uma vez que diferentes conjuntos de dados podem ser ajustados de forma satisfatória por distintas expressões empíricas. A escolha do modelo, portanto, deve considerar tanto o comportamento físico do material quanto a adequação estatística dos resultados.

Além disso, Venson (2015) destaca que, mesmo quando se observam valores relativamente baixos de coeficiente de determinação (R^2), isso não invalida o modelo, pois o módulo de resiliência é influenciado por diversos fatores não contemplados nas formulações tradicionais como a tensão volumétrica, a granulometria do solo e, no caso específico deste estudo, o tempo de cura. Tais variáveis interferem diretamente na rigidez e na resposta elástica do material, podendo explicar variações nos parâmetros de ajuste entre diferentes composições e idades de cura.

4.5. DETERMINAÇÃO DA SUCÇÃO TOTAL

A determinação da sucção total foi realizada com o objetivo de verificar se o ganho de resistência mecânica dos compósitos solo-polímero poderia estar relacionado a variações no potencial matricial de água durante o processo de cura. Nas Figuras Figura 4.21 e Figura 4.22 encontra-se gráficos das curvas de ψ (MPa) \times tempo e $pF \times$ tempo, respectivamente, dos resultados dos compósitos SP25 e SP50 obtidos por Silva (2020) e os resultados de SP40.

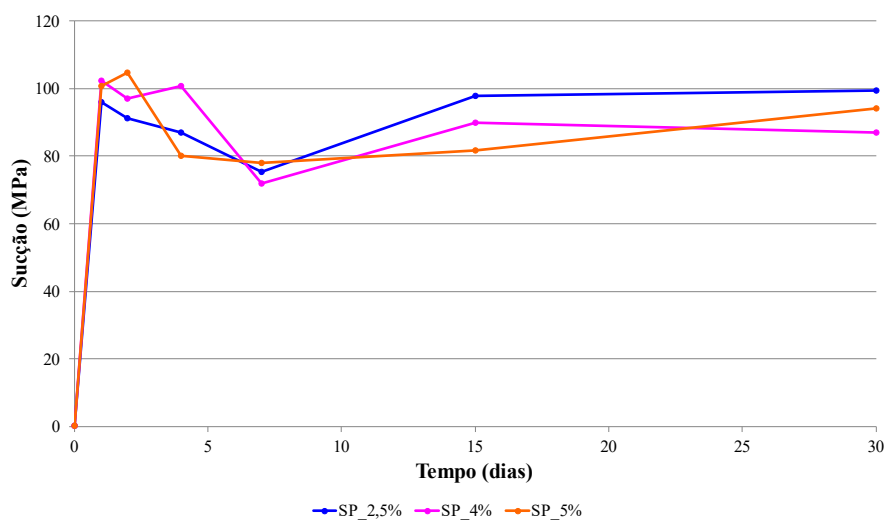


Figura 4.21. Curvas de ψ (MPa) \times tempo para todos os compósitos.

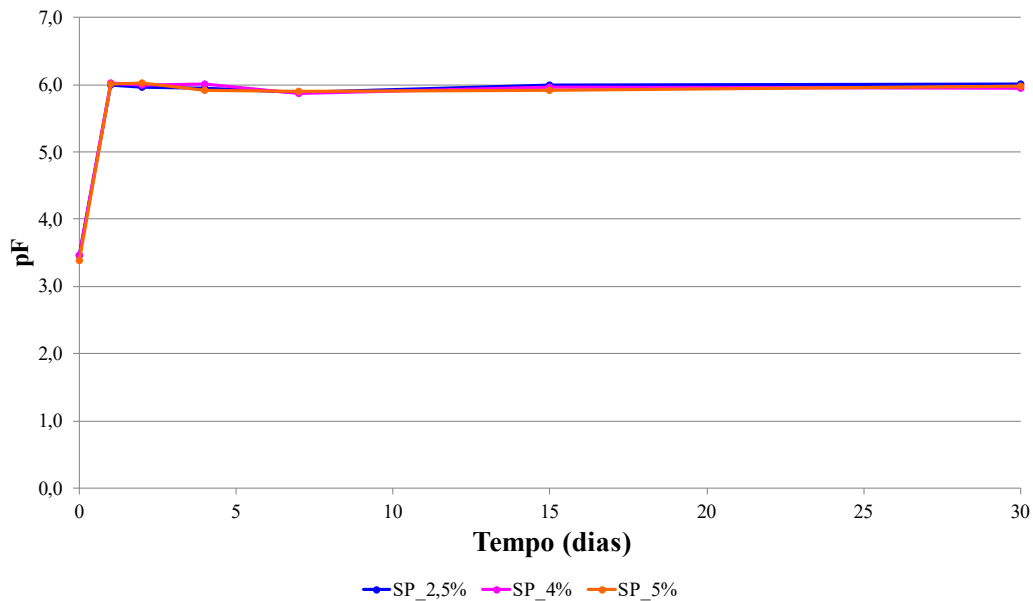


Figura 4.22. Curvas pF \times tempo para todos os compósitos.

No trabalho de Silva (2020), que avaliou os compósitos com 2,5% e 5% de polímero, observou-se que os valores de sucção permaneceram praticamente constantes ao longo do tempo, independentemente do teor polimérico. Naquela ocasião, os valores oscilaram entre 89 MPa e 97 MPa, indicando que a estabilização hídrica ocorria nos primeiros dias de cura e que o aumento de resistência observado nos ensaios mecânicos não estava associado a incrementos de sucção. No presente estudo, ao avaliar o compósito SP40, obteve-se comportamento análogo, com valores de sucção total variando pouco dentro de uma mesma faixa praticamente invariável entre 7 e 45 dias.

Essa estabilidade confirma que o polímero, ao ser incorporado ao solo, modifica de forma significativa a estrutura dos poros, reduzindo a influência das forças capilares. Essa tendência também foi observada por Huang *et al.* (2021) e Boaventura *et al.* (2023), que verificaram que a formação de filmes poliméricos sobre as partículas minerais reduz a energia livre da água e dificulta a movimentação do fluido nos microporos, estabilizando o regime de sucção mesmo sob variações externas. De maneira semelhante, Yang *et al.* (2019) relataram que, em misturas de areia silto-argilosa tratadas com polímeros, a sucção tende a se estabilizar rapidamente após a aplicação, e o desempenho mecânico passa a depender da consolidação da rede polimérica, e não de variações de potencial matricial.

As observações experimentais obtidas pelo equipamento WP4C reforçam essa interpretação. As curvas de ψ (MPa) \times tempo e pF \times tempo mostram que, após a adição do polímero, o equilíbrio hídrico é atingido precocemente e mantido estável durante todo o período

de cura, mesmo sob variações de temperatura. Esse comportamento é coerente com estudos como o de Banedjschafie e Dürner (2013), que observaram comportamento semelhante em areias tratadas com polímeros superabsorventes: após um curto período de ajuste hídrico, as amostras atingem um equilíbrio de sucção constante, resultado do bloqueio de caminhos capilares e da retenção localizada de água na matriz polimérica.

Além disso, trabalhos recentes como o de Al-Mahbashi *et al.* (2024) demonstram que polímeros e biopolímeros aumentam a capacidade de retenção hídrica em solos arenosos sem necessariamente alterar o valor de sucção total ao longo do tempo. Isso ocorre porque o polímero atua predominantemente na modificação estrutural da matriz porosa, promovendo o encapsulamento da água residual e reduzindo o efeito das forças matriciais, sem alterar significativamente o potencial total de água no sistema. Essa mesma constatação é válida para os compósitos SP25, SP40 e SP50, cujos resultados mostram que o ganho de resistência mecânica não decorre do incremento de sucção, mas do avanço das reações físico-químicas entre o polímero e as partículas minerais.

Portanto, os resultados de sucção obtidos com o WP4C indicam que o aumento de resistência e rigidez dos compósitos está ligado à evolução estrutural e ao enrijecimento progressivo da matriz polimérica, e não à redistribuição de umidade ou à energia de retenção de água. Essa conclusão é consistente com o comportamento relatado em pesquisas de Abdelgelil *et al.* (2025) e Zhang *et al.* (2023), nas quais a introdução de polímeros em solos arenosos resultou em estabilização hídrica precoce e ganho de resistência associado à formação de ligações poliméricas, e não ao aumento do potencial de sucção. Assim, confirma-se que o polímero atua predominantemente como agente cimentante e estruturante, e não como elemento de modificação do regime de sucção total no solo.

4.6. DIFRAÇÃO DE RAIOS X (DRX)

A análise mineralógica por difração de raios X (DRX) foi realizada por Silva (2020) para identificar as fases cristalinas do solo arenoso e avaliar possíveis alterações estruturais decorrentes da adição do polímero. Na Figura 4.24 observa-se o difratogramas de raios X do solo arenoso realizado por Silva (2020).

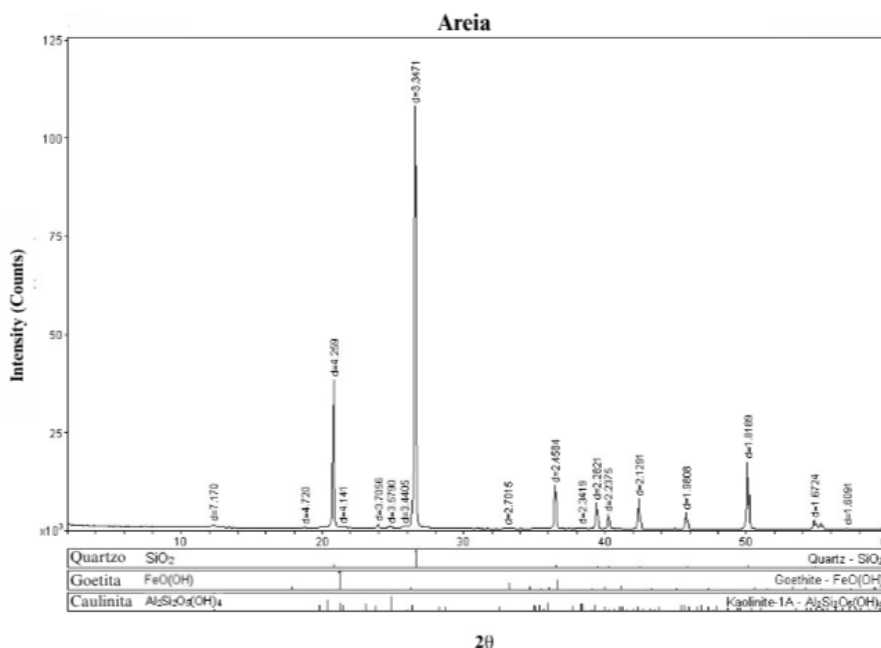


Figura 4.23. Difratoograma de raios X do solo arenoso. (Adaptado – Silva (2020)).

O solo arenoso natural apresentou picos de alta intensidade e nitidez, característicos do quartzo (SiO_2), com reflexões principais em torno de $26,6^\circ$ (2θ). Foram também identificadas goethita ($\text{FeO}(\text{OH})$) e caulinita ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$), minerais típicos de solos intemperizados derivados do Grupo Urucuia. A presença predominante de quartzo e a baixa proporção de argilominerais confirmam o caráter essencialmente silicoso e de elevada cristalinidade do material, coerente com os resultados de caracterização geotécnica, que indicam um solo de baixa coesão e comportamento fortemente dependente do confinamento.

De acordo com Silva (2020), os compósitos com 2,5 % e 5 % de polímero apresentaram as mesmas fases minerais do solo, com predominância de quartzo e caulinita, além de picos adicionais atribuídos à hematita (Fe_2O_3) e, no caso do SP 5 %, à gibbsita ($\text{Al}(\text{OH})_3$). Esses picos foram interpretados como respostas difratométricas associadas à presença do polímero, cuja natureza amorfa e hidroxilada apresenta semelhança com minerais óxidos e hidróxidos. As análises demonstraram que o comportamento estrutural dessas misturas é contrastante, uma vez que o SP 25 apresentou baixa cobertura polimérica e o SP50 mostrou excesso de fase amorfa.

Na Figura 4.24 apresenta-se o difratograma de raios X do compósito SP40. Observa-se a predominância de quartzo e caulinita, com halo amorfo discreto entre 20° e 30° (2θ), associado à dispersão homogênea da fase polimérica e à preservação da cristalinidade mineral.

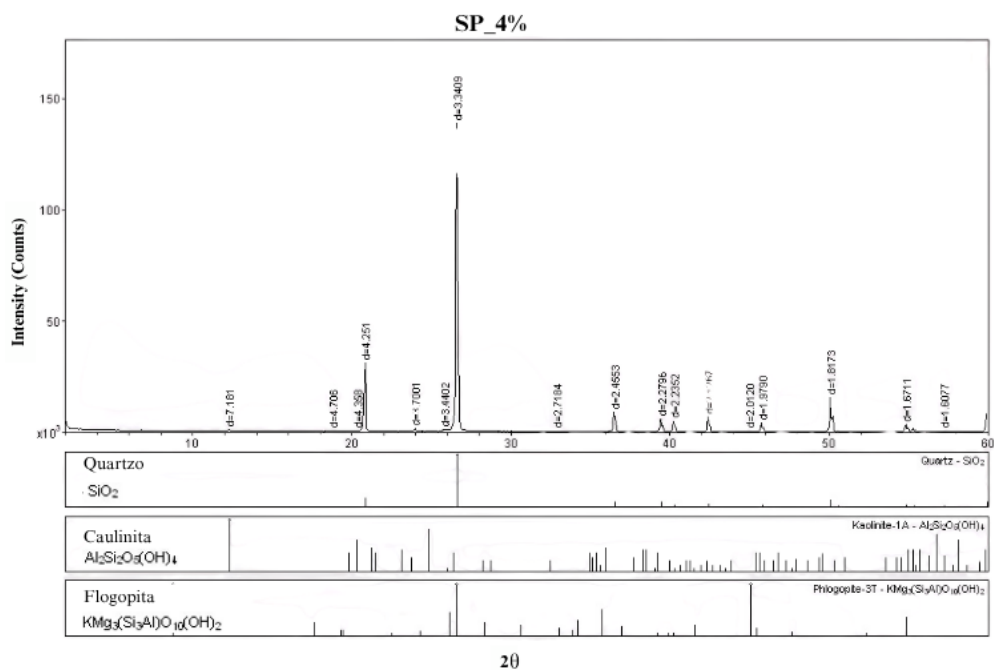


Figura 4.24. Difratoograma de raios X do compósito SP40.

No presente estudo, o compósito SP40 apresentou as mesmas fases cristalinas do solo natural, compostas por quartzo e caulinita, além de reflexões adicionais associadas à flogopita (KMg₃(Si₃Al)O₁₀(OH)₂). Essa fase é interpretada como resultado da interação entre o polímero e a matriz mineral, refletindo o grau de organização da rede polimérica durante o processo de cura. O difratograma apresentou picos bem definidos e um halo amorfo discreto entre 20° e 30° (2θ), o que indica dispersão homogênea do polímero entre as partículas, sem perda significativa da cristalinidade do material. Esse resultado demonstra que o polímero foi incorporado de forma uniforme, preenchendo parte dos vazios e aderindo às superfícies minerais, o que reduz a porosidade e aumenta a coesão, ao mesmo tempo em que preserva a estrutura mineral original.

Esse comportamento representa um equilíbrio entre as regiões cristalinas, responsáveis pela rigidez do sistema, e as regiões amorfas, associadas à fase polimérica. O padrão observado no SP40 é intermediário em relação aos verificados por Silva (2020) nas dosagens de 2,5 % e 5 %, indicando que o teor de 4 % permite a formação de uma matriz contínua e estável. A estrutura resultante apresenta coesão suficiente para unir os grãos e manter a rigidez mineral, condição coerente com os resultados de módulo de resiliência e resistência ao cisalhamento, que foram superiores às demais dosagens.

Assim, os resultados de DRX confirmam que o polímero não altera a mineralogia fundamental do solo, mas modifica sua organização interna. A adição de 4% de polímero

promoveu a formação de uma rede de ligação física entre os grãos minerais, constituída por uma fase parcialmente amorfa que reduz a porosidade e melhora o contato entre partículas. Essa reorganização estrutural explica o comportamento mecânico mais estável e o ganho de rigidez observados nos ensaios laboratoriais, evidenciando que o desempenho do compósito SP40 está relacionado ao desenvolvimento de uma microestrutura cristalino-amorfa coesa e estável.

4.7. ESPECTROMETRIA DE EMISSÃO ÓPTICA POR PLASMA ACOPLADO INDUTIVAMENTE (ICP-OES)

Os resultados de ICP-OES da areia, SP40 e o polímero (Terrafix) apresentam composição essencialmente quartzosa (Tabela 4.9).

Tabela 4.9. Resultados da análise de ICP-OES para a areia.

Material	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	Na ₂ O (%)	CaO (%)	MnO (%)	TiO ₂ (%)	Outros (%)
Areia	98,34	0,74	0,82	0,08	0,73	0,01	0,00	0
SP40	99,00	0,63	0,59	0,03	0,57	0,01	0,01	0
Terrafix	0,27	0,07	0,57	0,07	0,05	0,01	0,00	98,89

Os resultados do ICP-OES são coerentes com o difratograma de DRX da areia, que evidencia reflexões típicas de quartzo e ausência de outras fases cristalinas significativas. Resultados semelhantes foram reportados por Özhan (2019) e Liang *et al.* (2024), que também observaram composições dominadas por SiO₂ em misturas areia-bentonita com adição de polímero, confirmando que o comportamento mecânico dessas matrizes é controlado principalmente por processos de recobrimento superficial e não pela formação de novos minerais cristalinos.

O compósito SP40 manteve perfil químico muito próximo ao da areia, a semelhança entre os resultados de ICP-OES para areia e SP40 confirma que a estabilização com polímero Terrafix não introduziu contribuição mineral inorgânica relevante. Esse comportamento é compatível com o observado em outros estudos sobre solos arenosos tratados com polímeros sintéticos, nos quais não se verificou formação de novas fases cristalinas por DRX, apenas modificações microestruturais associadas à redistribuição e agregação de partículas (Liu *et al.*, 2018; Boaventura *et al.*, 2023). Os autores relatam que o aumento de resistência nesses materiais está associado à adsorção das cadeias poliméricas sobre as superfícies dos grãos e à

redução da mobilidade de água intersticial, o que reforça a interpretação aqui proposta para o SP40.

Diferenças discretas entre os teores de Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO e TiO_2 na areia e no SP40 podem ser atribuídas à variabilidade natural dos finos minerais e à sensibilidade do método em concentrações próximas ao limite de detecção. Situação semelhante foi descrita por Lam *et al.* (2014), que observaram pequenas variações químicas em misturas contendo polímero e bentonita, sem alteração mineralógica perceptível. Esses resultados corroboram que as transformações associadas à estabilização polimérica ocorrem em escala físico-química, por formação de pontes e filmes adesivos entre partículas, e não pela criação de novos compostos cristalinos.

O polímero Terrafix não apresentou sinal significativo no ICP-OES, o que era esperado, uma vez que a técnica detecta apenas elementos inorgânicos presentes na amostra e reporta-os como óxidos equivalentes. A ausência de picos relevantes não implica que o material seja "orgânico" no sentido da química orgânica, mas apenas que sua constituição é predominantemente baseada em cadeias poliméricas formadas por elementos leves que não são quantificados por ICP-OES, como carbono, hidrogênio, oxigênio e eventualmente nitrogênio.

Foram identificadas apenas pequenas quantidades de elementos metálicos, atribuíveis a aditivos e cargas normalmente incorporados em polímeros industriais para estabilidade, processamento ou funcionalidade. Esse comportamento é semelhante ao observado por Reddy *et al.* (2021) e Huang *et al.* (2021), que também relataram teores residuais de Fe, Na e Ca em polímeros comerciais empregados na estabilização de solos argilosos, sem que isso alterasse seu caráter sintético.

Os resultados de ICP-OES e DRX são, portanto, coerentes entre si e indicam que, no SP40, a estabilização polimérica ocorre por mecanismos físico-químicos de recobrimento e ponteamto entre partículas, sem alteração mineralógica mensurável. Essa interpretação está de acordo com as observações de Liu *et al.* (2018), que verificaram comportamento similar em areias tratadas com polímero, nas quais o aumento de coesão e rigidez foi associado à formação de uma rede superficial adesiva e à redução de porosidade, sem desenvolvimento de novas fases cristalinas.

De forma geral, o ICP-OES confirma que tanto a areia quanto o compósito SP40 mantêm composição essencialmente silicosa e que o Terrafix, por ser um polímero sintético constituído majoritariamente por elementos leves não detectáveis por essa técnica, não altera

significativamente o balanço inorgânico do sistema. Os ganhos mecânicos observados em SP40 estão, portanto, associados ao efeito físico de ligação e reorganização entre partículas promovido pelo polímero, conforme descrito também por Özhan (2019) e Boaventura *et al.* (2023), e não a transformações químicas de natureza mineralógica que poderiam ser detectadas por difratometria.

4.8. MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV)

A análise em microscopia eletrônica de varredura (MEV) foi utilizada para observar a morfologia das partículas e avaliar as modificações microestruturais decorrentes da adição do polímero. As imagens foram obtidas com elétrons secundários, em diferentes ampliações, para identificar características de forma, textura e interação entre partículas. Nas Figura 4.25 (a – b) apresentam-se as micrografias obtidas por MEV do solo arenoso natural.

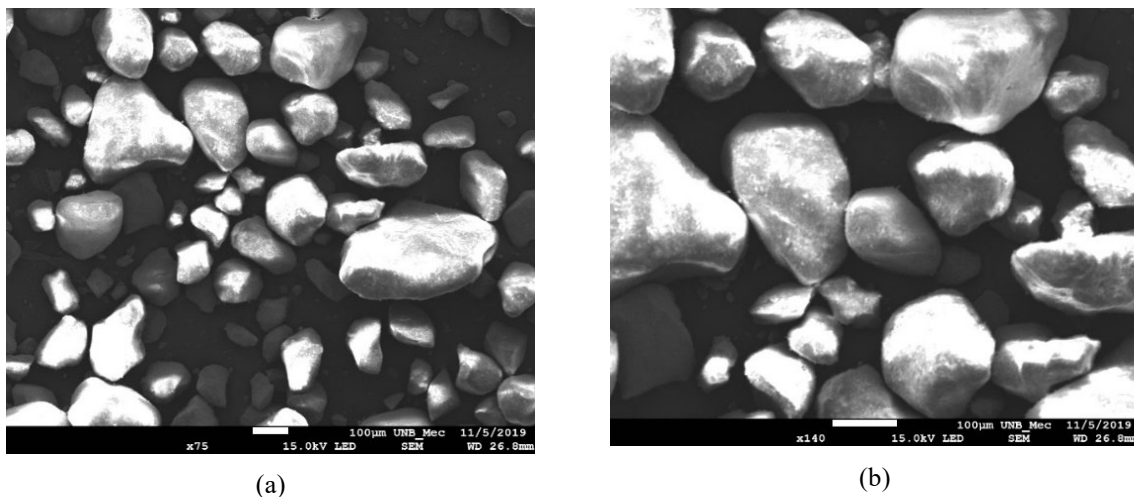


Figura 4.25. Imagens obtidas por MEV do solo (a) Vista geral mostrando a ausência de material cimentante e estrutura pouco compacta – aumento de 75x; (b) detalhe de grãos individuais com superfície irregular e ausência de ligação entre partículas – aumento de 140x . (Fonte: Silva, 2020)

De acordo com Silva (2020), o solo arenoso natural apresentou grãos soltos, pouco angulares e com ampla variação de tamanho, predominando partículas menores que se acomodam entre as maiores, o que resulta em uma estrutura pouco compacta e sem elementos de ligação entre grãos. Em maiores ampliações, observou-se superfície irregular dos grãos e ausência de filme ou material cimentante, confirmando o comportamento tipicamente granular e não coesivo desse solo.

Na Figura 4.25 (a – b) apresenta micrografias representativas do solo natural, nas quais se verifica a morfologia individualizada das partículas e a falta de ligação entre elas, evidenciando a natureza predominantemente arenosa e a inexistência de qualquer matriz que promova coesão. Essas observações servem de referência para a análise das imagens do compósito SP40, discutidas a seguir, que permitem identificar as alterações microestruturais provocadas pela incorporação do polímero, apresentadas nas Figura 4.26 (a-d), em ampliações de 22x a 500x.

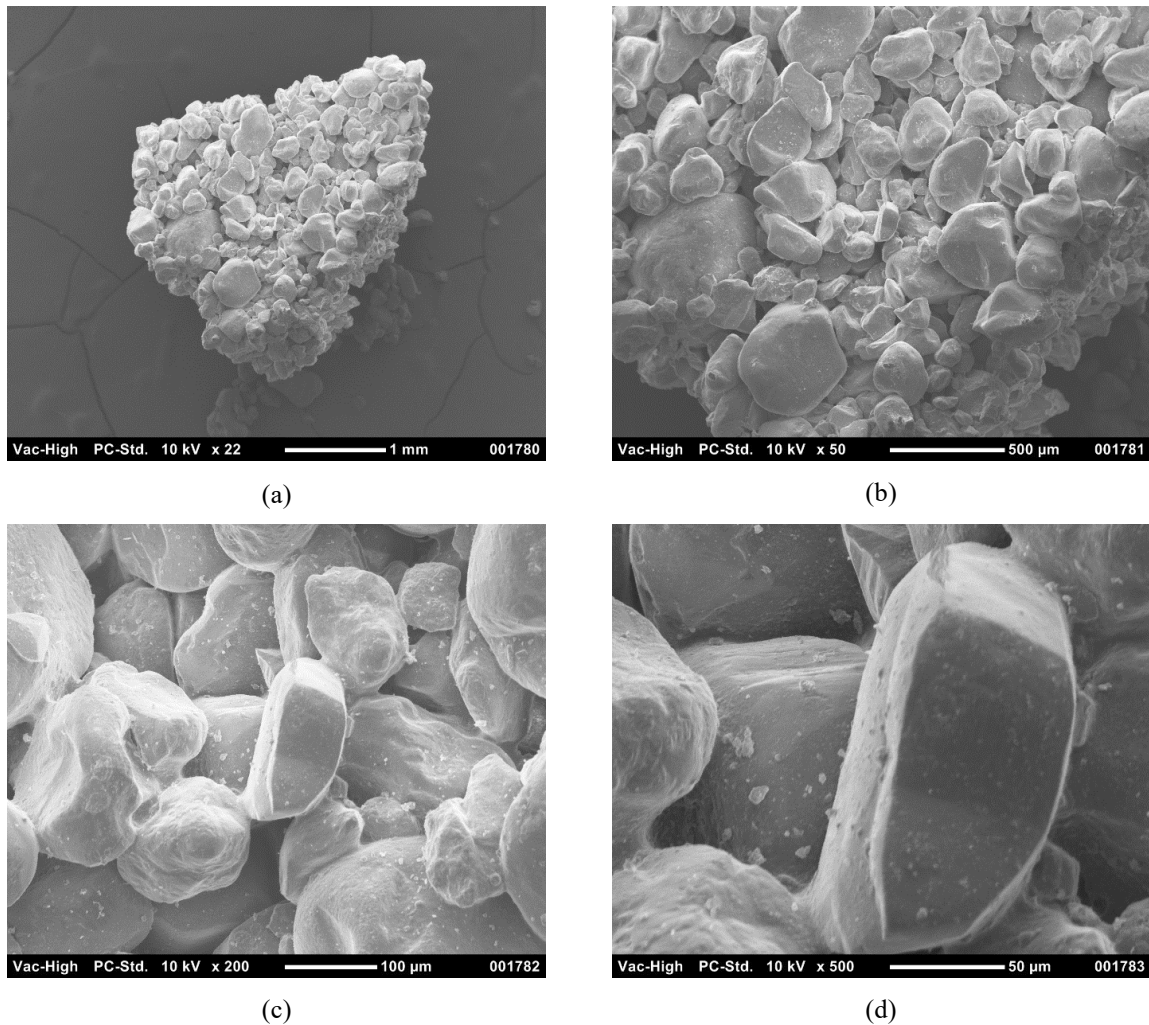


Figura 4.26. Micrografias obtidas por MEV do compósito SP40. (a) Vista geral mostrando a formação de agregados e redução da porosidade; (b–c) detalhes da película polimérica envolvendo os grãos e promovendo cimentação entre partículas; (d) ampliação de 500× evidenciando o contato polimérico aderido às superfícies minerais e a formação de zonas de ligação contínuas.

Na Figura 4.26 (a–d) apresenta as micrografias do compósito SP40 obtidas por microscopia eletrônica de varredura (MEV), em ampliações de 22× a 500×. Observa-se que a estrutura do material difere substancialmente daquela do solo natural, apresentando grãos parcialmente recobertos por uma película contínua e homogênea, que atua como ponte física

entre as partículas. Essa película é formada pelo polímero, que se distribui entre os grãos e preenche parte dos vazios, originando uma estrutura mais compacta e coesa.

Na ampliação de 22× (Figura 4.26(a)), nota-se o conjunto de partículas formando um agregado estável, no qual os grãos não se encontram mais isolados como no solo arenoso. À medida que a ampliação aumenta, entre 50× e 200×, é possível distinguir uma camada fina envolvendo os contornos das partículas, o que evidencia a presença do polímero atuando como material cimentante. Essa película apresenta continuidade superficial e liga grãos de diferentes tamanhos, promovendo adesão interparticular e redução significativa da porosidade local.

Em ampliações maiores, próximas de 500× (Figura 4.26(e)), observa-se que o polímero forma filmes delgados e bem aderidos às superfícies minerais, criando zonas de contato ampliadas e eliminando vazios microscópicos. A topografia superficial mostra também a textura irregular do polímero solidificado, o que contribui para o aumento da rugosidade e do atrito interno entre partículas. Essa morfologia indica que o processo de cura permitiu o desenvolvimento de uma rede polimérica contínua, capaz de unir as partículas sem encobrir completamente a estrutura cristalina mineral, o que está em consonância com o resultado de DRX, que apontou halo amorfo discreto e picos cristalinos preservados.

O aspecto observado é característico de uma matriz híbrida cristalino–amorfa, na qual o polímero se interpõe entre os grãos de quartzo e caulinita, atuando como elemento de ligação física e conferindo maior rigidez e estabilidade microestrutural. Essa configuração explica o comportamento mecânico do compósito SP40, que apresentou maiores valores de módulo de resiliência e resistência ao cisalhamento, confirmando que o teor de 4 % promove uma dosagem ótima. A presença do polímero em quantidade suficiente para recobrir as partículas, mas sem dominar a matriz, permite um equilíbrio entre coesão e rigidez, condição essencial para o desempenho mecânico observado.

Em síntese, o MEV confirma que a adição do polímero modificou de forma significativa a organização interna do solo. A estrutura granular solta observada no material natural deu lugar a um arranjo mais compacto e interligado, com pontes de ligação entre partículas e película superficial contínua, evidenciando a formação de uma microestrutura coesa e estável resultante da ação do polímero.

4.9. MICROTOMOGRAFIA DE RAIOS X (μ CT)

A microtomografia de raios X (μ CT) foi empregada para complementar as análises microestruturais, permitindo a visualização tridimensional da distribuição interna de fases do compósito SP40. As imagens foram processadas com base no contraste de densidade, possibilitando a distinção entre partículas minerais, matriz polimérica e vazios. Na Figura 4.27 (a-c) apresenta-se a reconstrução tridimensional e os planos ortogonais do corpo de prova

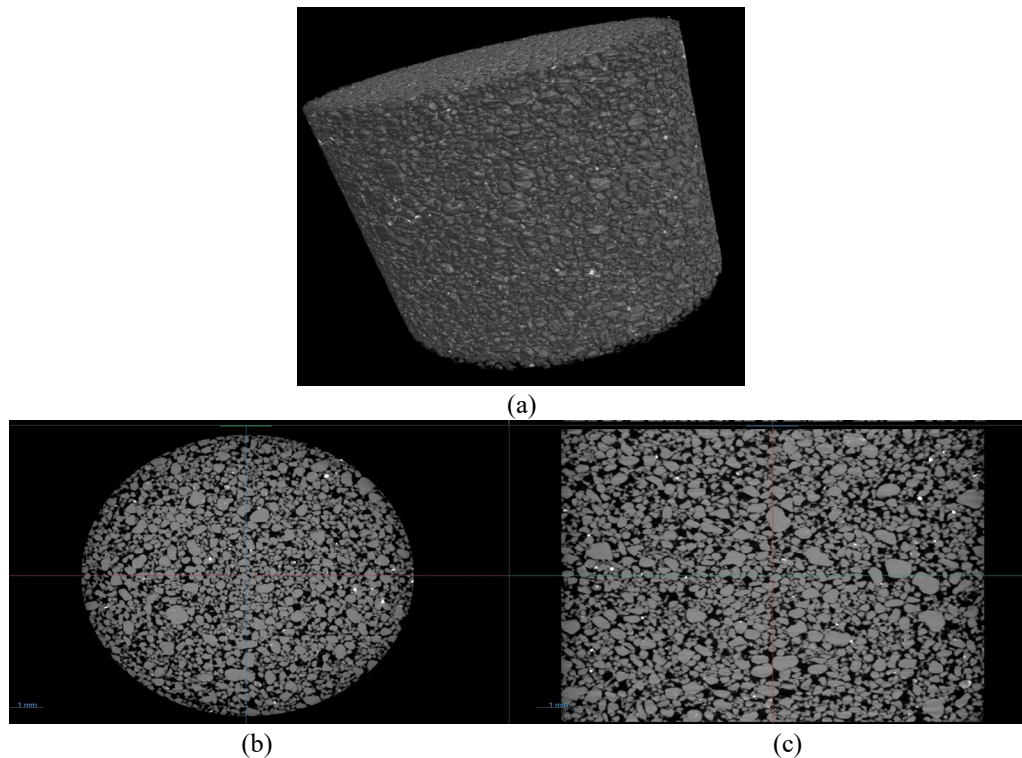


Figura 4.27. Reconstrução tridimensional e seções ortogonais do compósito SP40. (a) Corpo de prova em 3D (b) corte superior (c) corte transversal.

A segmentação das imagens indicou três classes distintas de tonalidade, associadas às diferenças de absorção do feixe de raios X. A fase cinza intermediária, predominante e responsável por aproximadamente 65,8 % do volume, corresponde à matriz mineral do solo, composta essencialmente por quartzo e caulina, conforme identificado no ensaio de DRX. Essa fase mantém o arranjo granular característico do solo arenoso original, evidenciando que o polímero não substitui a matriz mineral, mas atua sobre suas interfaces.

A fase escura ($\approx 33,9$ %) representa a combinação entre polímero e poros residuais, uma vez que ambos apresentam densidades semelhantes e não puderam ser discriminados pelo contraste tomográfico. Essa fração ocupa os espaços intergranulares, envolvendo as partículas e formando filmes e pontes poliméricas que contribuem para a coesão e para a redução da

conectividade dos vazios. Essa observação é consistente com as micrografias de MEV, nas quais se verificou a presença de películas contínuas aderidas às superfícies dos grãos, conferindo ao compósito caráter cimentado.

A fração clara ($\approx 0,3\%$), de alta densidade, foi inicialmente interpretada pelo software de segmentação como hematita; contudo, a análise de DRX não indicou a presença de óxidos de ferro cristalinos. Assim, essa pequena parcela é atribuída a partículas isoladas de alta densidade ou artefatos locais de reconstrução, sem relevância estrutural no compósito.

A análise integrada confirma que o polímero atua predominantemente como agente de ligação física, recobrando os grãos e preenchendo os interstícios, o que gera uma estrutura compacta e homogênea. A presença de uma matriz contínua e a baixa conectividade dos poros justificam o desempenho mecânico superior observado para o SP40, especialmente nos ensaios de módulo de resiliência e compressão.

Portanto, a μ CT demonstra que o teor de 4% de polímero promove uma configuração interna equilibrada, em que a matriz mineral mantém a rigidez estrutural e o polímero confere coesão e redução de vazios. Essa estrutura híbrida cristalino–amorfa resulta em um compósito denso, estável e com propriedades mecânicas otimizadas.

Na Figura 5.33 está o *QR-Code* do vídeo do ensaio de microtomografia de raio X (μ CT) realizado com SP40 para a reconstrução tridimensional e os planos ortogonais do corpo de prova.

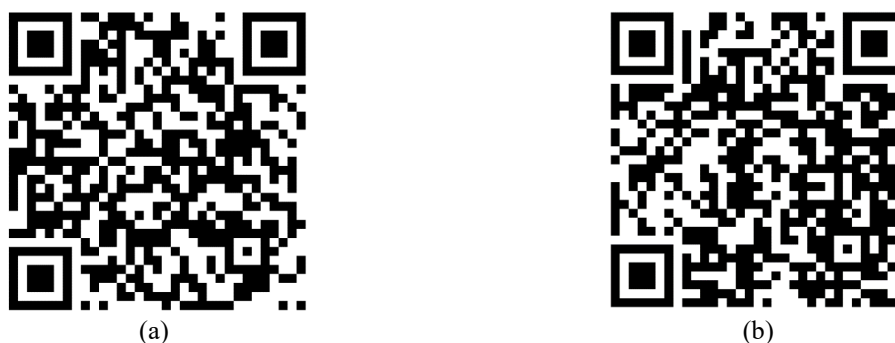


Figura 4.28. Microtomografia de raio X (μ CT) realizado com SP40. (a) Reconstrução tridimensional (b) Corte da seção ortogonal.

4.10. DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS CHAVE

Conforme descrito na metodologia, o estudo de dosagem para a determinação dos parâmetros-chave foi realizado apenas para o solo arenoso, considerando três teores de

polímero (25%, 40% e 50%), duas umidades (7% e 9%) e duas massas específicas secas (1,7 g/cm³ e 1,8 g/cm³).

Na Figura 4.29 é apresentada a curva de compactação dos compósitos juntamente com a curva da areia natural, em um mesmo gráfico, com destaque para as linhas de corte que representam as condições de umidade e massa específica selecionadas.

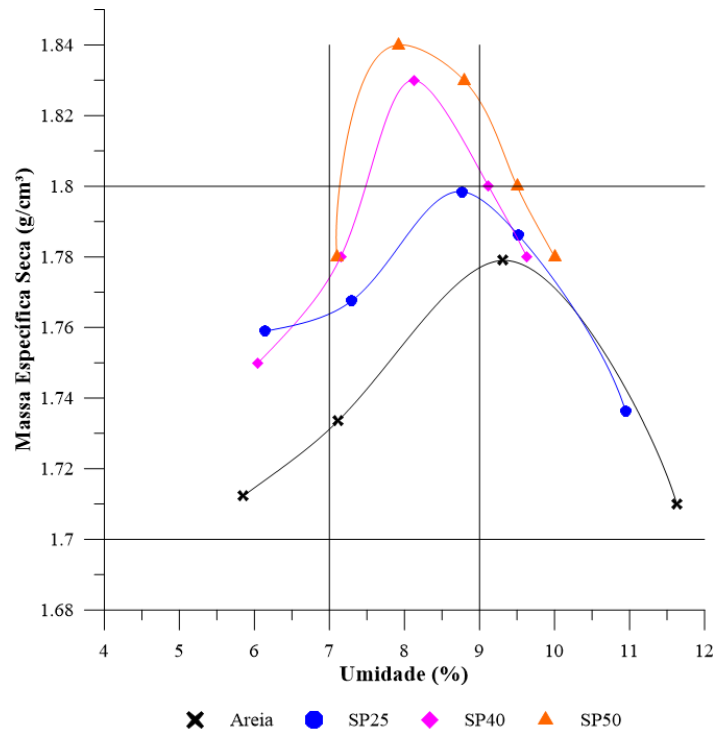


Figura 4.29. Curvas de compactação com os compósitos, areia e as variáveis trabalhadas.

Observa-se que as umidades de 7% e 9% correspondem, respectivamente, ao ramo seco e ao ramo úmido da curva de compactação, permitindo avaliar o comportamento do material em condições contrastantes de moldagem. As massas específicas secas, por sua vez, foram definidas em valores inteiros (1,7 e 1,8 g/cm³), de modo a facilitar a reprodução experimental e assegurar comparabilidade entre os diferentes teores de polímero.

Alevan (2020) adaptou a metodologia de Consoli (2007) e considerou o estudo para rejeito-polímero, contudo, pode-se utilizar a mesma metodologia para o compósito, solo-polímero, então, a porosidade (η) foi calculada pela Equação 4.1:

$$\eta = 100 - 100 \cdot \frac{\left\{ \left[\frac{P \cdot \gamma_d \cdot V_T}{(1 + P)} \cdot \frac{1}{d_p} \right] + \left[\frac{P \cdot \gamma_d \cdot V_T}{(1 + P)} \cdot \frac{1}{\rho_s} \right] \right\}}{V_T} \quad 4.1$$

onde P é o teor polimérico na amostra; γd a massa específica da amostra; dp a densidade do polímero; ρS a massa específica dos grãos de solo; VT o volume total da amostra.

Ainda seguindo Alelvan (2020) para avaliar a influência do teor de polímero em um único índice, foi proposto um novo índice chamado de teor volumétrico de polímero (P_{iv}), conforme a Equação 4.2:

$$P_{iv} = \frac{V_P}{V} = \frac{m_P/d_P}{V} \quad 4.2$$

O resultado dos ensaios à compressão simples para os compósitos para as umidades de 7% e 9%, com 1,7 e 1,8 g/cm³ de massa específica seca máxima está representado na Figura 4.30.

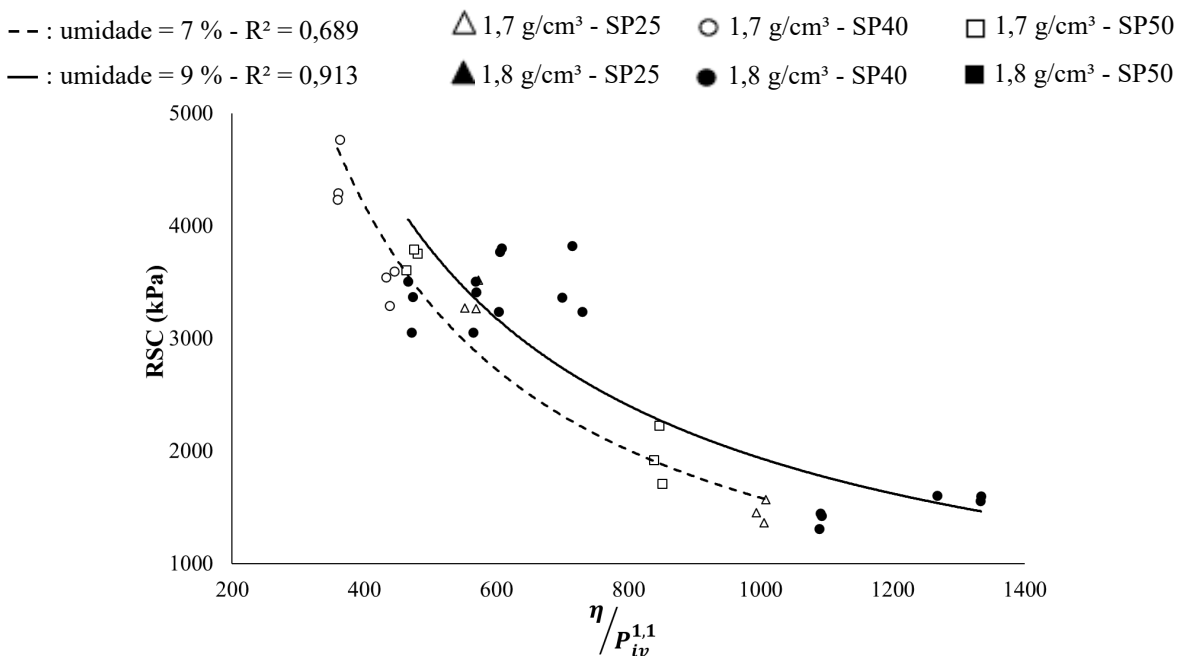


Figura 4.30. Relação da RCS com o parâmetro porosidade teor polimérico para umidades de 7% e 9%

As relações entre os dados experimentais e o índice (η/P_{iv}) proposto apresentaram coeficientes de determinação (R^2) com valores elevados. Isso indica a viabilidade do uso do índice para previsão da resistência a compressão simples para os compósitos solo polímero. As relações encontradas estão representadas nas Equações 4.3 e 4.4:

$$RSC (kPA)_{w=7\%} = 2 \cdot 10^6 \cdot \left(\frac{\eta}{P_{iv}^{1,1}} \right)^{-0,970} \quad R^2 = 0,689 \quad 4.3$$

$$RSC \text{ (kPa)}_{w=9\%} = 2 \cdot 10^6 \cdot \left(\frac{\eta}{P_{iv}^{1,1}} \right)^{-1,059} \quad R^2 = 0,913 \quad 4.4$$

Consoli *et al.* (2018b) e Alelvan (2020) demonstraram que é possível unificar a previsão do comportamento mecânico de compósitos por meio da normalização dos valores de resistência à compressão simples. Seguindo essa lógica, nesta pesquisa optou-se por dividir os resultados experimentais por um valor fixo de referência $\left(\frac{\eta}{P_{iv}^{1,1}} \right) = 800$ adotado como ponto central comum entre as curvas analisadas. A Figura 4.31 apresenta os resultados obtidos.

- SP25 - \triangle 1,7 g/cm³ - w = 7% \blacktriangle 1,8 g/cm³ - w = 9% \triangle 1,7 g/cm³ - w = 9% \blacktriangle 1,8 g/cm³ - w = 7%
- SP40 - \square 1,7 g/cm³ - w = 7% \blacksquare 1,8 g/cm³ - w = 9% \square 1,7 g/cm³ - w = 9% \blacksquare 1,8 g/cm³ - w = 7%
- SP50 - \circ 1,7 g/cm³ - w = 7% \bullet 1,8 g/cm³ - w = 9% \circ 1,7 g/cm³ - w = 9% \bullet 1,8 g/cm³ - w = 7%

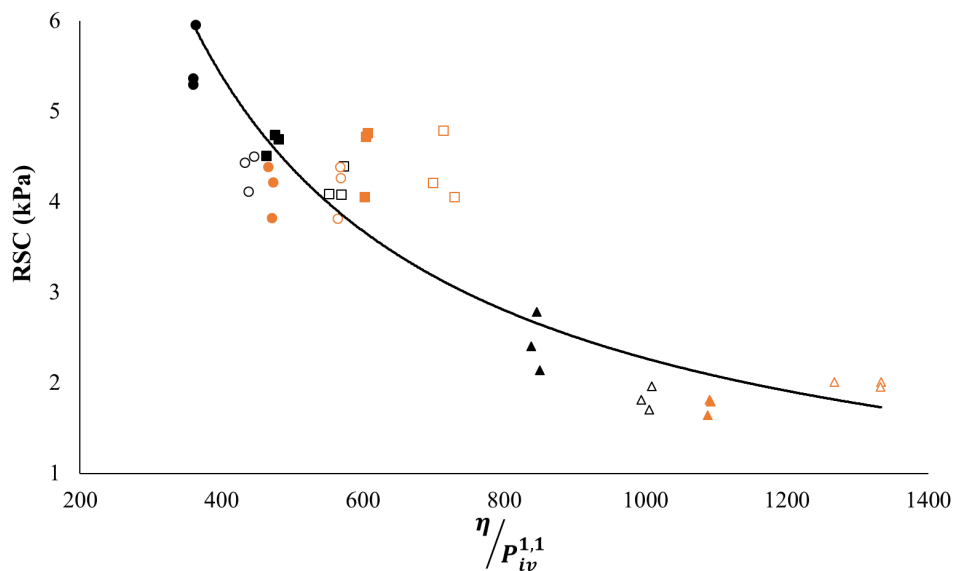


Figura 4.31. Relação da RCS normalizada para ambas as umidades.

Assim, segunda metodologia de Alelvan (2022), nos quais se observa a formação de uma curva-mestra, relacionando a resistência normalizada ao índice porosidade/teor volumétrico de polímero, mesmo tempo de cura e considerando para uma mesma curva as umidades (Equação 4.5).

$$\frac{RCS}{RCS_{\left(\frac{\eta}{P_{iv}^{1,1}} \right) = 800}} = 2 \cdot 10^6 \cdot \left(\frac{\eta}{P_{iv}^{1,1}} \right)^{-0,970} \quad R^2 = 0,786 \quad 4.5$$

Os resultados obtidos nesta pesquisa confirmam a viabilidade do método de dosagem aplicado a compósitos solo-polímero, uma vez que as equações ajustadas para as duas umidades (7% e 9%) apresentaram coeficientes de determinação elevados ($R^2 = 0,689$ e $0,913$). Esses valores são comparáveis aos reportados por Consoli *et al.* (2007, 2011, 2012, 2018), que também identificaram forte correlação entre a resistência à compressão simples e o índice porosidade/teor volumétrico de aglutinante em misturas solo-cimento, solo-cal e solo com cinzas volantes.

Ao aplicar a metodologia de normalização proposta por Alelvan (2020, 2022), os resultados desta pesquisa convergiram em uma curva-mestra única para os compósitos arenosos, com coeficiente de determinação $R^2 = 0,786$. Esse valor é compatível com os ajustes encontrados na literatura, evidenciando que o uso do índice $\eta/P_{IV}^{1,1}$ é adequado para descrever o comportamento mecânico de compósitos cimentados ou poliméricos.

Apesar das diferenças entre os agentes estabilizantes (cimento, cal, cinzas ou polímeros), observa-se que o mecanismo de controle da resistência continua associado à redução da porosidade efetiva em relação ao teor de agente estabilizante. No caso dos polímeros, verificou-se que a relação proposta se mantém válida, ainda que os processos de ganho de resistência ocorram por mecanismos físico-químicos distintos dos materiais cimentícios tradicionais.

Portanto, os resultados desta pesquisa reforçam a aplicabilidade da abordagem racional de dosagem, demonstrando que os compósitos solo-polímero podem ser tratados de forma análoga aos compósitos cimentados em termos de modelagem de resistência, ampliando as evidências já apontadas por Consoli *et al.* (2007, 2011, 2012, 2018) e colaboradores e por Alelvan (2022) e Machado (2025) em estudos recentes.

4.11. CONSIDERAÇÕES FINAIS SOBRE RESULTADOS OBTIDOS

A investigação conduzida neste capítulo concentrou-se no comportamento do solo arenoso natural e do compósito estabilizado com 4 % de solução polimérica (SP40), abrangendo ensaios de compactação, resistência à compressão simples, cisalhamento direto, módulo de resiliência, sucção total, difração de raios X (DRX), ICP-OES, microscopia eletrônica de varredura (MEV) e microtomografia de raios X (μ CT). O objetivo central foi compreender

como o polímero modifica a estrutura interna do solo arenoso e em que medida essa modificação se traduz em ganhos de resistência, rigidez e estabilidade.

Nos ensaios de compactação, o solo arenoso natural apresentou comportamento típico de material granular, com menor massa específica seca máxima e ausência de coesão significativa. Com a adição de 4 % de polímero, observou-se aumento da massa específica seca máxima e leve redução da umidade ótima, indicando melhor acomodação das partículas e redução da porosidade efetiva. A curva de compactação do SP40 tornou-se mais definida, refletindo a formação de uma matriz mais coesa e menos sensível à variação de umidade de moldagem.

A resistência à compressão simples (RCS) do compósito SP40 apresentou crescimento expressivo com o tempo de cura, passando de cerca de 0,5 MPa aos 2 dias para aproximadamente 2,5 MPa aos 30 dias. As curvas tensão–deformação evidenciaram aumento da rigidez inicial e deslocamento do pico de resistência para menores deformações, indicando estrutura progressivamente mais rígida e coesa. As observações visuais após a ruptura confirmaram essa evolução, com corpos de prova inicialmente mais deformáveis e fissurados evoluindo para amostras maciças, com planos de ruptura bem definidos e aspecto de material cimentado. Esses resultados mostram que, mesmo com um único teor de polímero, o tempo de cura exerce papel decisivo no desenvolvimento da resistência e na consolidação da matriz solo–polímero.

No ensaio de cisalhamento direto, o solo arenoso natural apresentou baixa coesão e resistência governada essencialmente pelo atrito entre grãos. Já o SP40 exibiu ganho sistemático de intercepto coesivo (c') e estabilização do ângulo de atrito efetivo (ϕ') em torno de 35° , à medida que o tempo de cura avançava. A partir de 2 dias, surgiram picos de resistência bem definidos e, a partir de 7–15 dias, o material passou a apresentar comportamento típico de compósito parcialmente cimentado, com aumento rápido da tensão de cisalhamento até o pico e queda moderada pós-pico. Aos 45 dias, a coesão atingiu valores próximos de 400 kPa, mantendo ϕ' praticamente constante, o que indica que o polímero atua principalmente como agente cimentante, aumentando a coesão global sem alterar de forma significativa o mecanismo de atrito interno, que continua dominado pela estrutura granular arenosa.

Os resultados de módulo de resiliência (MR) obtidos em ensaios triaxiais cíclicos mostraram que o SP40 apresentou valores sistematicamente superiores aos do solo natural em todas as idades de cura. Enquanto o solo arenoso apresentou MR entre 100 e 230 MPa, o

compósito alcançou valores entre aproximadamente 250 e 1200 MPa, com crescimento consistente entre 7 e 45 dias. Os ajustes ao modelo em função da tensão confinante (σ_3) e ao modelo universal de Svenson (1980) apresentaram coeficientes de determinação elevados, indicando que o comportamento resiliente do compósito é bem descrito por modelos clássicos aplicados a materiais estabilizados. O aumento progressivo dos parâmetros de regressão com o tempo de cura reforça a interpretação de que a rede polimérica se consolida ao longo dos dias, reduzindo deformações permanentes e aumentando a capacidade de recuperação elástica.

A determinação da sucção total mostrou que, após o período inicial de estabilização hídrica, o compósito SP40 manteve valores praticamente constantes de potencial matricial ao longo do tempo de cura, em faixa semelhante à observada em estudos anteriores com o mesmo solo arenoso estabilizado com polímero. A ausência de variações significativas de sucção entre 7 e 45 dias indica que o ganho de resistência e rigidez não está associado ao aumento da sucção, mas sim ao avanço das ligações físico-químicas entre o polímero e as partículas minerais. Em outras palavras, uma vez atingido o equilíbrio hídrico, o comportamento mecânico passa a ser governado pela estrutura da matriz polimérica e não pela redistribuição de água nos poros.

As análises de DRX e ICP-OES confirmaram que tanto o solo arenoso quanto o compósito SP40 apresentam composição essencialmente silicosa, dominada por quartzo e com presença subordinada de caulinita e óxidos de ferro. O difratograma do SP40 manteve os picos de quartzo e caulinita, com halo amorfo discreto associado à fase polimérica, evidenciando que o polímero não altera a mineralogia de base, mas se organiza como fase amorfa distribuída entre os grãos. Os resultados de ICP-OES mostraram que a composição química inorgânica do SP40 permanece muito próxima à da areia natural, enquanto o polímero Terrafix apresenta caráter eminentemente orgânico, corroborando a interpretação de que os ganhos de resistência decorrem de mecanismos de recobrimento e ponteamto entre partículas, e não de neoformação mineral.

As micrografias obtidas por MEV reforçaram a mudança microestrutural introduzida pelo polímero. O solo natural apresentou grãos soltos, sem material cimentante, com contatos pontuais e elevada porosidade intergranular. No SP40, observou-se a formação de filmes poliméricos aderidos às superfícies dos grãos, preenchendo vazios, conectando partículas e formando agregados mais compactos. Em maiores ampliações, esses filmes mostraram continuidade e boa aderência às superfícies minerais, evidenciando o papel do polímero como matriz ligante que transforma a estrutura granulosa solta em um compósito híbrido cristalino–amorfo.

A microtomografia de raios X (μ CT) complementou essas observações, permitindo avaliar a distribuição volumétrica de fases no corpo de prova de SP40. As reconstruções tridimensionais e os planos ortogonais mostraram uma estrutura interna homogênea, com matriz mineral predominante envolvida por fase de menor densidade associada ao polímero e poros residuais, e baixa conectividade entre vazios. A porosidade total obtida foi baixa e a ausência de trincas internas ou grandes vazios contínuos confirma que o processo de moldagem e cura, aliado à ação do polímero, resultou em um compósito denso e estruturalmente estável.

Por fim, o estudo de dosagem demonstrou que a resistência à compressão simples do compósito solo-polímero pode ser correlacionada de forma racional com a relação entre porosidade e teor volumétrico de polímero, com coeficientes de determinação elevados. A normalização dos resultados permitiu a construção de uma curva-mestra, em linha com abordagens consolidadas para misturas solo-aglomerante cimentício, indicando que o mesmo conceito é aplicável a compósitos solo-polímero. Esse resultado reforça que a resistência mecânica é controlada, em última instância, pela quantidade de vazios remanescentes em relação ao volume de material ligante presente na matriz.

De forma integrada, o conjunto de resultados obtidos neste capítulo demonstra que a adição de 4 % de polímero ao solo arenoso natural promove uma transformação profunda da microestrutura, reduzindo a porosidade, introduzindo coesão, elevando a resistência ao cisalhamento, o módulo de resiliência e a resistência à compressão, sem depender de variações de sucção. O compósito SP40 se consolidou, assim, como solução tecnicamente eficiente e microestruturalmente estável para aplicações geotécnicas em camadas de pavimentos, representando um ponto de equilíbrio entre rigidez, resistência e capacidade de deformação, ao mesmo tempo em que é compatível com metodologias racionais de dosagem e com modelos clássicos de comportamento resiliente.

RESULTADOS E DISCUSSÕES: BENTONITA E COMPÓSITO BENTONITA-POLÍMERO

Este capítulo apresenta os resultados obtidos para a bentonita natural e para os compósitos formados com a adição da solução polimérica. Foram realizados ensaios de caracterização física, química, mineralógica e microestrutural, além de ensaios mecânicos de compactação, resistência à compressão não confinada e cisalhamento direto.

A discussão dos resultados tem por objetivo analisar o comportamento da bentonita e identificar as modificações promovidas pela estabilização polimérica. A abordagem comparativa em relação ao solo arenoso permite compreender a influência do tipo de solo sobre a atuação do polímero, evidenciando as diferenças de desempenho e de evolução microestrutural entre materiais de natureza granular e argilosa

5.1. COMPACTAÇÃO DA BENTONITA E COMPÓSITO

Foram realizados os ensaios de Limites de Atterberg para a bentonita e os compósitos, B25 e B50, para caracterização inicial os resultados estão compilados na Tabela 5.1:

Tabela 5.1. Limites de Attemberg bentonita e compósitos.

Material	LL (%)	LP (%)	IP (%)
B	462	43	420
B25	323	105	218
B50	210	83	127

A Tabela 5.1 apresenta os limites de consistência obtidos para a bentonita natural e para os compósitos B25 e B50. Observa-se redução expressiva do limite de liquidez (LL) com o aumento do teor polimérico, de 462 % na bentonita pura para 323 % em B25 e 210 % em B50. Essa diminuição indica que a mistura requer menor teor de água para atingir o estado líquido, o que evidencia uma redução da expansibilidade e da capacidade de absorção de água da fração argilosa. O polímero, ao recobrir as partículas de montmorilonita, restringe a hidratação livre das lamelas e limita o aumento da dupla camada difusa, estabilizando o sistema em teores de umidade mais baixos.

O limite de plasticidade (LP), por sua vez, apresenta variação distinta: ele se eleva de 43 % na bentonita natural para 105 % em B25 e reduz levemente para 83 % em B50. O aumento inicial de LP reflete a melhora da trabalhabilidade promovida pelo polímero, que possibilita a moldagem do material em uma faixa mais ampla de umidades sem ruptura da estrutura. Já a leve redução observada para B50 sugere o início de um comportamento mais rígido, em que o excesso de polímero tende a formar películas contínuas e menos deformáveis, restringindo novamente a plasticidade.

O índice de plasticidade ($IP = LL - LP$), portanto, diminui drasticamente de 420 % para 218 % e 127 %. Essa redução mostra que os compósitos são menos sensíveis à variação de umidade e que a transição entre os estados plástico e líquido ocorre de maneira mais controlada. Em termos geotécnicos, isso significa que o polímero modifica o regime de deformação volumétrica e a energia necessária para a dispersão das partículas, tornando o material mais estável sob diferentes condições de umidade e reduzindo o potencial de expansão livre.

Essas alterações nos limites de Atterberg se refletem diretamente nas curvas de compactação apresentadas na Figura 5.1.

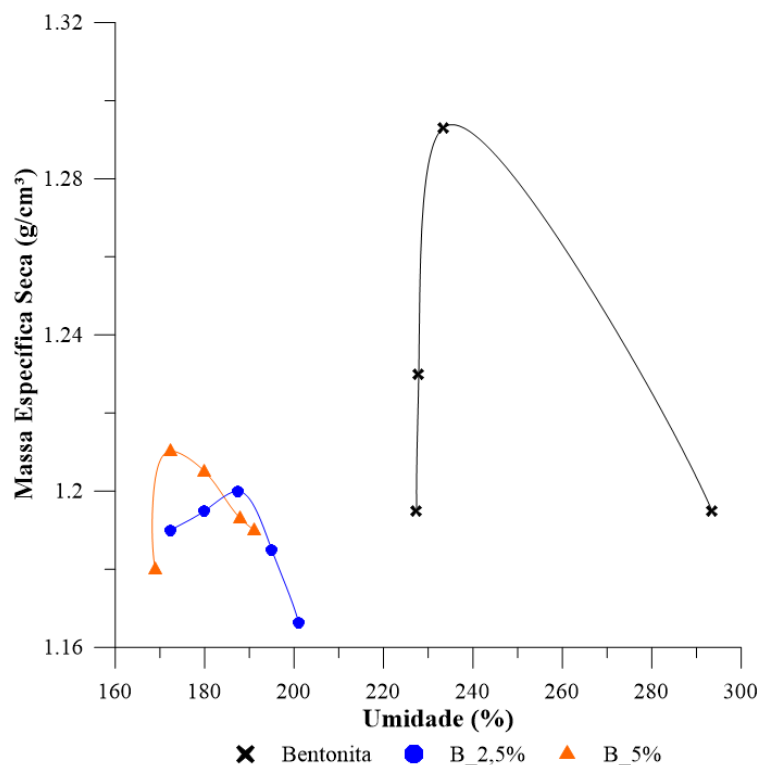


Figura 5.1 Curva de Compactação Bentonita e compósitos (B25 e B50).

Enquanto a bentonita natural atinge sua maior densificação em umidades extremamente elevadas ($\approx 230\text{--}235\%$), os compósitos estabilizados requerem menores teores de água para atingir moldagem estável: cerca de 190% para B25 e 175% para B50. Em outras palavras, a redução do LL e do IP observada nos ensaios de consistência se traduz em deslocamento das curvas de compactação para a esquerda, indicando que o material passa a atingir o estado plástico adequado em umidades mais baixas.

Além disso, a ligeira redução da densidade seca máxima dos compósitos em relação à bentonita pura (de $\approx 1,29\text{ g/cm}^3$ para $\approx 1,20\text{--}1,22\text{ g/cm}^3$) não representa perda de desempenho, mas sim mudança no mecanismo de estruturação interna. O polímero ocupa parte dos poros e age como ponte entre as partículas, permitindo a formação de uma matriz contínua e coesa sem necessidade de densificação extrema. O comportamento obtido nas curvas confirma, portanto, que o polímero não apenas reduz a plasticidade e a sensibilidade hídrica da bentonita, mas também amplia a faixa de moldagem segura e melhora a integridade estrutural dos corpos de prova.

Dessa forma, as curvas de compactação e os limites de consistência demonstram de maneira convergente o papel estabilizador do polímero na matriz bentonítica. A adição do agente polimérico não apenas desloca a faixa de moldagem para menores teores de umidade, como também promove maior estabilidade volumétrica e integridade estrutural do material. Esses resultados fundamentam as análises mecânicas apresentadas nas seções seguintes, nas quais se avalia o efeito da estabilização sobre a resistência e o comportamento deformacional dos compósitos.

5.2. ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO NÃO CONFINADA

Na Figura 5.2 (a-b) apresenta-se os corpos de prova dos compósitos bentoníticos B25 e B50 nos estágios iniciais de cura (2 e 5 dias), antes da realização do ensaio de compressão não confinada. Observa-se, em ambos os compósitos, um processo evidente de retração volumétrica ao longo do tempo, manifestado pelo surgimento de trincas superficiais distribuídas em toda a altura dos corpos de prova. Essas trincas apresentam orientação predominantemente vertical, com pequenas inclinações locais, e se formam em decorrência da contração do material durante o processo de secagem.



(a)



(b)

Figura 5.2. Corpos de prova B25 e B50 (a) 2 dias de cura; (b) 5 dias de cura.

A retração está associada à perda gradual de água livre após a moldagem, o que provoca aproximação entre as partículas e redução do volume total do corpo de prova. Esse comportamento é típico de materiais de alta plasticidade e é especialmente acentuado em sistemas com elevada fração de finos ativos, como a bentonita. Contudo, dois aspectos são importantes: (i) apesar das trincas de retração, os corpos de prova mantêm sua forma cilíndrica e não se desagregam; e (ii) as fissuras não se configuram como planos de ruptura, mas sim como aberturas superficiais localizadas. Em outras palavras, mesmo retraindo, o material permanece coeso como uma estrutura única e contínua.

Essa resposta indica que o polímero atua de forma eficaz como agente de ligação entre os agregados argilosos. Sem essa ação, a retração volumétrica tenderia a causar o destacamento de fragmentos e o colapso do corpo de prova já nas primeiras idades de cura. Nos compósitos B25e B50, observa-se o oposto: a retração ocorre, mas o polímero confere coesão suficiente para manter o corpo de prova íntegro e manuseável. Assim, o polímero não impede a retração — que é inerente à perda de umidade —, mas controla seus efeitos, garantindo a integridade estrutural do material.

Além disso, as imagens permitem observar o início do enrijecimento superficial com o aumento do tempo de cura. Aos 2 dias, as amostras apresentam aspecto plástico e brilho úmido, indicando a presença de água livre. Aos 7 dias, as superfícies tornam-se mais opacas e as

fissuras mais marcadas, sugerindo a redução da umidade e o início da estruturação interna do compósito. Esse comportamento está diretamente relacionado à formação da matriz solo-polímero, que promove maior coesão entre as partículas e prepara o material para suportar tensões crescentes.

Em síntese, as observações visuais indicam que: há retração volumétrica significativa logo nos primeiros dias de cura, controlada pela perda de umidade; o polímero garante coesão interna suficiente para evitar a desagregação do corpo de prova; a evolução do aspecto superficial e o aumento da rigidez ao toque sugerem o início do processo de polimerização e estruturação da matriz, que será confirmado pelos resultados mecânicos subsequentes.

Na Figura 5.3 apresenta-se as curvas tensão-deformação obtidas para o compósito B25 nas idades de 7, 15, 30 e 45 dias de cura, enquanto na Tabela 5.2 compila-se os valores de RCS para cada tempo de cura. Observa-se uma evolução expressiva da resistência à compressão não confinada, que cresce de forma progressiva com o aumento do tempo de cura, acompanhada de mudanças no comportamento deformacional.

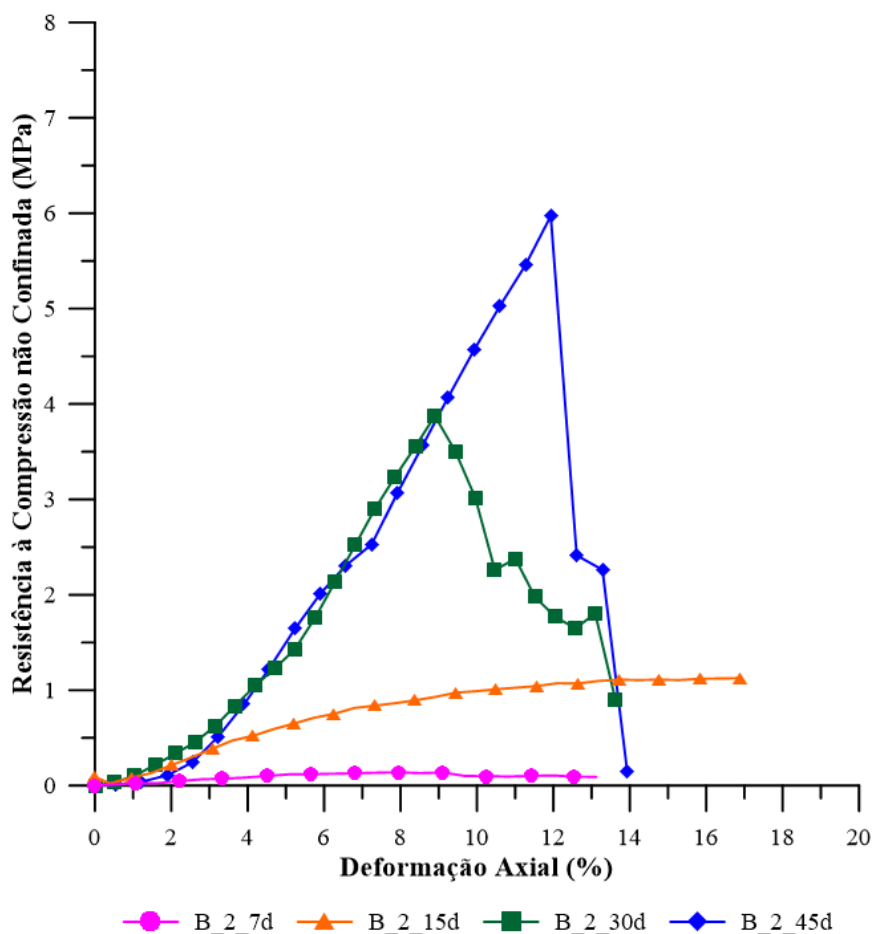


Figura 5.3. Curvas tensão-deformação para B25.

Tabela 5.2. Resultados de RCS para B25 em diferentes tempos de cura.

Valores referentes ao pico	RCS (kPa)	RCS (MPa)
B25 (7° Dia)	139,61	0,14
B25 (15° Dia)	1122,99	1,13
B25 (30° Dia)	3952,81	3,95
B25(45° Dia)	6429,04	6,43

Na Figura 5.4 (a-d) mostra os corpos de prova após a ruptura para 7, 15, 30 e 45 dias:

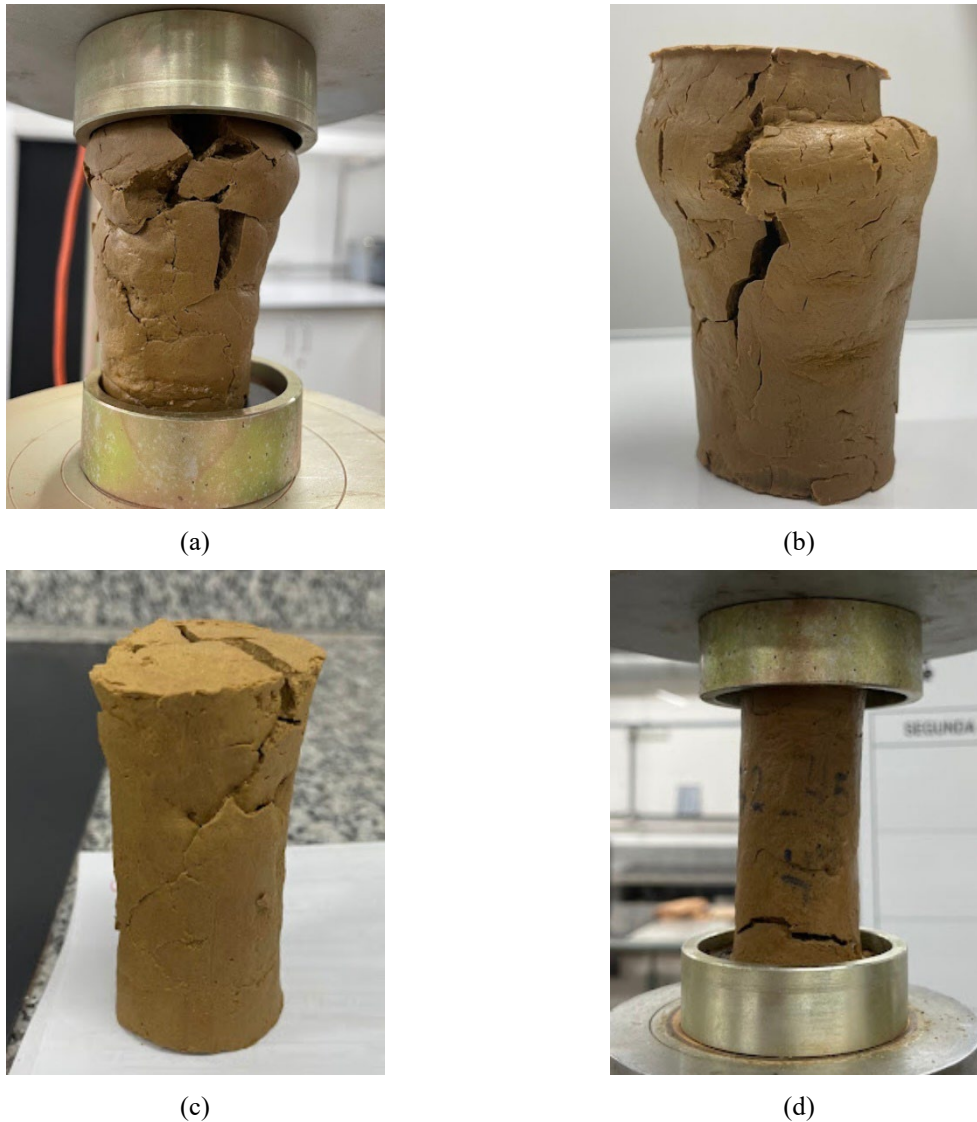


Figura 5.4. Corpos de prova B25 após a ruptura. (a) 7 dias; (b) 15 dias; (c) 30 dias; (d) 45 dias.

Aos 7 dias, o compósito apresenta resistência praticamente nula e comportamento predominantemente plástico, sem pico de ruptura definido. Esse resultado indica que o processo de polimerização ainda se encontra em estágio inicial, e o polímero não forma, nessa fase, uma rede contínua de ligações que promova ganho de coesão. Aos 15 dias, verifica-se um aumento

discreto de resistência (≈ 1 MPa), com curva de resposta dúctil e ausência de colapso abrupto, sugerindo o início da estruturação da matriz bentonita-polímero e maior integração entre as partículas de bentonita.

A partir dos 30 dias, o material passa a apresentar comportamento típico de materiais frágeis, com resistência máxima em torno de 4 MPa, seguida de queda acentuada de tensão após o pico. Esse comportamento evidencia a formação de uma estrutura interna rígida, com menor capacidade de deformação plástica e maior rigidez inicial, resultado do avanço da polimerização e da redução de água intersticial. Aos 45 dias, a resistência máxima atinge aproximadamente 6 MPa, representando um ganho de cerca de 50% em relação aos 30 dias. A curva apresenta trecho elástico mais inclinado e ruptura bem definida, o que demonstra a consolidação da matriz cimentante e a predominância de ligações estáveis entre as partículas.

As imagens pós-ruptura Figura 5.4 (a-d) confirmam essa evolução microestrutural. Aos 7 e 15 dias, os corpos de prova exibem trincas superficiais e deformações distribuídas, sem separação de blocos ou fragmentação. Aos 30 e 45 dias, as rupturas tornam-se mais localizadas, com formação de planos de falha contínuos, revelando comportamento frágil e coeso. Apesar das fissuras de retração observadas durante a cura, os corpos de prova mantêm integridade estrutural, indicando que o polímero atua de forma eficiente na ligação entre as partículas, mesmo em altos teores de umidade inicial.

De modo geral, o compósito B25 apresentou ganhos progressivos de resistência e rigidez ao longo da cura, alcançando comportamento mecânico característico de materiais cimentados. Essa evolução comprova a eficácia do polímero em promover uma rede de ligação entre as partículas da bentonita, substituindo parcialmente o papel da água como agente de coesão e conferindo estabilidade volumétrica após a perda de umidade. O padrão de ruptura e a forma das curvas reforçam que, após 30 dias, o material atinge estágio de maturação estrutural avançado, com propriedades compatíveis a um compósito solo-polímero consolidado.

A Figura 5.5 apresenta as curvas tensão-deformação do compósito B50 para os tempos de cura de 7, 15, 30 e 45 dias, enquanto na Tabela 5.3 compila-se os valores de RCS para cada tempo de cura. O comportamento observado é semelhante ao verificado para o compósito B25, com evolução progressiva da resistência e da rigidez ao longo do tempo, mas com intensidades distintas e alterações na ductilidade do material.

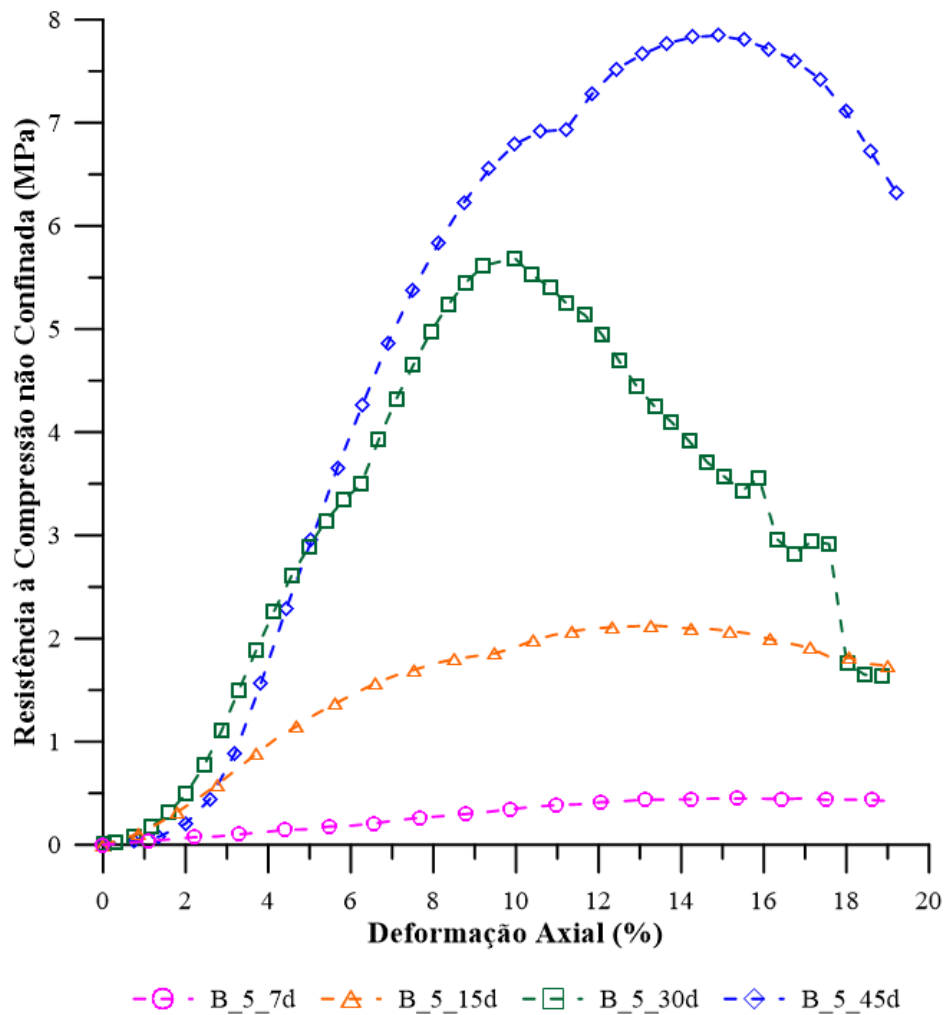


Figura 5.5. Curva tensão- deformação para B50.

Tabela 5.3. Resultados de RCS para B50 em diferentes tempos de cura.

Valores referentes ao pico	RCS (kPa)	RCS (MPa)
B50 (7° Dia)	455,54	0,46
B50 (15° Dia)	2126,76	2,13
B50 (30° Dia)	5688,03	5,69
B50 (45° Dia)	7845,61	7,85

Na Figura 5.4 (a-d) mostra os corpos de prova após a ruptura para 7, 15, 30 e 45 dias:



Figura 5.6. Corpos de prova B50 após ruptura. A partir do primeiro plano: 45, 30, 15 e 7 dias, respectivamente.

Aos 7 dias, o compósito apresenta resistência muito baixa e comportamento essencialmente plástico, sem pico definido de ruptura, resultado da alta umidade residual e do estágio inicial de polimerização. O material ainda apresenta características viscoelásticas e elevada deformabilidade, com resposta semelhante à da bentonita pura. Aos 15 dias, observa-se aumento expressivo na resistência, atingindo cerca de 1,5 MPa, e o surgimento de um ponto de inflexão na curva, indicando início de rigidez estrutural e formação parcial da matriz solo-polímero. O comportamento permanece predominantemente dúctil, mas com menor deformação total até a ruptura, em comparação com o B25 no mesmo período.

A partir dos 30 dias, o ganho de resistência torna-se mais acentuado, atingindo valores próximos de 5 MPa, com o aparecimento de um pico de ruptura bem definido seguido por queda gradual de tensão. Esse comportamento reflete a consolidação das ligações poliméricas e a transição para uma resposta mais frágil, típica de materiais cimentados. Aos 45 dias, a resistência máxima ultrapassa 7 MPa, representando o valor mais elevado entre todos os compósitos bentoníticos. A curva apresenta trecho elástico mais pronunciado, módulo de deformabilidade superior e redução da deformação axial na ruptura, indicando estrutura interna altamente rígida e densamente interligada.

As imagens pós-ruptura (Figura 5.6) corroboram essa interpretação. Nota-se que os corpos de prova de 7 e 15 dias exibem trincas distribuídas e deformações generalizadas, mantendo a coesão mesmo após o ensaio. Já aos 30 e 45 dias, observa-se ruptura abrupta e fragmentação do corpo de prova em blocos maiores, evidenciando comportamento frágil e

colapso localizado. O plano de ruptura é bem definido, com separação nítida das faces, o que demonstra a elevada rigidez e a baixa capacidade de deformação plástica no estágio avançado de cura.

O aspecto superficial dos corpos de prova também se altera com o tempo. Aos 7 e 15 dias, a superfície apresenta brilho e textura lisa, indicativos de umidade livre; aos 30 e 45 dias, o material se torna mais opaco e áspero, refletindo a perda de água e o endurecimento progressivo da matriz. Essa evolução sugere que o polímero não apenas atua como agente cimentante, mas também contribui para a redistribuição das tensões internas durante a secagem, minimizando a ocorrência de fissuras profundas.

De forma geral, o compósito B50 apresenta desempenho superior ao B25 em todas as idades de cura, tanto em resistência quanto em rigidez. O aumento do teor polimérico promove maior interconexão entre as partículas e redução dos poros, favorecendo a formação de uma matriz mais densa e estável. Entretanto, o comportamento também se torna mais frágil com o tempo, o que indica que o excesso de polímero reduz a capacidade de deformação e aumenta a rigidez global do sistema.

Na Figura 5.7 está representado o gráfico comparativo das duas dosagens, B25 e B50, demonstrando o RSC (MPa) por tempo de cura:

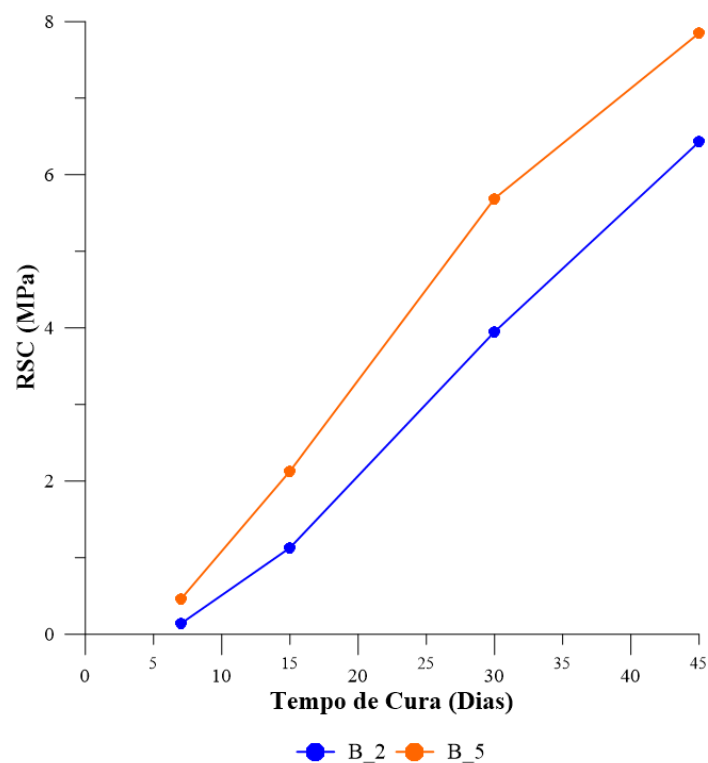


Figura 5.7. Valor RCS (MPa) por tempo de cura para os compósitos bentoníticos.

A comparação entre os compósitos B25 e B50 evidencia a influência direta do teor polimérico sobre o comportamento mecânico e o desenvolvimento da resistência com o tempo de cura. Ambos apresentaram tendência semelhante de evolução, com aumento progressivo da resistência à compressão não confinada e da rigidez estrutural, porém com magnitudes distintas e diferenças relevantes no modo de deformação e ruptura.

Nos estágios iniciais de cura (7 e 15 dias), tanto o B25 quanto o B50 exibiram baixa resistência e comportamento predominantemente plástico, caracterizado por deformações elevadas e ausência de pico de ruptura bem definido. Contudo, o compósito B50 demonstrou desempenho ligeiramente superior, alcançando valores de resistência mais elevados já aos 15 dias, o que indica que a maior disponibilidade de polímero acelerou a formação de pontes intergranulares e reduziu a mobilidade da água no sistema.

Aos 30 e 45 dias, as diferenças entre as dosagens tornam-se mais evidentes. O B25 atingiu resistência máxima próxima de 6 MPa, enquanto o B50 ultrapassou 7 MPa, revelando que o aumento do teor polimérico promove maior coesão e rigidez da matriz solidificada. Entretanto, essa elevação de resistência foi acompanhada de uma redução significativa na ductilidade: o B50 apresentou ruptura mais abrupta, com menor deformação axial e colapso localizado, ao passo que o B25 manteve comportamento mais plástico e dissipativo.

As imagens pós-ruptura confirmam essa interpretação. No compósito B25, as trincas são predominantemente verticais, com leve inclinação e distribuição homogênea, preservando a integridade global do corpo de prova mesmo após a ruptura. Já o B50 apresenta planos de ruptura bem definidos e fragmentação mais intensa, indicando comportamento mais frágil e estrutura interna densamente cimentada, típica de materiais com elevado grau de ligação polimérica.

Um aspecto relevante é que, diferentemente do observado para os compósitos de matriz arenosa, não se identificou tendência de estabilização da resistência ao longo do tempo de cura. O gráfico da Figura 5.7 evidencia um crescimento praticamente linear de RCS para ambos os compósitos bentoníticos até 45 dias, sem indícios de platô. Esse comportamento sugere que, na matriz argilosa, a cura atua de forma mais contínua e prolongada, provavelmente associada à reestruturação interna das lamelas de montmorilonita e ao avanço gradual das interações físico-químicas entre o polímero e as superfícies ativas da bentonita.

Nos compósitos de matriz arenosa, por outro lado, discutidos no capítulo anterior, verificou-se estabilização da resistência após 30 dias, indicando que a ação do polímero se

restringe predominantemente à fase inicial de cura, até a completa secagem e formação do filme polimérico. Assim, o comportamento dos compósitos bentoníticos reforça a natureza distinta das interações: enquanto nos arenosos o polímero atua essencialmente como agente cimentante, nos argilosos ele participa ativamente da estrutura coloidal, promovendo reorganizações internas mesmo em estágios avançados de cura.

Esse contraste revela a forte dependência entre o tipo de matriz e a cinética de desenvolvimento da resistência, demonstrando que a estabilização polimérica em solos finos tende a apresentar caráter progressivo e de longo prazo, sem o esgotamento rápido observado nas misturas arenosas.

De modo geral, a análise comparativa demonstra que a resistência e a rigidez aumentam com o teor de polímero, mas à custa de uma redução da tenacidade e da capacidade de deformação. Assim, considerando o conjunto dos resultados mecânicos e visuais, o compósito B25 apresenta comportamento mais equilibrado, conciliando resistência significativa com maior ductilidade, enquanto o B50 mostra-se mais rígido e frágil, associado a uma estrutura altamente cimentada.

Além disso, observa-se que, diferentemente das misturas arenosas, nas quais a evolução da resistência tende à estabilização após os primeiros estágios de cura, os compósitos bentoníticos mantêm crescimento contínuo da resistência ao longo do tempo, sem indícios de platô. Essa diferença evidencia que, nas misturas argilosas, o polímero atua de forma mais persistente, promovendo reestruturações internas progressivas que contribuem para o adensamento e a consolidação da matriz ao longo do tempo.

Esse comportamento reforça a influência decisiva da natureza da matriz sobre o mecanismo de estabilização, sugerindo que os compósitos poliméricos em solos finos possuem potencial de evolução mecânica prolongada, dependente não apenas da secagem, mas também da interação contínua entre o polímero e as superfícies minerais. Tal característica confere ao material uma resposta diferenciada sob carregamentos e condições de umidade variáveis, o que será fundamental para compreender seus mecanismos de resistência em diferentes estados de tensão.

5.3. ENSAIO DE CISALHAMENTO DIRETO

Para o ensaio de cisalhamento direto, não foi possível realizar os testes com a bentonita natural na umidade ótima, sem estabilização, devido à elevada plasticidade do material. Assim que se aplicava a carga normal inicial, o solo extravasava lateralmente da caixa de cisalhamento (Figura 5.8a), impossibilitando a condução do ensaio. Situação semelhante foi observada nos compósitos B25 e B50 nos tempos de 0 e 1 dia de cura (Figura 5.8b), uma vez que, nos estágios iniciais, a adição do polímero confere ao material aspecto pastoso, com baixa resistência ao cisalhamento e ausência de atrito entre partículas. Somente a partir de 2 dias de cura foi possível a execução dos ensaios, quando o polímero já havia iniciado o processo de estruturação da matriz e conferido coesão mínima ao compósito. Contudo para B25 para a tensão normal de 400kPa não foi possível obter resultados, pois o material também extravasava.

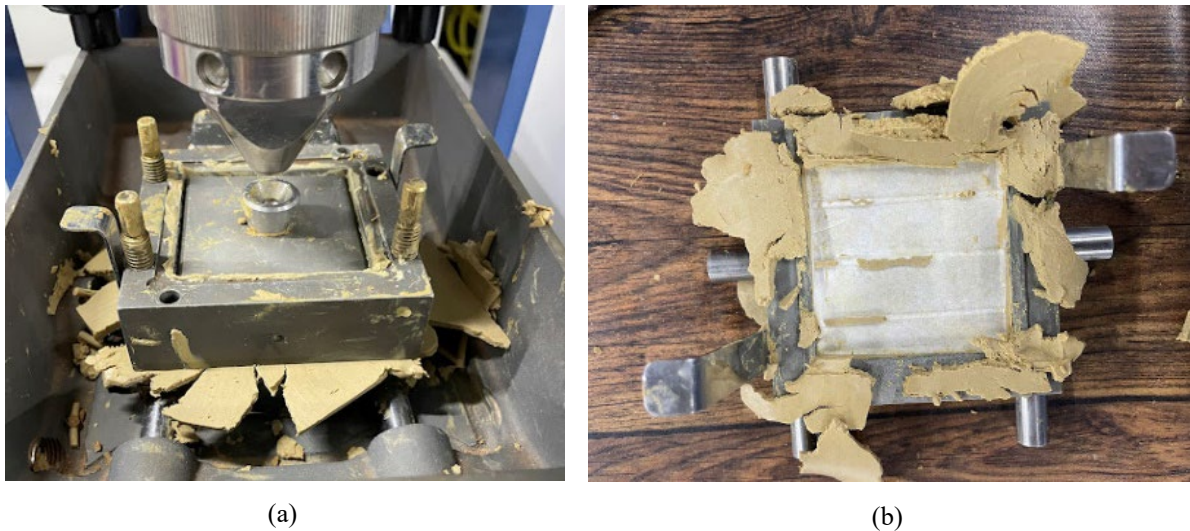


Figura 5.8. Material extravasando lateralmente a caixa de cisalhamento. (a) Bentonita; (b) B25_1 dia

Nas Figura 5.9(a-f) são representadas as curvas tensão de cisalhamento por deslocamento horizontal para cada tempo de cura e para aplicação das tensões normais para B25. As curvas de tensão de cisalhamento (kPa) em função do deslocamento horizontal (mm) para o compósito B25 (Figura 5.9(a-f)) evidenciam o comportamento característico de um solo fino estabilizado quimicamente, cujo desenvolvimento de resistência é governado pela coesão aparente e pela evolução da estrutura interna ao longo da cura.

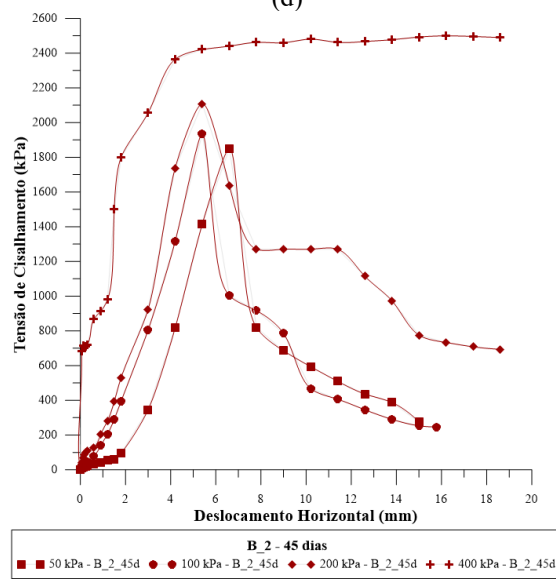
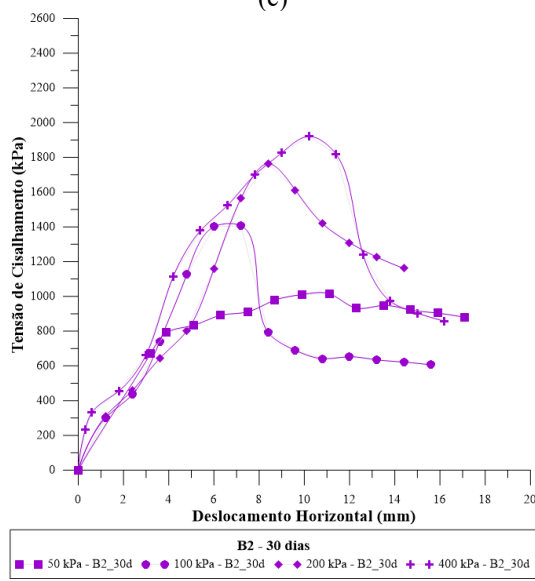
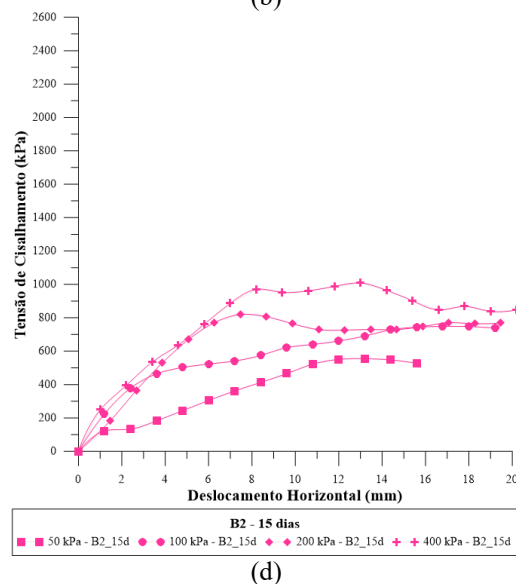
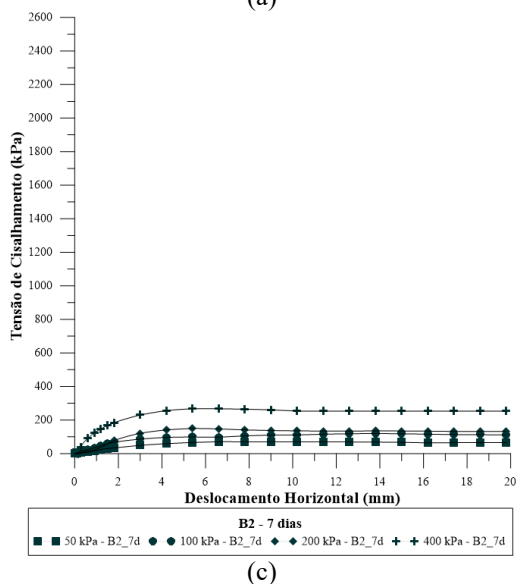
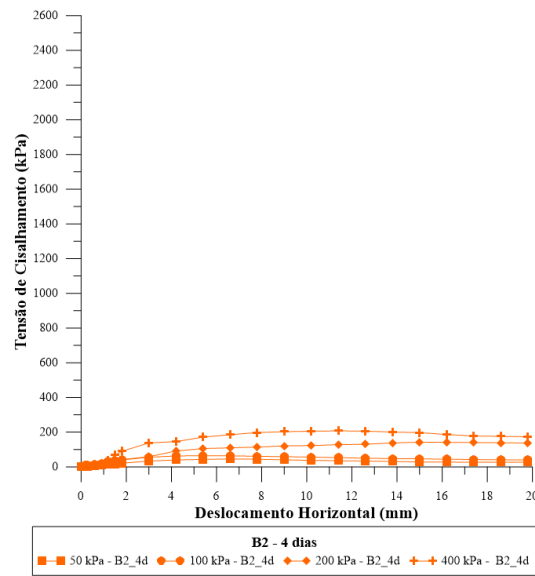
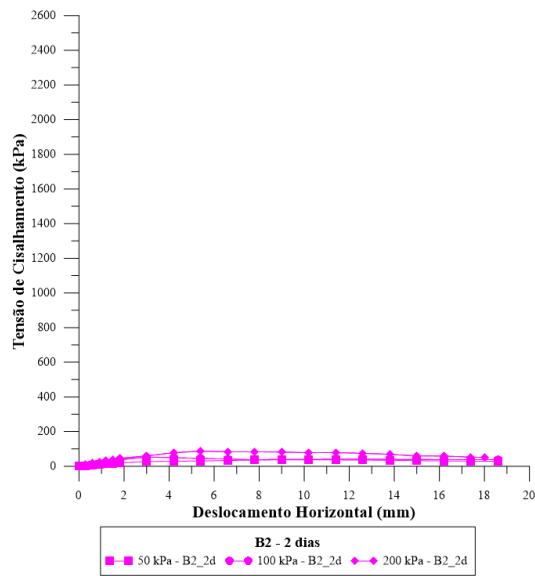


Figura 5.9. Curvas tensão de cisalhamento por deformação horizontal para aplicação das tensões normais de 50 kPa, 100 kPa, 200 kPa e 400 kPa para B50 (a) 2 dias de cura; (b) 4 dias de cura; (c) 7 dias de cura; (d) 15 dias de cura; (e) 30 dias de cura; (f) 45 dias de cura.

Nos primeiros dias (2 e 4 dias), observa-se um comportamento tipicamente plástico, com aumento gradual da tensão de cisalhamento e ausência de pico definido, o que indica estrutura ainda não consolidada. Segundo Lambe e Whitman (1969), esse tipo de resposta é comum em materiais de alta plasticidade, nos quais a resistência inicial é dominada pela interação eletrostática entre partículas e pela viscosidade da água adsorvida, sem contribuição significativa de atrito ou cimentação. Nesse estágio, o polímero atua como um agente dispersante, reduzindo o atrito interparticular e conferindo caráter pastoso ao material.

Aos 7 dias, as curvas passam a apresentar picos bem definidos, indicando o início da estruturação interna da matriz solo-polímero. Conforme Das (2007), a definição de um ponto de resistência máxima indica a transição entre os regimes de endurecimento e amolecimento do solo, típica de materiais parcialmente cimentados. O compósito começa a desenvolver uma rede de ligações coesivas contínuas, o que aumenta a resistência ao cisalhamento, mesmo sob baixas tensões normais. A resposta pós-pico ainda é suave, o que sugere comportamento de deformação controlada, com capacidade de redistribuir tensões.

Entre 15 e 30 dias, a resistência máxima aumenta de forma expressiva, alcançando valores superiores a 2000 kPa sob as maiores tensões normais aplicadas. As curvas tornam-se mais inclinadas e o trecho elástico mais pronunciado, indicando maior rigidez inicial e redução da deformabilidade. Após o pico, observa-se queda brusca de tensão, caracterizando comportamento frágil típico de materiais altamente cimentados. Segundo Lambe e Whitman (1969), essa mudança de formato da curva é uma resposta direta ao aumento da coesão aparente e à redução da capacidade de rearranjo interno, uma vez que a matriz polimérica restringe o movimento relativo entre partículas.

Aos 45 dias, o compósito atinge seu estágio mais rígido e resistente. As curvas apresentam picos muito marcados, seguidos de redução abrupta da tensão, confirmando a consolidação da estrutura polimérica e a predominância de um comportamento de ruptura frágil. Nessa fase, a coesão é o principal componente da resistência, e o ângulo de atrito tem contribuição reduzida. O comportamento é coerente com o descrito por Das (2007) para solos cimentados, nos quais a resistência não depende apenas do confinamento, mas das ligações químicas e físicas formadas entre as partículas e o agente estabilizante.

Aos 45 dias, o compósito atinge seu estágio mais rígido e resistente. As curvas apresentam picos bem definidos para as tensões normais de 50, 100 e 200 kPa, seguidos de redução abrupta da tensão, confirmando a consolidação da estrutura polimérica e a

predominância de um comportamento de ruptura frágil. No entanto, para a tensão normal de 400 kPa, não se observa um pico de ruptura distinto: a tensão de cisalhamento cresce rapidamente até cerca de 2,5 MPa e tende à estabilização, mantendo-se praticamente constante mesmo com o aumento do deslocamento horizontal. Esse comportamento sugere a ocorrência de escoamento plástico controlado, em que o material, altamente cimentado, atinge uma condição de resistência residual mobilizada sem ruptura localizada.

Segundo Lambe e Whitman (1969), esse tipo de resposta é típico de solos argilosos fortemente estruturados, nos quais a ruptura não se dá por colapso das partículas, mas por deformação progressiva da matriz coesiva. Já Das (2007) destaca que, em materiais cimentados, a ausência de um pico bem definido sob altos confinamentos pode indicar coesão mobilizada uniforme e um comportamento governado pela resistência da rede cimentante, e não apenas pela interação friccional entre partículas.

Assim, a resposta obtida para 45 dias confirma o estágio final de cura do compósito, no qual a matriz polimérica confere elevada coesão e rigidez, mas reduz a capacidade de redistribuição interna de tensões — resultando em comportamento quase perfeitamente plástico sob elevadas tensões normais.

O conjunto das curvas mostra que o ganho de resistência do compósito B25 está associado à formação progressiva de uma rede polimérica contínua, que atua como matriz cimentante, promovendo o aumento da coesão e reduzindo a deformabilidade. Esse efeito é cumulativo e não se estabiliza até 45 dias, indicando que o processo de cura da bentonita polimerizada é mais lento e prolongado do que o observado nas misturas arenosas.

Assim, o comportamento do compósito B25 confirma o modelo teórico descrito por Lambe e Whitman (1969), no qual a resistência de solos argilosos estruturados é função da coesão e da integridade das ligações internas. A ação do polímero reforça essa estrutura, elevando a coesão aparente e promovendo um comportamento típico de materiais cimentados — inicialmente dúctil e, com o tempo de cura, progressivamente mais rígido e frágil.

Na Figura 5.10 mostram-se as envoltórias de ruptura dos compósitos com diferentes tempos de cura para B25 de polímero.

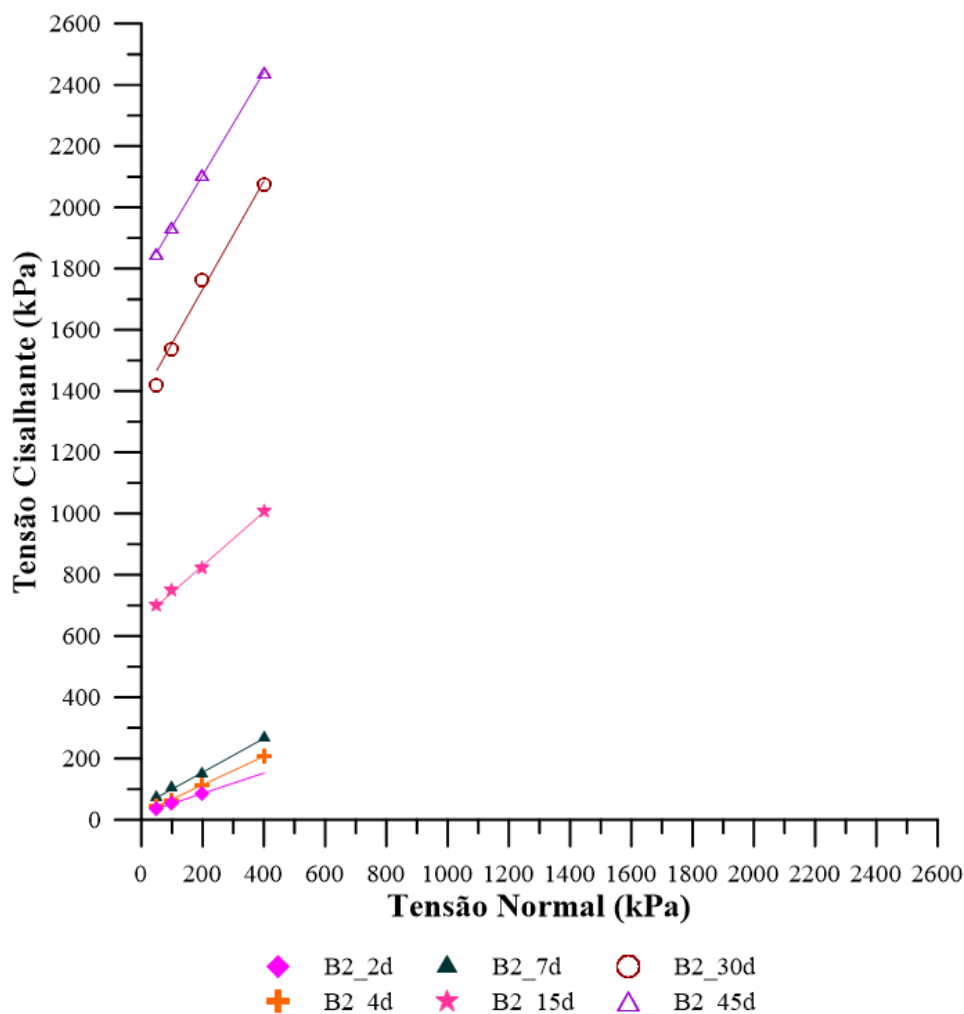


Figura 5.10. Envoltória de Ruptura para B25.

Na Figura 5.10 Tabela 5.4 são apresentados os valores de ângulo de atrito efetivo e intercepto coesivo de cada tempo para o compósito B25.

Tabela 5.4. Valores do intercepto coesivo e ângulo de atrito para B25.

Material	c' (kPa)	ϕ' (°)
B25 (2° Dia)	19,82	17,8
B25 (4° Dia)	20,52	23,6
B25 (7° Dia)	44,56	26,9
B25 (15° Dia)	654,31	35,9
B25 (30° Dia)	1348,90	46,9
B25 (45° Dia)	1767,80	46,0

Reforça-se que não há resultados para o compósito B25 com 0 e 1 dia de cura, além de não haver resultados para a bentonita sem estabilização, conforme já exposto anteriormente. Observa-se que, entre 2 e 7 dias, há um aumento tanto do intercepto coesivo quanto do ângulo de atrito, porém de forma modesta, refletindo um estágio inicial de estruturação da matriz e

formação parcial de ligações poliméricas. Ainda assim, quando comparado ao material não estabilizado, o ganho de resistência é notável, evidenciando o efeito imediato da adição do polímero, mesmo em baixos tempos de cura. As curvas tensão–deslocamento e as envoltórias de ruptura corroboram essa interpretação: até o 7º dia, não se observa pico de resistência definido, indicando comportamento predominantemente plástico e de baixa rigidez, compatível com uma fase em que o polímero atua mais como agente lubrificante do que cimentante.

A partir de 15 dias, o comportamento do compósito muda significativamente. Os parâmetros de resistência (Tabela 5.4) mostram uma elevação acentuada da coesão, de aproximadamente 45 kPa para 654 kPa, e do ângulo de atrito de 26,9° para 36°, evidenciando a formação de uma estrutura interna consolidada, na qual o polímero atua como agente cimentante entre as partículas de bentonita. Esse salto coesivo marca a transição entre um comportamento governado pela adesão física e atrito interparticular para um comportamento dominado por ligações poliméricas contínuas, conforme descrito por Lambe e Whitman (1969).

A evolução continua de forma consistente até 45 dias, com c' atingindo 1767,8 kPa e ϕ' estabilizando-se em torno de 46°, indicando maturação do compósito e formação de uma matriz coesa e rígida. Entretanto, observa-se que para a tensão normal de 400 kPa, o corpo de prova não apresentou um pico de ruptura definido, atingindo um patamar estável de resistência, o que caracteriza um escoamento plástico controlado, típico de materiais fortemente cimentados sob alto confinamento. (Das, 2007).

Em síntese, o B25 evolui de um comportamento plástico e pouco estruturado nos primeiros dias para um material altamente coeso e de elevado atrito mobilizado, com estrutura interna densamente interconectada. O ganho de coesão é o principal responsável pelo aumento expressivo da resistência, enquanto o ângulo de atrito se mantém elevado, refletindo o caráter cimentado do material e a interação eficaz entre a bentonita e a matriz polimérica.

Na Figura 5.11 (a-b) ilustra-se os corpos de prova do compósito B25 com 2 dias de cura, após ruptura. Embora tenha sido possível realizar o ensaio, observa-se que o material ainda apresentava aspecto pastoso e elevada plasticidade, evidenciando que a estrutura polimérica ainda não havia desenvolvido ligações sólidas suficientes para estabilizar o sistema. Esse comportamento explica a impossibilidade de execução do ensaio sob tensão normal de 400 kPa, visto que o corpo de prova não suportava o confinamento, extravasando das metades da caixa de cisalhamento.



(a)



(b)

Figura 5.11. Corpos de prova com 2 dias de cura, após a ruptura. (a) CP após ensaio com 50 kPa; (b) CP após ensaio com 200 kPa.

Visualmente, não se verifica no corpo de prova plano de ruptura bem definido, o que é coerente com o comportamento plástico observado nas curvas e descrito nos modelos clássicos de Das (2007) para solos argilosos saturados submetidos a cisalhamento sob baixas tensões normais.

Na Figura 5.12 (a-b) ilustra-se os corpos de prova do compósito B25 com 4 dias de cura, após rutura.



(a)



(b)

Figura 5.12. Corpos de prova com 4 dias de cura, após a ruptura. (a) Imagem lateral do CP após ruptura. (b) Imagem superior do CP após ruptura.

Nota-se que, diferentemente do material com 2 dias, o compósito já apresenta estrutura mais rígida e aspecto menos pastoso, mantendo o formato original da amostra durante a montagem e a ruptura. O plano de cisalhamento torna-se visível e bem definido, o que demonstra que o material começa a mobilizar resistência de pico. Ainda assim, as superfícies pós-ruptura mostram textura lisa e sinais de deslizamento contínuo, indicando que a deformação ainda é predominantemente plástica, com início de comportamento frágil localizado.

Assim, confirma-se que aos 4 dias de cura o compósito B25 ainda não atingiu plena estabilidade, mas já evidencia a mobilização simultânea de atrito e coesão, marcando o início do processo de endurecimento da matriz polimérica.

Para o compósito B25 com 7 dias de cura, não se verificaram diferenças nítidas no aspecto do corpo de prova, exceto pela ausência do caráter pastoso observado nos estágios iniciais. O material apresentou maior coesão interna e integridade estrutural, mantendo o formato estável durante o ensaio. Entretanto, conforme indicado nas curvas tensão–deslocamento da Figura 5.9(c), não se observou pico acentuado de resistência, e o comportamento manteve-se predominantemente plástico, com escoamento gradual e sem ruptura frágil definida.

Os resultados refletem o que Lambe e Whitman (1969) descrevem como uma fase de reorganização interna, na qual a matriz cimentante ainda se encontra em processo de consolidação, havendo equilíbrio entre atração coesiva crescente e plasticidade residual. A pequena variação nos parâmetros de resistência, com $c' \approx 44,6$ kPa e $\varphi' \approx 26,9^\circ$, em relação ao

período anterior, confirma essa interpretação: há evolução mecânica, mas ainda sem formação de uma rede polimérica suficientemente rígida para produzir comportamento de pico típico de materiais cimentados.

A partir dos 15 dias de cura, a transição estrutural se torna evidente. Os compósitos B25 (15 a 45 dias) não apresentaram mudanças perceptíveis na morfologia externa dos corpos de prova após a ruptura, mantendo aparência compacta e homogênea. Contudo, o comportamento mecânico observado nas curvas e envoltórias de ruptura revela uma mudança marcante no regime resistente.

A Figura 5.13 ilustra um corpo de prova de B25 com 15 dias de cura após o ensaio, nos quais se nota a presença de planos de cisalhamento bem definidos e ruptura predominantemente frágil, coerente com a expressiva elevação dos parâmetros de resistência: $c' \approx 1030$ kPa e $\phi' \approx 45^\circ$. Esse salto de desempenho demonstra a consolidação das ligações poliméricas entre as partículas, tornando o material altamente coeso e rígido.



Figura 5.13. Corpo de prova B25 com 15 dias de cura após a ruptura

Segundo Das (2007), esse tipo de comportamento é característico de materiais com estrutura cimentada, nos quais o aumento de resistência é dominado pela coesão química e física da matriz, e não mais pela compactação ou pela sucção capilar. Assim, entre 7 e 15 dias, o compósito B₂ passa de uma estrutura parcialmente estruturada para uma configuração cimentada estável, cuja resistência cresce rapidamente até se estabilizar por volta dos 45 dias.

Nos períodos de 30 e 45 dias de cura, o compósito B₂ atingiu o estágio de resistência mais elevado e estável, caracterizando uma estrutura totalmente cimentada. As curvas tensão–deslocamento mostram picos bem definidos, seguidos de quedas abruptas de tensão, comportamento típico de materiais frágeis e densamente interligados, nos quais a ruptura ocorre por colapso localizado da matriz polimérica. O ganho expressivo de coesão, de 1514,8 kPa para

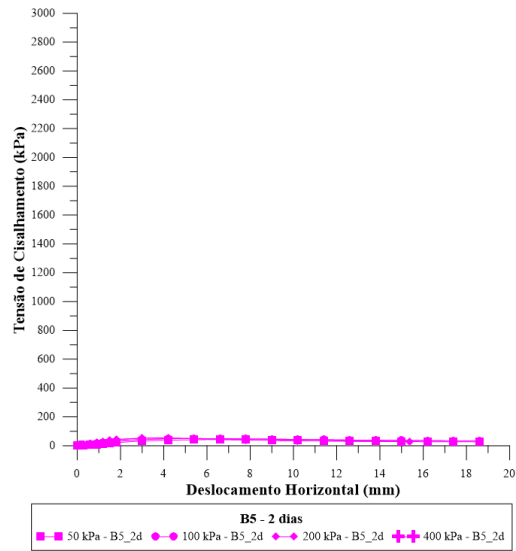
1767,8 kPa, e a manutenção de um ângulo de atrito próximo de 46° , evidenciam que o aumento de resistência está associado à consolidação química e física das pontes poliméricas entre as partículas, e não mais à compactação ou à sucção residual.

Visualmente, os corpos de prova mantiveram aparência compacta, com planos de ruptura bem definidos e superfícies lisas, sugerindo que o cisalhamento ocorreu ao longo de zonas preferenciais de fraqueza, já típicas de materiais rígidos. Essa morfologia é compatível com o comportamento observado nas curvas: o pico de resistência elevado, seguido de uma queda acentuada e estabilização posterior, indica que o material atinge a resistência máxima antes de uma perda súbita de suporte estrutural, fenômeno também descrito por Lambe e Whitman (1969) para solos altamente estruturados ou cimentados artificialmente.

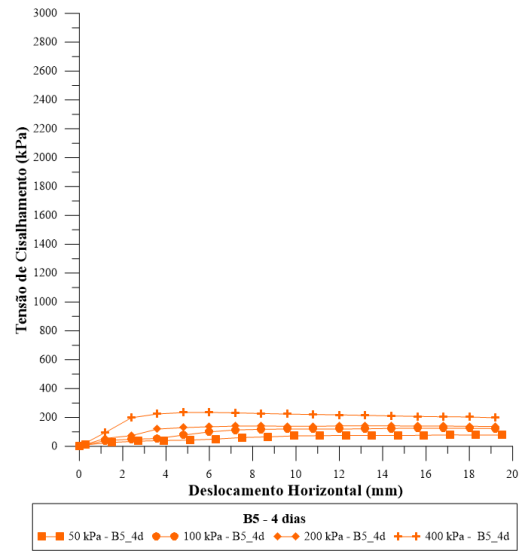
De acordo com Das (2007), esse tipo de resposta representa a transição definitiva para o regime de ruptura coesiva, no qual a contribuição friccional passa a ser secundária. A deformação concentrada e a baixa capacidade de redistribuição de tensões após o pico refletem a elevada rigidez da rede polimérica, que une as partículas de bentonita em uma matriz contínua e resistente, mas sensível a concentrações localizadas de esforço.

Em síntese, o comportamento do compósito B25 ao longo do tempo de cura demonstra uma evolução progressiva de um material plástico e deformável para um sólido cimentado de alta rigidez, com crescimento expressivo de coesão e ângulo de atrito até a estabilização por volta de 45 dias.

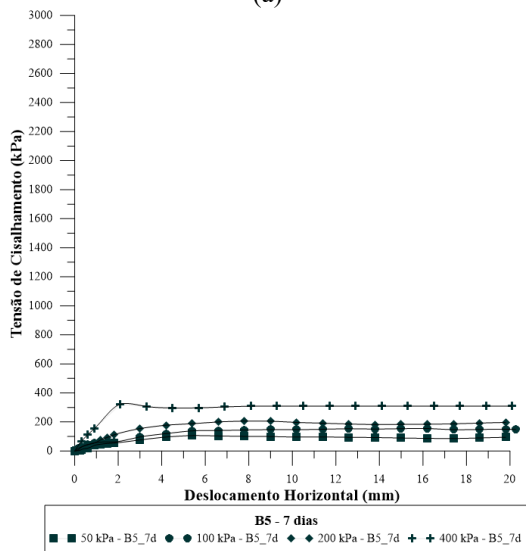
Nas Figura 5.14(a-f) são representadas as curvas tensão de cisalhamento por deslocamento horizontal para cada tempo de cura e para aplicação das tensões normais para B50. As curvas de tensão de cisalhamento (kPa) em função do deslocamento horizontal (mm) para o compósito B50 (Figura 5.14(a-f)).



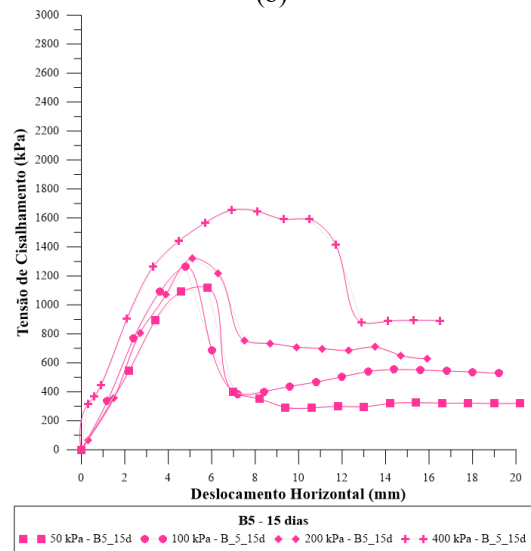
(a)



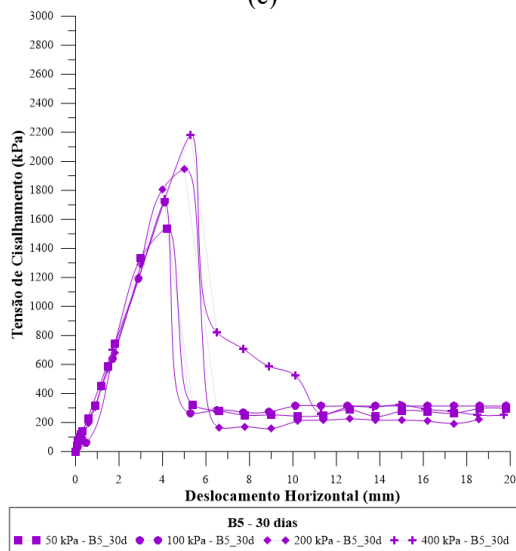
(b)



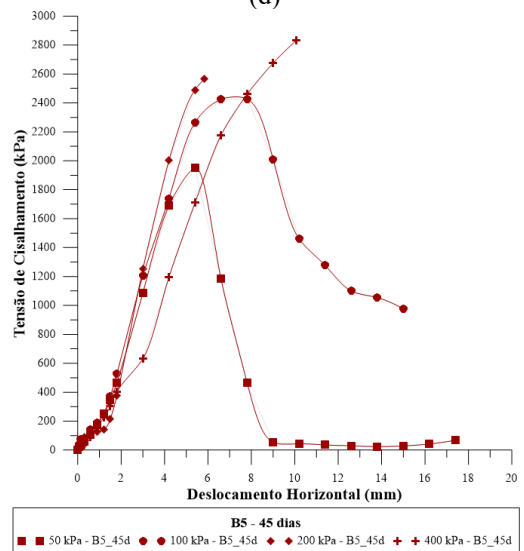
(c)



(d)



(e)



(f)

Figura 5.14. Curvas tensão de cisalhamento por deformação horizontal para aplicação das tensões normais de 50 kPa, 100 kPa, 200 kPa e 400 kPa para B50 (a) 2 dias de cura; (b) 4 dias de cura; (c) 7 dias de cura; (d) 15 dias de cura; (e) 30 dias de cura; (f) 45 dias de cura.

As curvas tensão–deslocamento obtidas para o compósito B50 evidenciaram evolução significativa ao longo do tempo de cura, reproduzindo a tendência geral de ganho mecânico verificada nos ensaios de compressão, porém com intensidades mais pronunciadas. Nas idades iniciais de 2 e 4 dias, o material apresentou comportamento plástico e pastoso, sem definição clara de pico de resistência. As tensões cisalhantes permaneceram baixas e praticamente constantes após pequenos deslocamentos horizontais, refletindo uma matriz ainda não consolidada e com ligações interpartículas frágeis.

Aos 7 dias, o compósito passou a apresentar tensões mais elevadas e picos discretos de resistência, com patamares amplos e suavizados. O comportamento já se aproxima de um material parcialmente estruturado, no qual a contribuição friccional torna-se mais perceptível e o ganho de coesão começa a se manifestar. De acordo com Lambe e Whitman (1969), esse estágio corresponde à fase de consolidação estrutural, em que o solo estabilizado começa a responder de forma mais rígida, mas ainda dissipa deformações por rearranjo interno sem ruptura bem definida.

A partir de 15 dias de cura, o comportamento do B50 evidencia a formação de uma estrutura cimentada estável. As curvas apresentam picos de resistência bem definidos e início de amolecimento pós-pico, principalmente nas tensões normais mais elevadas. O aumento expressivo de resistência indica que a matriz já possui ligações coesivas contínuas, associadas à presença simultânea do polímero e da bentonita. Aos 30 dias, observa-se aumento adicional da rigidez inicial e das tensões de pico, acompanhado de deslocamentos menores no ponto de ruptura e queda acentuada da tensão após o pico, caracterizando um comportamento mais frágil e menos deformável.

Com 45 dias de cura, o compósito atingiu o limite máximo de carga do equipamento nas tensões de 200 kPa e 400 kPa, o que impossibilitou a determinação exata da tensão de ruptura. Os valores utilizados para a obtenção da envoltória correspondem, portanto, aos máximos registrados, representando estimativas mínimas de resistência. Ainda assim, o comportamento observado confirma o avanço da cimentação interna, com matriz densa, rígida e de elevada coesão.

De modo geral, a evolução das curvas mostra que o compósito B50 passou de uma resposta essencialmente plástica nas idades iniciais para um material fortemente cimentado e de alta resistência após 30 e 45 dias de cura. O aumento progressivo das tensões de pico e a redução dos deslocamentos associados à ruptura indicam que o ganho de resistência está

diretamente relacionado à consolidação física e química das ligações formadas entre as partículas, o que resulta em maior rigidez estrutural, elevação da coesão e do ângulo de atrito, e menor ductilidade do material.

A Figura 5.15 apresenta as envoltórias de resistência ao cisalhamento obtidas para o compósito B50 ao longo das diferentes idades de cura. Observa-se uma evolução dos parâmetros de resistência, com ganhos simultâneos de coesão e ângulo de atrito à medida que o tempo de cura avança.

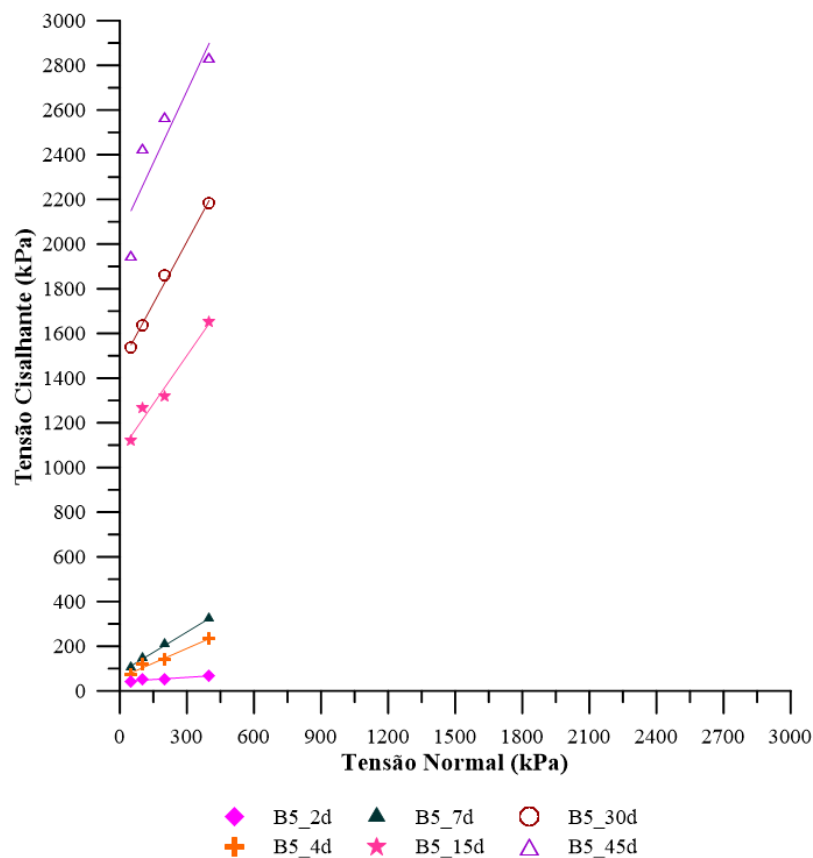


Figura 5.15. Envoltória de Ruptura para B50.

Na Tabela 5.5 são apresentados os valores de ângulo de atrito efetivo e intercepto coesivo de cada tempo para o compósito B50.

Tabela 5.5. Valores do intercepto coesivo e ângulo de atrito para B50.

Material	c' (kPa)	ϕ' (°)
B50 (2° Dia)	41,24	3,7
B50 (4° Dia)	47,52	23,6
B50 (7° Dia)	81,36	28,5
B50 (15° Dia)	1030,00	45,0
B50 (30° Dia)	1456,60	46,9
B50 (45° Dia)	2293,40	50,6

Nas idades iniciais, de 2 e 4 dias, os valores de resistência são baixos ($c' = 41,2$ kPa e $\varphi' = 3,7^\circ$ aos 2 dias; $c' = 47,5$ kPa e $\varphi' = 23,6^\circ$ aos 4 dias), indicando que o material ainda se comporta como um agregado parcialmente disperso, dominado pela fricção entre partículas.

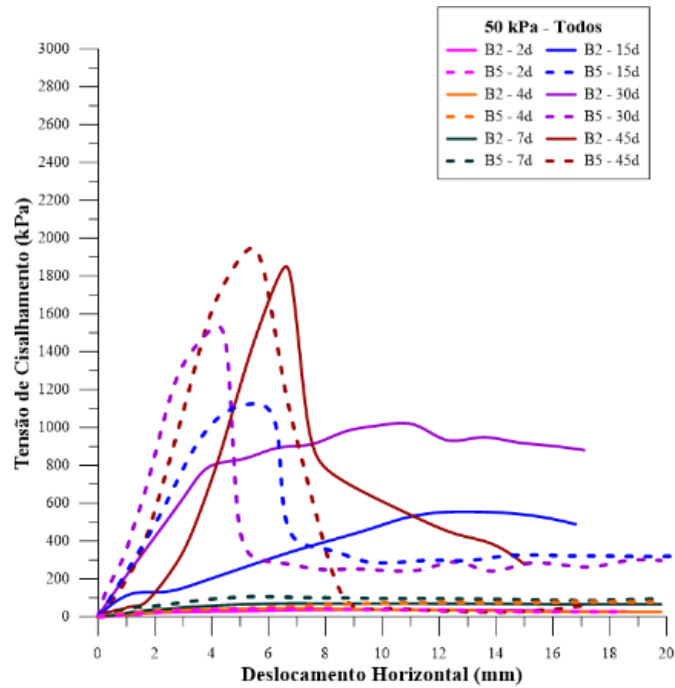
Aos 7 dias, o B50 apresenta aumento perceptível da resistência ($c' = 81,4$ kPa; $\varphi' = 28,5^\circ$), sinalizando o início da formação de ligações estruturais mais estáveis. Segundo Terzaghi e Peck (1967), o ganho de resistência em materiais coesivos está intimamente associado à redução do índice de vazios e ao desenvolvimento de interações físico-químicas entre as partículas. A partir de 15 dias, o ganho de resistência torna-se expressivo ($c' = 1030$ kPa; $\varphi' = 45^\circ$), evidenciando a consolidação de uma matriz contínua e o aumento significativo da cimentação interna. Hvorslev (1937) relaciona esse tipo de comportamento à redução da porosidade e ao aumento do grau de ligação estrutural em solos com evolução de estrutura coloidal.

Com 30 dias de cura, a resistência continua aumentando ($c' = 1456,6$ kPa; $\varphi' = 46,9^\circ$), embora de forma menos acentuada, o que indica tendência de estabilização do processo de cura. Das (2008) observa que, em materiais cimentados artificialmente, a taxa de ganho de resistência diminui após o estabelecimento das principais ligações coesivas. Aos 45 dias, os valores atingem o patamar máximo observado na série ($c' = 2293,4$ kPa; $\varphi' = 50,6^\circ$). O ensaio com 200 kPa atingiu o limite máximo de carga da prensa, o que confirma que os valores obtidos representam resistências mínimas estimadas. Mesmo assim, a envoltória apresenta grande inclinação e intercepto elevado, evidenciando uma matriz densamente interligada e de comportamento tipicamente frágil.

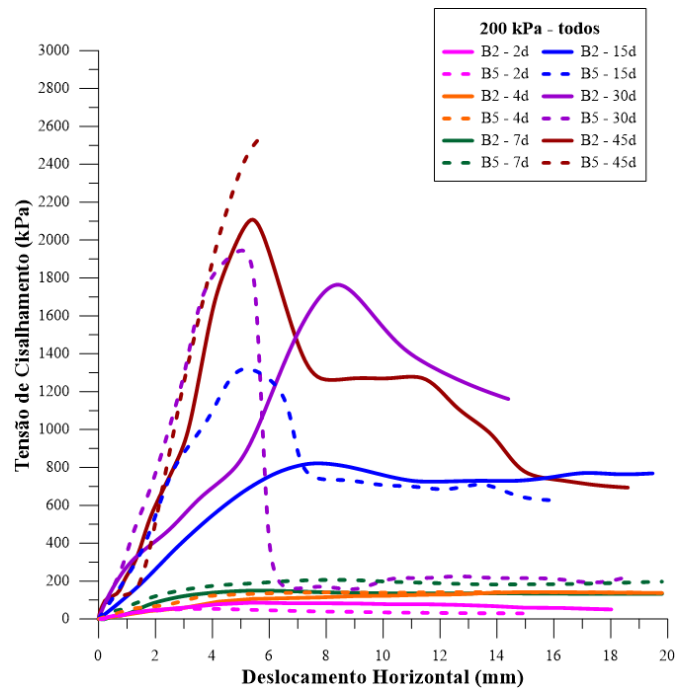
Os resultados mostram que o aumento de resistência do B50 se dá de forma simultânea pela contribuição coesiva e friccional, embora a coesão exerça papel predominante. A progressiva consolidação interna e a redução do índice de vazios explicam a elevação contínua de c' e φ' , refletindo um processo de cura que se mantém ativo até a última idade analisada

De modo geral, a evolução dos parâmetros mostra uma transformação progressiva do compósito B50, que passa de um comportamento essencialmente plástico, nas idades iniciais, para um material de caráter fortemente cimentado e de alta resistência ao cisalhamento nas idades mais avançadas. Essa tendência confirma o papel do polímero na melhoria da estabilidade estrutural e na elevação dos parâmetros de resistência efetiva, especialmente da coesão aparente, que se mostrou o fator predominante no ganho global de desempenho do material.

Na Figura 5.16 (a-b) apresenta-se, respectivamente, as curvas tensão–deslocamento para os compósitos B25 e B50 sob tensões normais de 50 kPa e 200 kPa, englobando todas as idades de cura analisadas. Em ambos os níveis de tensão, observa-se o comportamento progressivo típico dos materiais estabilizados, com aumento consistente das tensões de pico ao longo do tempo de cura.



(a)



(b)

Figura 5.16. Curva tensão de cisalhamento (kPa) x Deslocamento horizontal (mm) para compósitos bentoníticos. (a) Tensão normal de 50 kPa; (b) Tensão normal de 200 kPa

A comparação entre as envoltórias de ruptura dos compósitos B25 e B50 evidencia diferenças substanciais tanto na magnitude da resistência quanto na evolução dos parâmetros coesivos e friccionais ao longo da cura. O B50 apresentou incrementos mais expressivos de coesão (c') e ângulo de atrito (ϕ'), indicando o desenvolvimento de uma matriz mais densa e rigidamente estruturada.

Nas idades iniciais, as envoltórias dos dois materiais ainda são pouco inclinadas e com baixos interceptos, comportamento típico de solos com predominância da resistência friccional e pouca contribuição da cimentação. Entretanto, mesmo nesse estágio, o B50 já demonstra leve vantagem em termos de c' , associada à presença da bentonita, que atua como agente de retenção de umidade e facilita a adesão inicial do polímero às partículas minerais.

A partir dos 7 dias, essa diferença se torna mais acentuada: enquanto o B25 apresenta incremento gradual de resistência, o B50 evidencia aumento expressivo da coesão, indicando que as ligações poliméricas e o rearranjo das partículas de bentonita evoluem de forma mais rápida e eficaz. Essa tendência se intensifica nas idades de 15 e 30 dias, quando o B50 alcança valores de c' superiores a 1000 kPa e ϕ' em torno de 45° , superando amplamente o desempenho do B25 no mesmo intervalo de cura.

Na idade de 45 dias, o comportamento do B50 consolida-se como o mais resistente dentre todos os compósitos avaliados. O ensaio para a tensão normal de 200 kPa atingiu o limite máximo de carga da prensa de cisalhamento utilizada, de modo que os valores registrados representam resistências mínimas estimadas, não necessariamente correspondentes à ruptura efetiva. Ainda assim, o ajuste linear das envoltórias indica c' de 2293,4 kPa e ϕ' de $50,6^\circ$, valores significativamente superiores aos do B25, que se mantiveram muito abaixo desses níveis mesmo após o período completo de cura.

Esses resultados confirmam que a adição de bentonita conferiu ao compósito B50 maior capacidade de ligação entre partículas e resistência global ao cisalhamento, refletindo uma atuação sinérgica entre o polímero e os minerais expansivos da bentonita. Tal comportamento está de acordo com as observações de Das (2008) e Skempton (1964), que descrevem a elevação simultânea de c' e ϕ' em materiais com estrutura cimentada e elevado grau de consolidação interna, nos quais a resistência pós-cura passa a ser governada pelo enrijecimento da matriz e pela diminuição do índice de vazios.

Em síntese, o B50 apresentou comportamento compatível com o de materiais fortemente cimentados, com ganhos substanciais de coesão e ângulo de atrito em comparação ao B25. Enquanto o B25 manteve evolução gradual e predominantemente friccional, o B50 atingiu estágios de resistência característicos de uma estrutura estabilizada e rígida, consolidando-se como o compósito de melhor desempenho mecânico entre os analisados.

A Figura 5.17 apresenta a variação dos parâmetros de resistência ao cisalhamento – intercepto coesivo (c') e ângulo de atrito (ϕ') – em função do tempo de cura para os compósitos B25 e B50.

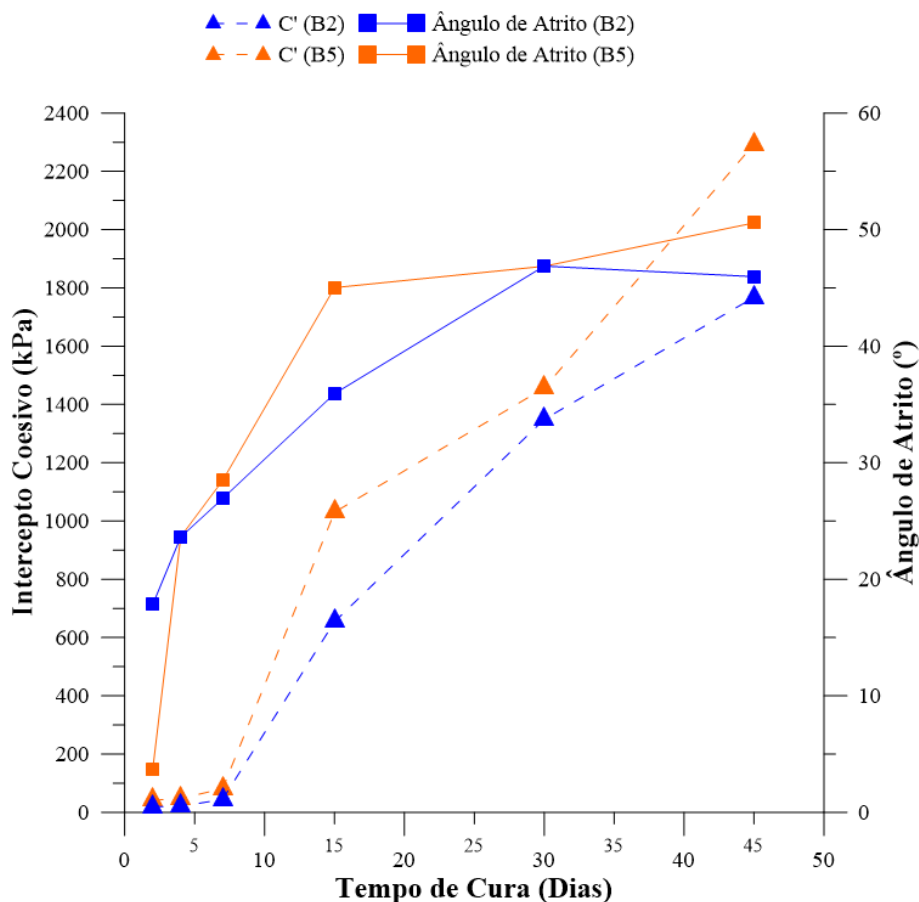


Figura 5.17. Relação de dias versus intercepto coesivo (kPa) versus ângulo de atrito (°) para os compósitos B25 e B50.

Nos primeiros dias, até cerca de 7 dias de cura, os dois compósitos mantêm valores reduzidos de c' e ϕ' , caracterizando o estágio inicial de estruturação. A partir desse ponto, ocorre uma mudança de regime no ganho de resistência, mais acentuada no B50, que evidencia o efeito combinado do polímero e da bentonita na formação de uma matriz mais coesa.

O intercepto coesivo (c') apresenta evolução contínua para ambos os materiais, com incremento expressivo entre 7 e 15 dias e posterior tendência de estabilização. Enquanto o B25 atinge valores próximos de 1500 kPa ao final de 45 dias, o B50 ultrapassa 2200 kPa, confirmando a maior eficiência da bentonita em promover ligações duráveis entre partículas e reduzir o índice de vazios. Essa diferença indica que o ganho de resistência do B50 está fortemente associado à consolidação de uma estrutura cimentada, conforme descrito por Hvorslev (1937) e Terzaghi e Peck (1967) para materiais coesivos com aumento de densidade e ligação interna ao longo do tempo.

O ângulo de atrito (ϕ') também evolui positivamente com o tempo de cura, embora com variações mais discretas após os 15 dias. O B25 alcança ϕ' de aproximadamente 45° aos 45 dias, enquanto o B50 supera 50° , refletindo a melhoria do intertravamento entre partículas e a contribuição do polímero na ancoragem das lamelas de bentonita. Essa tendência é coerente com o observado por Lambe e Whitman (1969), que relacionam o aumento do ângulo de atrito à reorganização das partículas e à redução da deformabilidade interna de materiais estabilizados.

Entre 15 e 45 dias, nota-se que os dois compósitos passam por uma fase de maturação, na qual os ganhos de resistência tornam-se mais sutis. No B50, o crescimento do ângulo de atrito se mantém estável, mas o intercepto coesivo continua aumentando de forma mais significativa, sugerindo que a coesão passa a ser o componente predominante da resistência total.

De forma geral, a análise conjunta dos parâmetros demonstra que o B50 apresentou desempenho superior em todo o intervalo de cura, com valores de c' e ϕ' consistentemente mais elevados que os do B25. O comportamento evidencia que a bentonita potencializa os efeitos de estabilização promovidos pelo polímero, resultando em um material de elevada resistência, estrutura consolidada e comportamento característico de matriz fortemente cimentada.

A comparação entre os resultados obtidos nesta pesquisa (SP40, B25 e B50) e aqueles apresentados por Silva (2020) para os compósitos SP_2.5 e SP_5 permite uma avaliação abrangente do comportamento mecânico de diferentes combinações de solo, polímero e bentonita submetidas ao ensaio de cisalhamento direto. Essa análise evidencia o papel de cada componente na evolução da resistência e na formação estrutural dos compósitos, considerando tanto a contribuição coesiva quanto friccional.

Nos compósitos formados apenas por solo e polímero, avaliados por Silva (2020), verificou-se um ganho rápido de resistência nas primeiras idades de cura, seguido por estabilização após aproximadamente 15 dias. O SP_2.5, com menor teor polimérico, apresentou comportamento similar ao de um solo arenoso parcialmente estabilizado, com coesões limitadas (até 172 kPa) e ângulos de atrito em torno de 33°. Já o SP_5, com teor mais elevado de polímero, exibiu coesão de 546,7 kPa e ângulo de atrito de 58,6° aos 45 dias, demonstrando o efeito positivo do polímero na formação de ligações superficiais e na melhoria do intertravamento entre partículas. Esses resultados são coerentes com o comportamento descrito por Lambe e Whitman (1969), segundo o qual a cimentação parcial promove aumento de resistência inicial, sem, contudo, gerar estrutura interna de caráter permanente.

O compósito SP40, desenvolvido nesta tese, apresentou comportamento intermediário entre os resultados reportados por Silva (2020), com coesão de 397 kPa e ângulo de atrito de 35,5° aos 45 dias. O ganho de resistência foi expressivo até a segunda semana de cura, com tendência à estabilização após esse período, comportamento típico de sistemas em que o polímero atua predominantemente como agente adesivo e o aumento de resistência é controlado por processos físicos de densificação e adesão superficial. Assim, observa-se que nos compósitos SP, o ganho mecânico decorre principalmente do teor de polímero e da eficiência da ligação entre partículas, sem formação de estrutura cimentada de longo prazo.

A introdução da bentonita modificou substancialmente esse comportamento. O compósito B25 apresentou crescimento contínuo dos parâmetros de resistência ao longo do tempo de cura, atingindo 1767,8 kPa de coesão e 46° de ângulo de atrito aos 45 dias. Esse resultado indica que a bentonita atua como agente coloidal ativo, capaz de reter umidade, preencher vazios e favorecer o rearranjo das partículas, conduzindo a uma estrutura mais densa e de maior integração interna. De acordo com Hvorslev (1937) e Terzaghi e Peck (1967), esse tipo de comportamento é típico de materiais cuja resistência está associada à redução do índice de vazios e ao desenvolvimento de ligações físico-químicas entre partículas.

O compósito B50 apresentou desempenho superior em todas as idades e tensões analisadas. O material exibiu coesão de 2293,4 kPa e ângulo de atrito de 50,6° aos 45 dias, valores muito superiores aos observados nos demais compósitos. Essa diferença reflete o papel conjunto da bentonita, que promove o aumento da área superficial específica e a formação de ligações coloidais, e do polímero, que atua como elemento de aglutinação e preenchimento dos vazios. O resultado é uma matriz consolidada, coesa e de elevada rigidez, cuja resistência cresce de forma contínua ao longo da cura.

Enquanto as misturas SP_2.5, SP40 e SP_5 atingem a maturidade estrutural em cerca de 15 dias, o B50 mantém crescimento progressivo até 45 dias, confirmando que o processo de estabilização com bentonita e polímero é mais lento, mas resulta em ligações mais estáveis e duradouras. O comportamento frágil de ruptura e o elevado intercepto coesivo obtido para o B50 indicam que o ganho de resistência está associado à consolidação interna e à formação de pontes estruturais permanentes entre as partículas, em conformidade com os mecanismos descritos por Skempton (1964) para solos cimentados e sobreconsolidados.

De forma geral, a análise conjunta dos resultados confirma que o B50 representa o estágio mais avançado de estabilização entre os compósitos estudados. O material apresentou aumento simultâneo de c' e ϕ' ao longo da cura, refletindo a consolidação gradual da microestrutura e a formação de uma matriz coesa, densa e de alta rigidez, cuja resistência final supera amplamente as misturas sem bentonita.

Esses resultados estão em concordância com os princípios clássicos de Terzaghi e Peck (1967), segundo os quais o aumento da resistência efetiva decorre do aprimoramento da estrutura interna e da redução do volume de vazios. No caso do B50, o comportamento observado está diretamente associado à interação entre a bentonita e o polímero, que favorece o preenchimento dos poros, o aumento das ligações interpartículas e a consolidação progressiva da matriz.

5.4. DETERMINAÇÃO DA SUCCÃO TOTAL

A determinação da sucção total para a bentonita e os compósitos B25 e B50 teve como objetivo avaliar a influência do teor de polímero sobre o comportamento hídrico das misturas, considerando a retenção de água e o equilíbrio de umidade durante o processo de cura. As Figuras 5.18 e 5.19 apresentam, respectivamente, as curvas de ψ (MPa) \times tempo e $pF \times$ tempo obtidas com o equipamento WP4C.

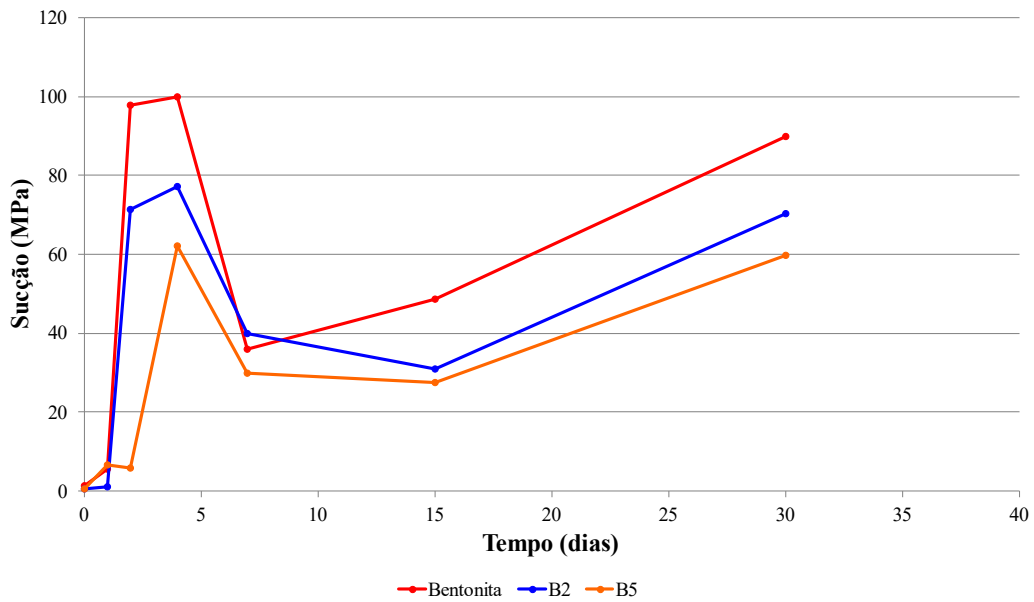


Figura 5.18. Curvas de ψ (MPa) \times tempo para Bentonita, B25 e B50.

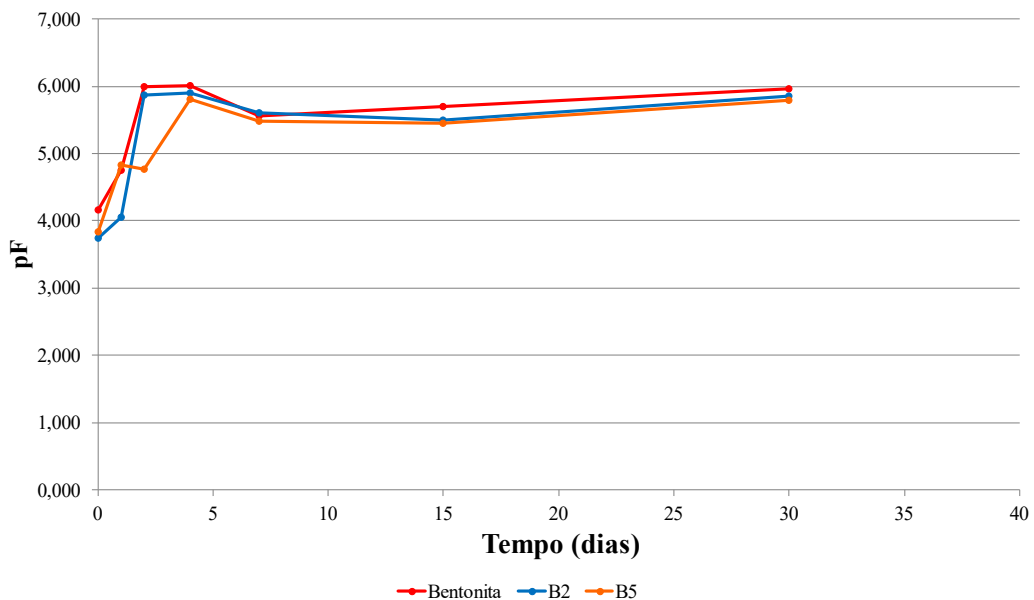


Figura 5.19. Curvas de pF \times tempo para Bentonita, B25 e B50.

Nos primeiros dias de cura, as três amostras apresentaram comportamento característico de materiais argilosos expansivos, com aumento rápido da sucção total e picos próximos de 100 MPa para a bentonita, 75 MPa para o B25 e 60 MPa para o B50. Esse comportamento inicial está associado à rápida evaporação superficial e à redistribuição da água adsorvida nas lamelas da montmorilonita, fenômeno amplamente relatado em argilas de alta plasticidade por Likos e Lu (2006) e Romero (2013). A redução subsequente da sucção observada até cerca de 7 dias indica o estabelecimento de um equilíbrio hídrico inicial, quando a taxa de evaporação diminui e o sistema atinge uma nova condição de umidade estável.

Após essa fase inicial, as diferenças entre os materiais tornam-se evidentes. A bentonita pura apresenta nova elevação gradual da sucção com o tempo de cura, atingindo valores próximos de 90 MPa aos 30 dias. Esse aumento decorre do adensamento natural da estrutura e da perda progressiva de água interlamelar, resultando em maior energia de retenção. Esse comportamento é típico de bentonitas sódicas hidratadas e está em conformidade com observações de Tang *et al.* (2011), que associam o incremento de sucção ao fechamento dos poros interlamelares e à intensificação das forças capilares e osmóticas internas.

O compósito B25 (bentonita + 25% de polímero) apresentou valores intermediários de sucção total, variando de 30 a 70 MPa, com recuperação moderada após 15 dias de cura. A redução da sucção média em relação à bentonita pura evidencia o efeito de recobrimento polimérico sobre as lamelas, que diminui a conectividade dos poros e reduz a mobilidade da água. Esse comportamento indica a transição de um sistema governado por forças matriciais para outro em que as ligações poliméricas interferem diretamente na dinâmica da água adsorvida, conforme discutido por Xu *et al.* (2022) e Ding *et al.* (2021). Esses autores demonstram que a adição de polímeros aniônicos em bentonitas reduz a histerese da curva de retenção e a amplitude de variação de sucção, estabilizando o comportamento hídrico mesmo em regimes de secagem prolongada.

O compósito B50 (bentonita + 50% de polímero) apresentou os menores valores de sucção total ao longo de todo o período de cura, estabilizando entre 30 e 60 MPa. A diminuição da sucção é explicada pela substituição parcial da água adsorvida por cadeias poliméricas que ocupam os espaços interlamelares e restringem a evaporação. O aumento do teor de polímero promove o encapsulamento da água residual e reduz o número de meniscos capilares, fenômeno também observado por Wang *et al.* (2023) em argilas expansivas tratadas com polímeros. O resultado é um sistema hídrico mais estável e menos dependente das variações de umidade ambiente. Essa estabilidade de ψ e pF, observada a partir de 15 dias de cura, indica que o polímero atua como agente regulador hídrico, mitigando os efeitos da sucção matricial e promovendo uma matriz mais homogênea e menos expansiva.

Os resultados de sucção obtidos com o WP4C mostram que a introdução do polímero reduz sistematicamente a sucção total e acelera o alcance do equilíbrio hídrico. Em paralelo, observa-se que a bentonita, mesmo apresentando valores de sucção mais elevados, exibe maior variabilidade, enquanto os compósitos com polímero atingem estabilidade mais precoce e mantêm valores constantes ao longo do tempo. Essa tendência é consistente com o comportamento de bentonitas modificadas por polímeros relatado por Huang *et al.* (2021) e

Liang *et al.* (2024), nos quais a redução da sucção é acompanhada por aumento de densidade e rigidez da matriz.

Do ponto de vista mecânico, essa redução de sucção e estabilização hídrica está diretamente relacionada à transição do controle físico para o controle físico-químico da resistência. Enquanto a bentonita pura apresenta comportamento dependente da variação de umidade e da energia de retenção da água, os compósitos B25 e B50 passam a exibir ganhos de resistência ligados à formação de pontes poliméricas e à reorganização lamelar. Assim, o polímero não apenas reduz a sucção matricial, mas também consolida a estrutura interna, reforçando as ligações interpartículas e promovendo um comportamento mais rígido e de menor deformabilidade, como comprovado nos ensaios de cisalhamento direto.

5.5. AVALIAÇÃO DIMENSIONAL E DENSIFICAÇÃO DOS COMPÓSITOS BENTONITA-POLÍMERO

A avaliação dimensional e física das amostras de bentonita com adição polimérica (B25 e B50) foi realizada a partir do monitoramento dos parâmetros geométricos (lado, altura, área e volume), bem como da massa e da massa específica aparente (ρ), em diferentes idades de cura. Os resultados obtidos estão organizados em forma de variação percentual em relação ao estado inicial, complementados por gráficos que representam a evolução das propriedades e a relação entre densificação e retração volumétrica.

Nas Figuras Figura 5.20 e Figura 5.21 apresentam-se, respectivamente, as variações percentuais das propriedades os compósitos B25 e B50. Observa-se que, em ambos os casos, ocorre redução significativa das dimensões e da massa ao longo do tempo de cura, acompanhada de aumento da massa específica aparente, indicando retração volumétrica e densificação progressiva.

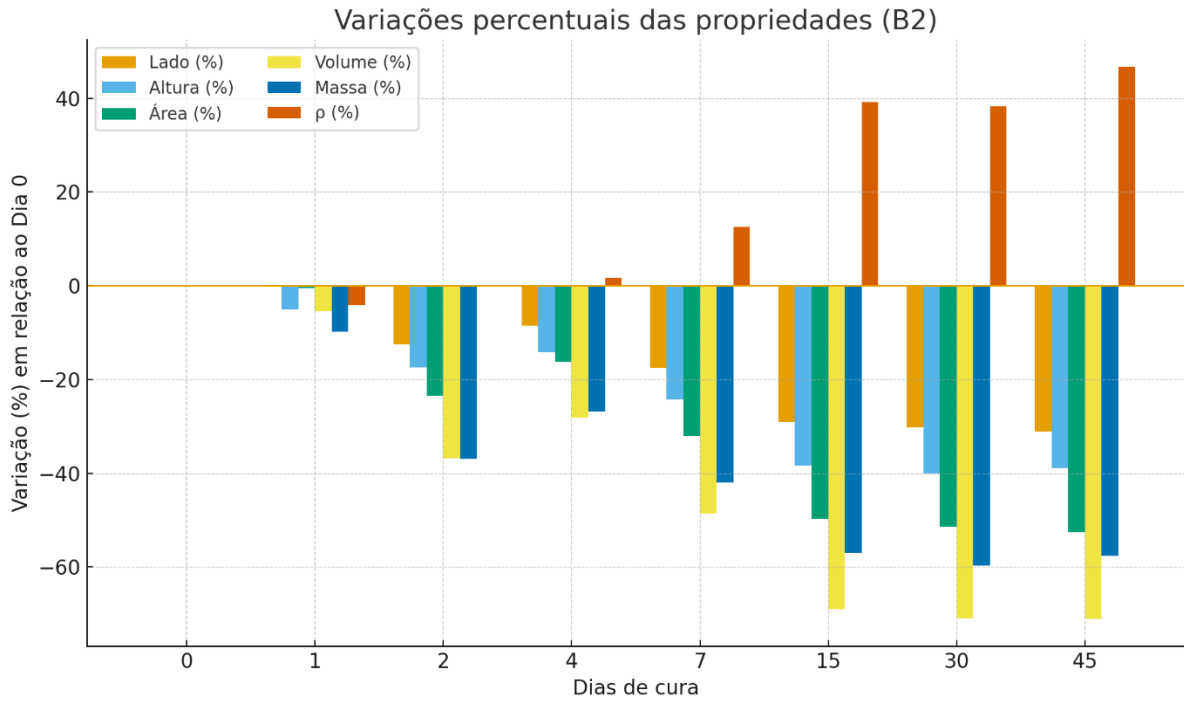


Figura 5.20. Variações percentuais das propriedades para B25

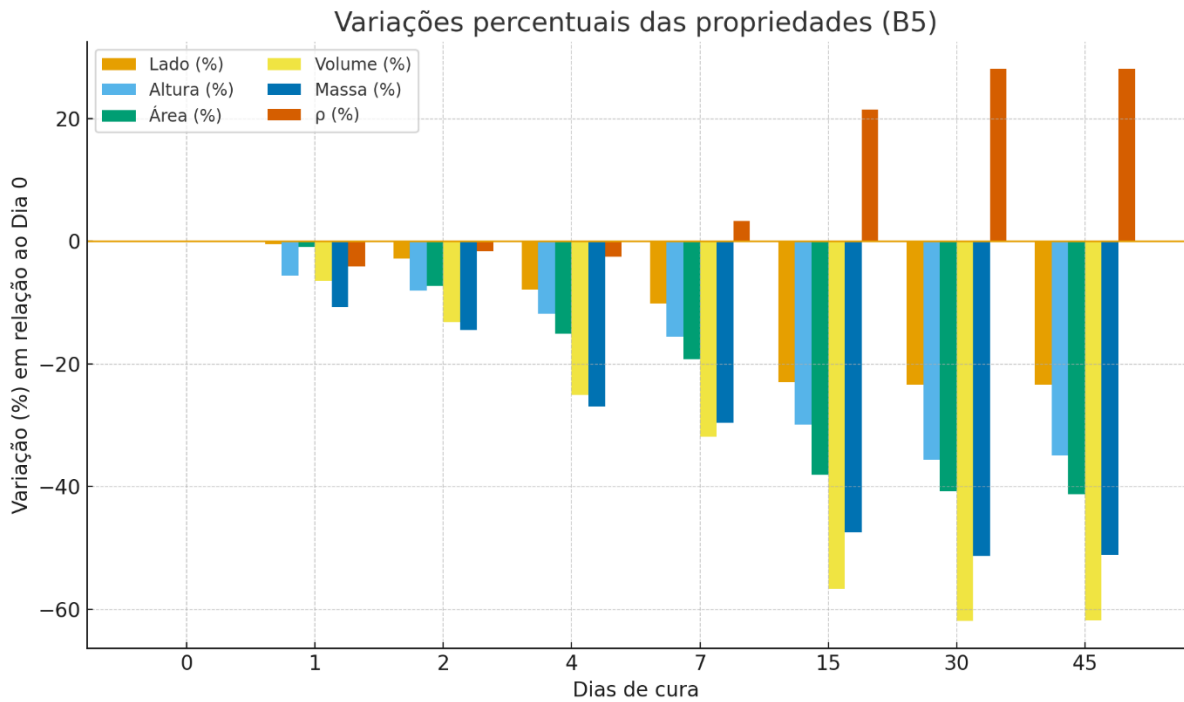


Figura 5.21. Variações percentuais das propriedades para B50

No compósito B25, o volume reduziu aproximadamente 71% após 45 dias, enquanto a massa diminuiu cerca de 58% e a massa específica aumentou 46% em relação ao valor inicial. Já no compósito B50, as reduções foram de 62% no volume e 51% na massa, com acréscimo de 28% na massa específica. Esses resultados demonstram que a ação do polímero promoveu

intensa perda de água e rearranjo interno das partículas de bentonita, favorecendo o adensamento da estrutura.

A comparação entre B25 e B50 evidencia que, embora ambos apresentem comportamento semelhante de retração e densificação, a dosagem polimérica mais elevada (B50) parece reduzir a intensidade da compactação final, sugerindo uma retração mais controlada e menor concentração de tensões internas. Esse comportamento indica que o polímero atua não apenas como agente de ligação, mas também como controlador de retração, limitando o colapso estrutural do compósito durante o processo de secagem.

As relações entre ρ e volume para B25 e B50 estão representadas nas Figuras 5.22 e 5.23, respectivamente.

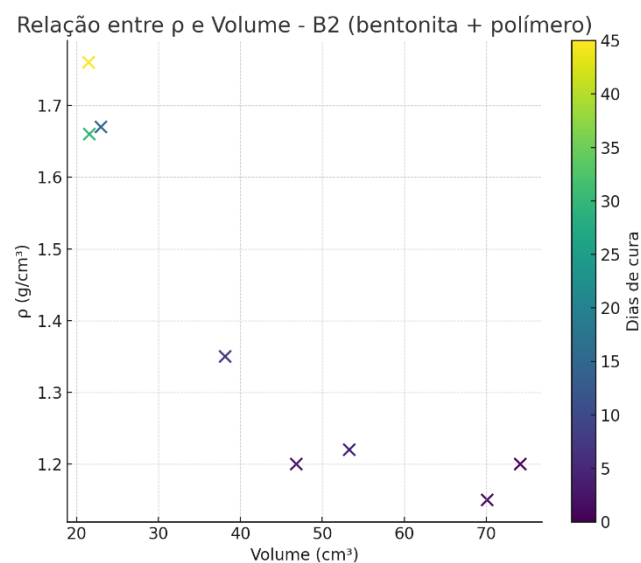


Figura 5.22. relação entre ρ (g/cm³) e volume (cm³) para B25.

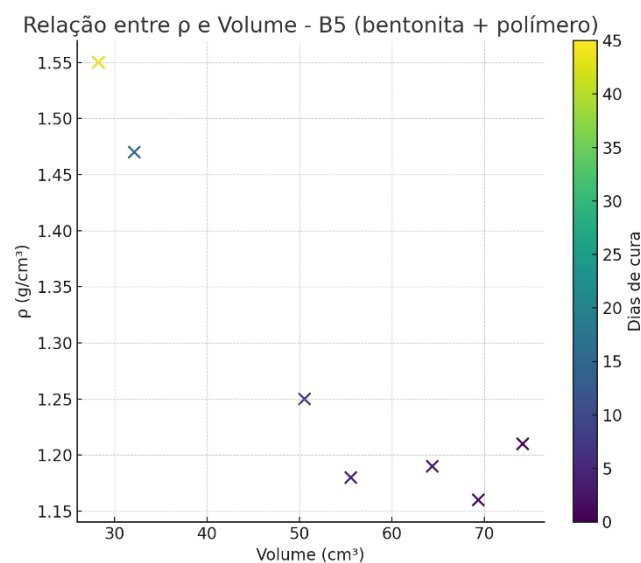


Figura 5.23. relação entre ρ (g/cm³) e volume (cm³) para B50.

As relações entre ρ e massa para B25 e B50 estão representadas nas Figuras 5.24. e 5.25, respectivamente.

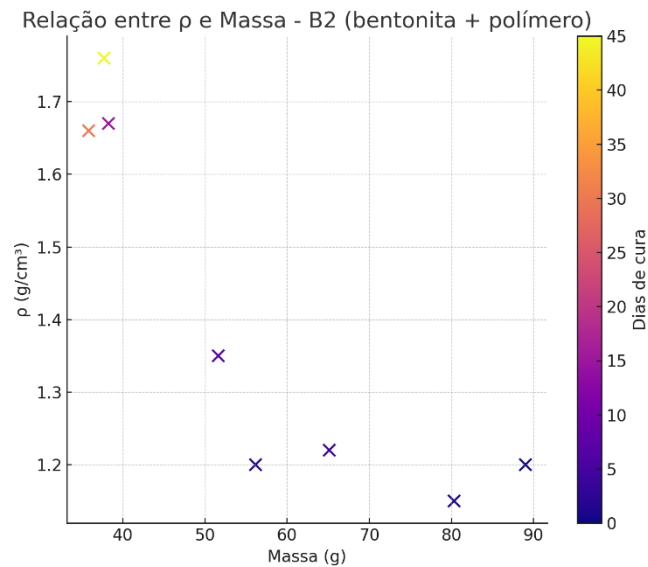


Figura 5.24. relação entre ρ (g/cm³) e massa (g) para B25.

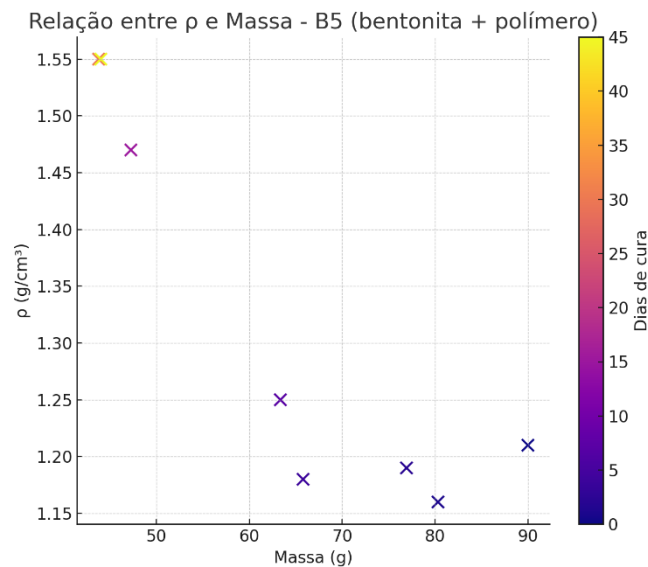


Figura 5.25. relação entre ρ (g/cm³) e massa (g) para B50.

As relações entre ρ e volume e entre ρ e massa confirmam a correlação inversa entre retração e densificação, típica de sistemas solo-polímero com predominância de interações físico-químicas entre as cadeias poliméricas e as partículas de argila. Tais resultados são coerentes com o comportamento observado em estudos de estabilização de solos finos com

polímeros aniônicos, nos quais ocorre a formação de uma rede consolidada capaz de redistribuir tensões internas e reduzir a porosidade.

A bentonita, por natureza, apresenta comportamento expansivo devido à presença de minerais do grupo das esmectitas, que promovem elevada capacidade de troca catiônica e absorção de água. Essa expansão volumétrica, embora desejável em sistemas de barreira hidráulica, pode comprometer a estabilidade de matrizes geotécnicas quando não controlada. Nesse contexto, a incorporação de polímeros tem se mostrado uma alternativa eficaz para modular o potencial de expansão e reduzir o colapso estrutural durante os ciclos de hidratação e secagem.

Ozhan (2019) observou que a adição de polímero aniônico a misturas bentonita-areia reduziu a porosidade e proporcionou maior estabilidade estrutural, resultado da formação de ligações físicas entre as cadeias poliméricas e as partículas de argila, o que levou ao aumento da coesão e diminuição do ângulo de atrito. Resultados semelhantes foram relatados por Liang *et al.* (2024), que identificaram a formação de hidrogéis poliméricos capazes de bloquear vazios e limitar a expansão osmótica da bentonita, ao mesmo tempo em que preservam sua integridade microestrutural. Esses autores também apontam que o desempenho do material passa a depender menos do índice de expansão e mais do efeito de obstrução física promovido pelo polímero, sobretudo em dosagens superiores ao limiar crítico de saturação.

Dessa forma, os resultados obtidos nos compósitos B25 e B50 convergem com a literatura, indicando que o polímero atua como agente de controle volumétrico e estabilização interna, mitigando a expansão excessiva típica de bentonitas sódicas e resultando em uma estrutura mais densa e estável. Essa característica confere ao material potencial aplicação em contextos geotécnicos que demandam baixa variação volumétrica e resistência a ciclos de umedecimento e secagem, como barreiras selantes, bases de aterros e camadas de fundação em solos expansivos.

5.6. DIFRAÇÃO DE RAIOS - X (DRX)

A análise mineralógica por difração de raios X (DRX) da bentonita glicada está representada na Figura 5.26.

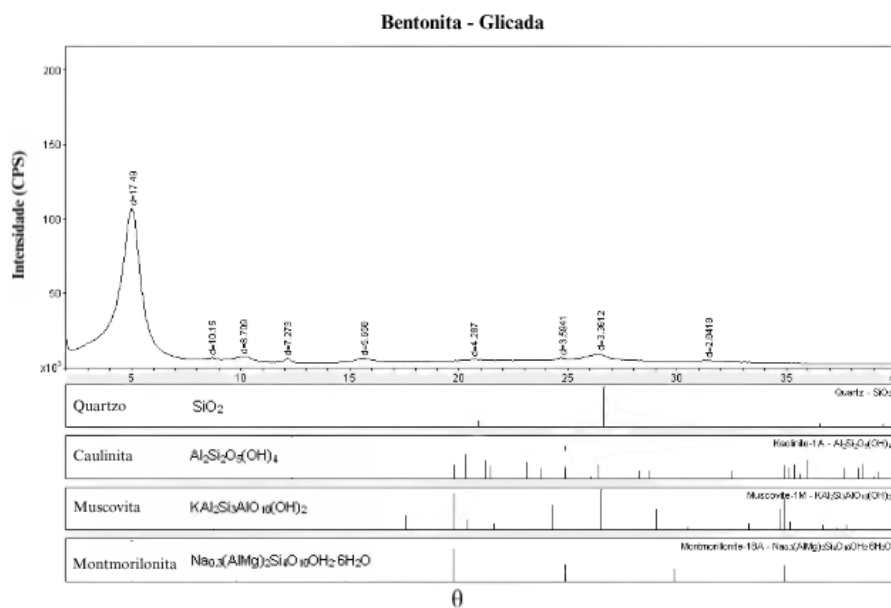


Figura 5.26. Difratoograma de raios X da bentonita glicada.

A difração de raios X da bentonita glicada (Figura 5.26) evidencia a presença predominante de montmorilonita, mineral esmectítico caracterizado por estrutura lamelar expansiva e alta capacidade de troca catiônica. O deslocamento do pico basal (001) para maiores espaçamentos interplanares após o tratamento com etilenoglicol confirma o comportamento expansivo típico dessa fase e a natureza sódica e ativa da bentonita utilizada. Além da montmorilonita, foram identificadas reflexões correspondentes a quartzo (SiO₂), caulinita (Al₂Si₂O₅(OH)₄) e muscovita (KAl₂(Si₃Al)O₁₀(OH)₂), o que reflete a complexidade mineralógica comum a bentonitas naturais.

O padrão difratométrico não indica formação de novas fases cristalinas, apenas o aumento do espaçamento interlamelar das esmectitas, condizente com a intercalação de moléculas de etilenoglicol entre as lamelas. Essa expansão é classicamente utilizada como confirmação da presença de montmorilonita, conforme descrito por Lambe e Whitman (1969) e corroborado em estudos recentes de Huang *et al.* (2021) e Liang *et al.* (2024), que observaram comportamento análogo em bentonitas tratadas com agentes polares e estabilizantes iônicos. A presença de quartzo e caulinita, ambos minerais estruturalmente estáveis, indica que esses componentes atuam como matriz inerte na composição, sem participação significativa nas reações de intercalação.

A análise mineralógica por difração de raios X (DRX) da bentonita glicada e aquecida está representada na Figura 5.27.

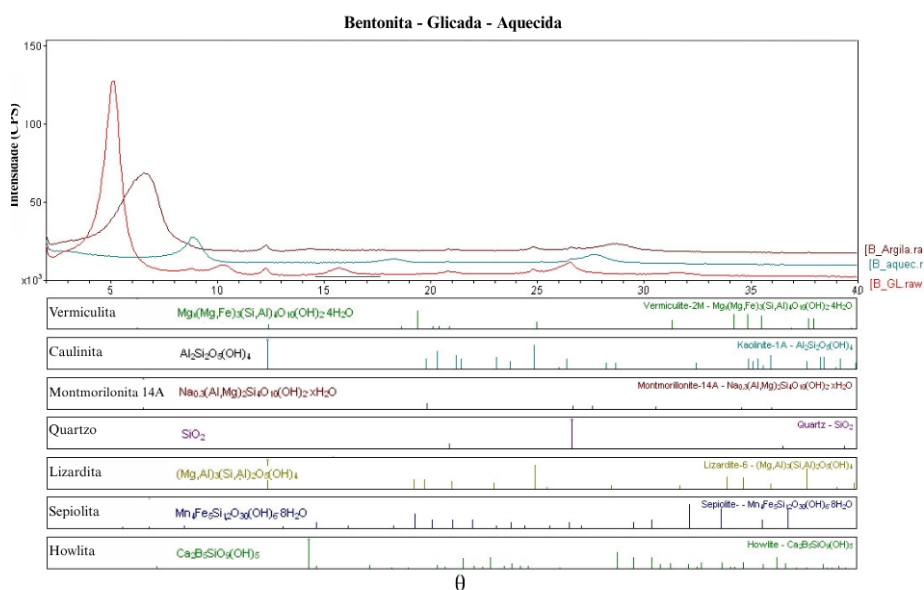


Figura 5.27. Difratoograma de raios X da bentonita glicada e aquecida

Na bentonita glicada e aquecida (Figura 5.27), o difratograma mostra atenuação expressiva do pico basal da montmorilonita e leve deslocamento para ângulos maiores, acompanhado de redução da nitidez das reflexões associadas às fases esmectíticas. Esse comportamento indica colapso parcial da estrutura lamelar e perda de água interlamelar, fenômeno típico da desidratação térmica das esmectitas. Permanecem nítidos os picos de quartzo e caulinita, que não sofrem degradação nesse intervalo térmico. O desaparecimento de parte das reflexões de vermiculita e a redução do ordenamento basal sugerem diminuição da expansibilidade e da capacidade de troca catiônica da bentonita. Esses resultados são consistentes com as observações de Reddy *et al.* (2021) e Li *et al.* (2020), que relatam desorganização estrutural e perda de reatividade em bentonitas submetidas a temperaturas moderadas, com consequente redução do potencial de interação química com agentes estabilizantes.

Em síntese, a bentonita glicada confirma a presença de montmorilonita sódica ativa, com estrutura expansiva e elevada capacidade de intercalação, enquanto a bentonita glicada e aquecida apresenta estrutura parcialmente colapsada, refletindo desidratação e redução de ordem cristalina. Esses comportamentos caracterizam dois estados estruturais distintos do mesmo material: um hidratado e reativo, e outro termicamente estabilizado e menos expansivo.

A análise mineralógica por difração de raios X (DRX) do composto B25 está representada na Figura 5.28.

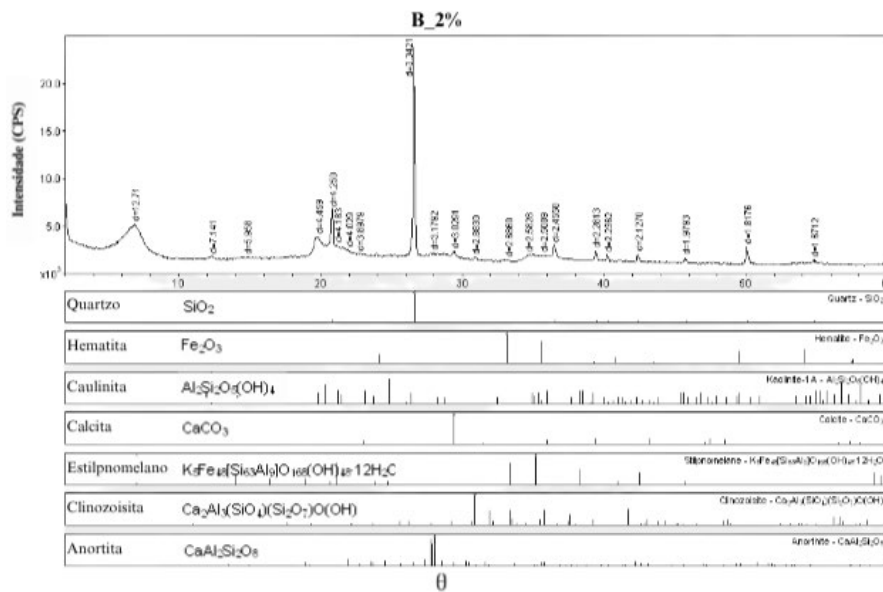


Figura 5.28. Difratoograma de raios X do compósito B25.

O difratograma de raios X do compósito B25 (Figura 5.28) revelou a presença predominante de quartzo (SiO₂), acompanhado de reflexões de hematita (Fe₂O₃), caulinita (Al₂Si₂O₅(OH)₄) e calcita (CaCO₃), além de traços de clinzoisita (Ca₂Al₃(SiO₄)₃(OH)), anortita (CaAl₂Si₂O₈) e estilpnomelano (KFe₈(Si₇Al)₈O₂₂(OH)₄·12H₂O). A ausência de novas fases cristalinas ou deslocamentos significativos confirma que não houve neoformação mineral decorrente da mistura entre solo arenoso e bentonita.

A composição identificada é coerente com a natureza física da estabilização empregada: o ganho de resistência mecânica no B25 está associado à reorganização microestrutural e ao preenchimento de vazios pela fração coloidal da bentonita, sem alteração da estrutura cristalina dos constituintes. Resultados semelhantes foram reportados por Özhan (2019) e Lam *et al.* (2014), que verificaram comportamento análogo em misturas areia-bentonita e argila-polímero, onde o aumento da coesão resultou da aglomeração e da cimentação física entre partículas.

Os minerais acessórios, como calcita e hematita, sugerem precipitação secundária de carbonatos e óxidos metálicos durante o processo de cura, possivelmente contribuindo para o leve aumento de rigidez detectado nos ensaios de cisalhamento direto. Esse conjunto de observações confirma que o B25 preserva a mineralogia original da mistura e que as melhorias mecânicas observadas derivam de mecanismos físico-químicos de densificação e adsorção, e não de transformações cristalográficas.

A análise mineralógica por difração de raios X (DRX) do compósito B50 está representada na Figura 5.29.

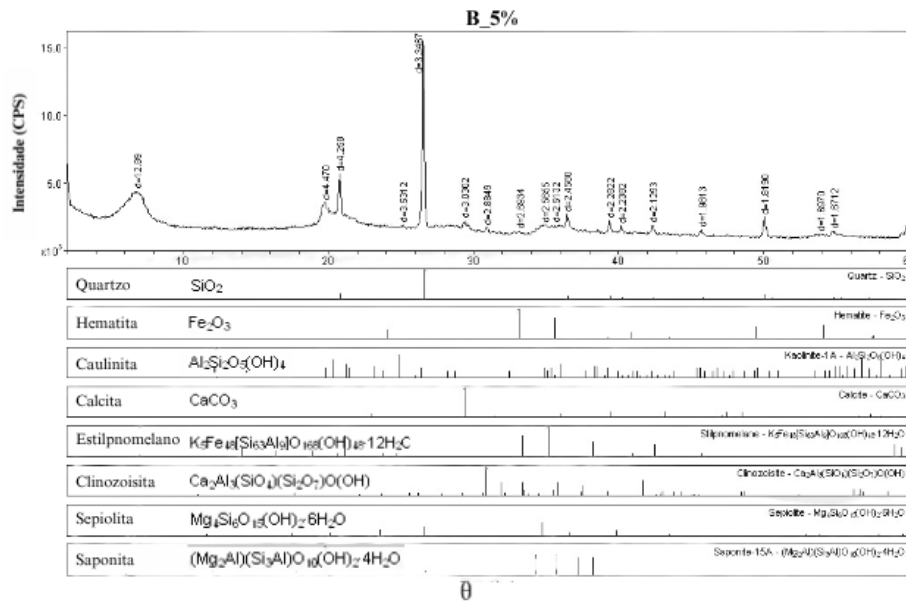


Figura 5.29. Difratoograma de raios X do compósito B50.

O difratograma do compósito B50 (Figura 5.29) apresenta padrão semelhante ao do B25, mantendo o quartzo como fase dominante, mas com o surgimento de reflexões adicionais atribuídas a sepiolita ($Mg_4Si_6O_{15}(OH)_2 \cdot 6H_2O$) e saponita ($Mg_3(Si_4Al)O_{10}(OH)_2 \cdot 4H_2O$), minerais magnésicos hidratados que não estavam presentes na bentonita original. Essas fases indicam reorganização estrutural da fração esmectítica e possível complexação entre os cátions metálicos (Mg^{2+} , Al^{3+}) e os grupos funcionais do polímero adicionado.

O aparecimento dessas fases magnésicas é amplamente relatado em sistemas bentonita–polímero, sendo interpretado como resultado de trocas iônicas e reações de reorganização lamelar, conforme observado por Li *et al.* (2020) e Huang *et al.* (2021). Nessas condições, o polímero atua como mediador eletroquímico, promovendo redistribuição de cátions e formação de pontes moleculares entre as lamelas, o que confere maior estabilidade à matriz e reduz a expansibilidade.

A presença simultânea de quartzo e sepiolita reforça que parte da fração argilosa foi reorganizada em estruturas lamelares mais densas e menos expansivas, o que explica o comportamento mais rígido e frágil observado nos ensaios de cisalhamento direto. Esses resultados são coerentes com os estudos de Hvorslev (1937) e Skempton (1964) sobre o

desenvolvimento de estrutura interna e cimentação em solos coesivos, indicando que a mineralogia evoluiu para um estado de maior estabilidade e integração entre as partículas.

A comparação entre os difratogramas de raios X da bentonita pura, do compósito B25 e do compósito B50 evidencia a progressiva modificação estrutural e química promovida pela adição do polímero, bem como a correlação direta dessas transformações com o comportamento mecânico obtido nos ensaios de cisalhamento direto.

A bentonita apresentou picos característicos de montmorilonita 14 Å, confirmando sua natureza esmectítica e expansiva. O tratamento glicado mostrou deslocamento do pico basal para maiores espaçamentos interplanares, enquanto o aquecimento reduziu sua intensidade e promoveu colapso parcial das lamelas, indicando perda de água interlamelar e redução da expansibilidade. Essa dupla análise comprova a presença de montmorilonita sódica ativa, com estrutura hidratada e altamente reativa, cuja estabilidade depende diretamente do grau de hidratação. A montmorilonita, portanto, representa a base coloidal responsável pela elevada capacidade de troca catiônica e pelo potencial interação com o polímero, aspectos fundamentais para o comportamento dos compósitos.

No compósito B25, o difratograma revelou a preservação das principais fases presentes na bentonita natural sobretudo quartzo, caulinita e montmorilonita, porém com redução das intensidades e leve alargamento dos picos esmectíticos, indicando interações iniciais entre o polímero e as lamelas da montmorilonita. Esse comportamento sugere que parte das moléculas do polímero foi adsorvida nas superfícies ou nos espaços interlamelares, modificando a ordenação cristalina sem gerar novas fases detectáveis por DRX. Esse resultado está em consonância com os estudos de Li *et al.* (2020) e Özhan (2019), que observaram comportamento semelhante em misturas de bentonita com polímeros aniônicos, nas quais o polímero atua promovendo o recobrimento das lamelas e a redução da mobilidade de íons e moléculas de água.

Mecanicamente, o B25 apresentou aumento expressivo da coesão e rigidez com o tempo de cura, alcançando 1030 kPa aos 15 dias e 1767,8 kPa aos 45 dias, sem formação de produtos cristalinos novos. Esses resultados demonstram que a melhoria de resistência se deve à interação físico-química entre o polímero e a fração esmectítica, que aumenta a densidade da matriz e reduz a expansibilidade, mas ainda preserva características dúcteis. Assim, o B25 representa um estágio intermediário, em que o polímero atua como agente de ligação e recobrimento, porém sem alterar profundamente a estrutura lamelar da bentonita.

O compósito B50 apresentou modificações mineralógicas mais pronunciadas. Além das fases já observadas na bentonita e no B25, surgiram reflexões correspondentes a sepiolita e saponita, minerais magnésicos hidratados ausentes nas amostras anteriores. A presença dessas novas fases indica reorganização estrutural da fração esmectítica e possível complexação dos cátions metálicos da bentonita com os grupos funcionais do polímero, promovendo a estabilização das lamelas em estruturas menos expansivas e mais rígidas. Esse comportamento também foi descrito por Huang *et al.* (2021) e Liang *et al.* (2024), que associam a formação de fases magnésicas em compósitos bentonita–polímero à redistribuição de Mg^{2+} e Al^{3+} e à criação de ligações eletroquímicas estáveis entre as lamelas e o polímero.

A correlação com os ensaios mecânicos reforça essa interpretação que B50 apresentou os maiores valores de resistência ao cisalhamento de toda a série, atingindo 2293,4 kPa de coesão e ângulo de atrito de $50,6^\circ$ aos 45 dias. Essa evolução demonstra que o ganho de resistência está diretamente associado à reorganização interna da matriz e ao aumento das ligações interpartículas, resultando em comportamento mais rígido e ruptura frágil. O processo de estabilização, portanto, evolui de uma bentonita puramente coloidal e expansiva (fase física) para uma estrutura consolidada por interações químicas e complexação (fase físico-química consolidada).

De forma integrada, a sequência bentonita, B25, B50 representa a progressão de um material argiloso altamente expansivo para um compósito quimicamente estabilizado e estruturalmente coeso. O B25 marca a fase de transição, em que a adsorção do polímero começa a restringir a mobilidade interlamelar, enquanto o B50 atinge um estado de estabilização permanente, com menor expansibilidade, maior rigidez e microestrutura densamente interconectada. Essa evolução é confirmada tanto pelos resultados de DRX quanto pelos ensaios de cisalhamento, evidenciando que o aumento da proporção de polímero intensifica as interações com a fração esmectítica e conduz a uma estrutura de caráter cimentado, de maior resistência e menor deformabilidade.

5.7. ESPECTROMETRIA DE EMISSÃO ÓPTICA POR PLASMA ACOPLADO INDUTIVAMENTE (ICP-OES)

A espectrometria de emissão óptica por plasma acoplado indutivamente (ICP-OES) foi empregada para caracterizar a composição elementar da bentonita e dos compósitos estabilizados com o polímero Terrafix, permitindo avaliar modificações químicas decorrentes

da interação entre o polímero e a fração esmectítica. Os resultados, apresentados na Tabela 5.6, mostram que a adição do polímero altera de forma sistemática a distribuição relativa dos óxidos majoritários, refletindo a evolução da matriz mineral e a incorporação crescente de material orgânico não detectado pela técnica.

Tabela 5.6. Resultados da análise de ICP-OES para bentonita e compósitos

Material	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	Na ₂ O (%)	CaO (%)	MnO (%)	TiO ₂ (%)	Outros (%)
Bentonita	61,96	13,31	1,14	1,93	7,21	0,00	8,76	5,67
B25	48,30	10,68	1,12	1,53	7,93	0,00	9,63	20,80
B50	44,85	10,74	0,95	1,39	5,23	0,01	6,36	30,46

A bentonita natural apresenta composição típica de argilas esmectíticas, com predominância de SiO₂ e teores expressivos de Al₂O₃, CaO e TiO₂, além de menores proporções de Fe₂O₃ e Na₂O. Essa composição é coerente com a presença de montmorilonita sódica, corroborando os resultados de DRX que evidenciaram picos bem definidos de montmorilonita 14 Å. O teor moderado de CaO sugere a ocorrência de trocas iônicas parciais com cálcio, o que é comum em bentonitas de origem natural, enquanto a fração de TiO₂ representa minerais acessórios estáveis, como ilmenita e rutilo. O conjunto confirma o caráter reativo e a elevada capacidade de troca catiônica da amostra, aspectos descritos por Huang *et al.* (2021) e Reddy *et al.* (2021) em estudos sobre bentonitas empregadas em estabilização de solos.

No compósito B25, observou-se redução nas concentrações de SiO₂ e Al₂O₃, mantendo teores semelhantes de Fe₂O₃ e CaO, mas com incremento significativo na fração “Outros”, que representa a parcela orgânica não quantificada pelo método. Essa alteração é atribuída à incorporação do polímero Terrafix, cuja natureza essencialmente orgânica é confirmada por sua baixa fração inorgânica e elevado teor de “Outros” (98,89%), conforme caracterização prévia.

A redução relativa do SiO₂ e do Al₂O₃ indica diluição da fração mineral e, possivelmente, adsorção parcial do polímero nas lamelas da montmorilonita, o que provoca leve mascaramento dos elementos estruturais no ensaio. Esse comportamento é compatível com a redução da expansibilidade e o aumento da densidade aparente observados mecanicamente. Estudos de Li *et al.* (2020) e Özhan (2019) relatam comportamento análogo, associando a queda relativa dos óxidos estruturais ao recobrimento das superfícies lamelares por cadeias poliméricas, que reduzem a mobilidade de cátions trocáveis e promovem a formação de uma rede semi-orgânica coesa.

No compósito B50, as transformações são mais acentuadas. O teor de SiO_2 e o de Al_2O_3 mantém-se próximo, enquanto há leve diminuição de Fe_2O_3 e CaO . Em contrapartida, a fração “Outros” atinge 30,46%, evidenciando o predomínio da matriz orgânica sobre a fração mineral.

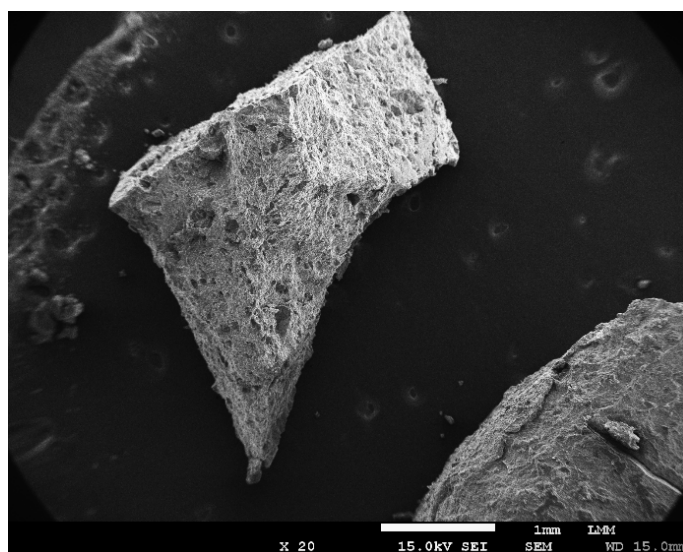
Essa variação é coerente com os resultados de DRX, que mostraram o surgimento de sepiolita e saponita, fases secundárias associadas à reorganização estrutural da montmorilonita e à interação química entre o polímero e os cátions metálicos da argila. A redução de CaO e o ligeiro decréscimo de Na_2O (de 1,93% para 1,39%) sugerem troca iônica efetiva e imobilização de cátions pelo polímero, fenômeno também observado por Liang *et al.* (2024) em misturas bentonita-polímero analisadas por ICP-OES e FTIR. Essa redistribuição química está diretamente relacionada à estabilização da estrutura lamelar e à redução da expansibilidade, resultando em maior rigidez e coesão na matriz.

A interpretação conjunta dos resultados químicos, mineralógicos e mecânicos indica que o aumento do teor de polímero promove uma transição progressiva de um sistema mineral hidratado para uma matriz híbrida organo-mineral consolidada. A bentonita pura exhibe comportamento tipicamente coloidal e expansivo; o B25 representa um estágio intermediário, no qual o polímero começa a se fixar nas lamelas, reduzindo a mobilidade de íons e moléculas de água; e o B50 consolida essa interação, formando ligações estáveis e imobilizando cátions em novas estruturas cristalinas, conforme confirmado pelo aparecimento de sepiolita e saponita nos difratogramas. Essa evolução química explica o aumento expressivo de resistência observado nos ensaios de cisalhamento direto, com o B50 apresentando coesão e ângulo de atrito superiores aos demais, comportamento típico de materiais parcialmente cimentados.

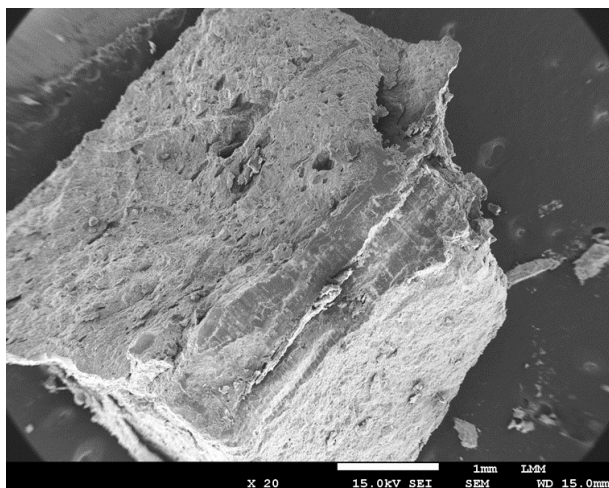
Os resultados de ICP-OES, portanto, demonstram que a interação entre o polímero Terrafix e a fração esmectítica da bentonita modifica a composição química global da matriz, reduz a fração mineral ativa e favorece a estabilização eletroquímica do sistema. Essa evolução química está em concordância com os princípios descritos por Terzaghi e Peck (1967) sobre a relação entre estrutura interna, redução do índice de vazios e aumento da resistência efetiva, confirmando que o processo de estabilização nos compósitos estudados envolve não apenas a adesão física promovida pelo polímero, mas também reações de troca iônica e reorganização mineral que consolidam o comportamento cimentado do material.

5.8. MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV)

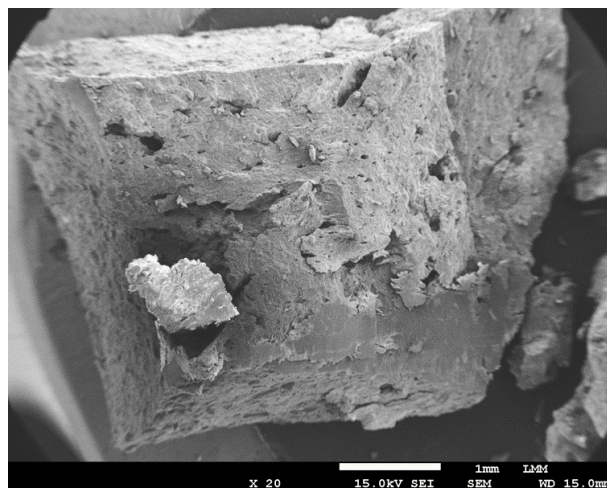
A análise em microscopia eletrônica de varredura (MEV) foi utilizada para observar a morfologia das partículas e avaliar as modificações microestruturais decorrentes da adição do polímero. As imagens foram obtidas com elétrons secundários, em diferentes ampliações, para identificar características de forma, textura e interação entre partículas. Na Figura 5.30(a-c) apresenta-se micrografia obtida por MEV de parte interna de corpos de provas com aumento de 20x da bentonita hidratada com água, B25 e B50, respectivamente.



(a)



(b)



(c)

Figura 5.30. Micrografias obtidas por MEV de parte interna de CPs com 20x de aumento (a) Bentonita hidratada; (b) B25; (c) B50.

A micrografia da bentonita hidratada (Figura 5.30(a)) mostra uma estrutura lamelar característica de argilas esmectíticas, com lâminas irregulares e poros interlamelares bem definidos. Observa-se textura porosa e fragmentada, com presença de microfissuras e cavidades

que indicam a elevada expansibilidade e a facilidade de absorção e liberação de água. A morfologia apresenta empacotamento frouxo e bordas delaminadas, típico de bentonitas naturais após hidratação, nas quais as lamelas se separam parcialmente devido à entrada de moléculas de água interlamelar. Essa estrutura, ainda aberta, favorece alta sucção matricial e elevado potencial de troca catiônica, condizente com os resultados hidráulicos obtidos. (Fernandes *et al.*, 2023)

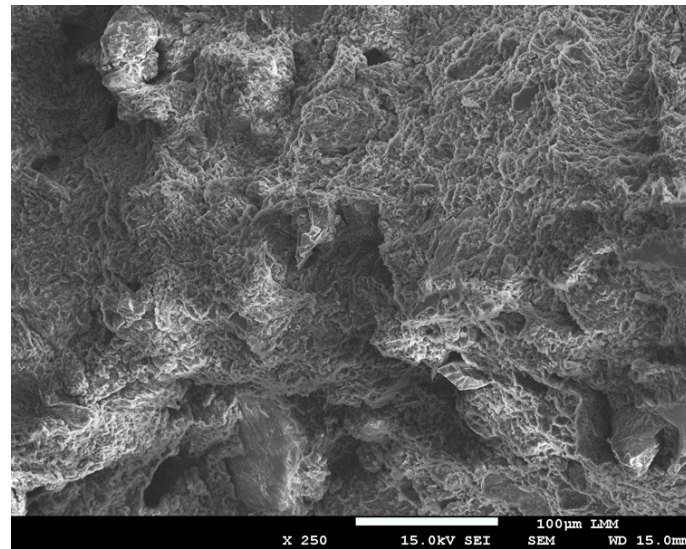
No compósito B25 (Figura 5.30(b)), observa-se reorganização parcial da microestrutura, com lamelas mais próximas e superfícies recobertas por um filme contínuo, atribuído ao polímero. As bordas apresentam menor desagregação, e há redução visível dos poros interlamelares. O material exhibe morfologia mais coesa e compacta, com presença de áreas onde o polímero parece preencher cavidades e atuar como ponte entre as partículas. Essa característica indica interação físico-química inicial entre o polímero e a fração esmectítica, reduzindo a conectividade dos poros e limitando a difusão de água. A microestrutura do B25 confirma a transição de uma matriz puramente lamelar (bentonita) para uma estrutura parcialmente consolidada, em que o polímero começa a exercer papel cimentante. Essa observação é coerente com o comportamento intermediário de sucção e resistência mecânica registrado para esse compósito.

A amostra B50 (Figura 5.30(c)) apresenta uma estrutura densa, homogênea e praticamente contínua, na qual as lamelas originais são pouco distinguíveis. A presença do polímero em maior proporção resulta em preenchimento quase completo dos vazios, formando uma matriz compacta e de aspecto “fundido”, típica de sistemas altamente polimerizados. Nota-se redução acentuada da porosidade e ausência de delaminação, sugerindo forte adesão entre as lamelas e o material polimérico. Essa microestrutura justifica o menor valor de sucção observado nas análises WP4C e o aumento expressivo de coesão verificado nos ensaios de cisalhamento direto, pois a rede polimérica restringe a movimentação da água e confere rigidez interna elevada. O padrão visual é semelhante ao descrito por Xu *et al.* (2022) e Ding *et al.* (2021) em bentonitas modificadas com polímeros, nos quais a matriz passa a se comportar como um compósito híbrido organo-mineral de baixa expansibilidade e alta resistência.

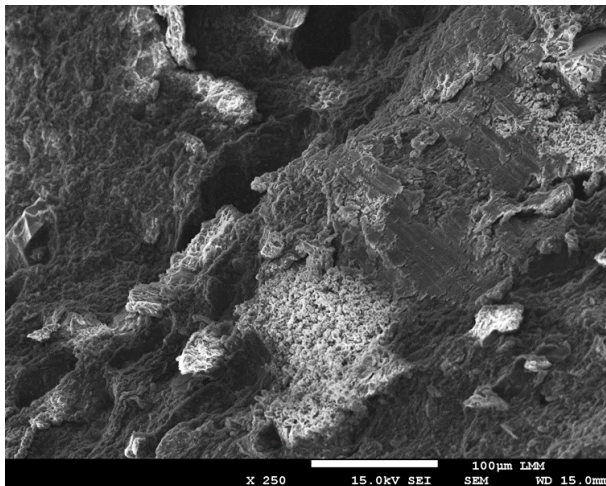
De modo geral, as micrografias evidenciam a evolução microestrutural progressiva: (i) a bentonita hidratada apresenta estrutura lamelar aberta e expansiva; (ii) o B25 mostra início de recobrimento e redução da porosidade; (iii) o B50 atinge estágio de compactação e coesão máximas, com microestrutura consolidada e homogênea.

Essa transição visual confirma o que foi inferido nas análises químicas e mineralógicas, o aumento do teor de polímero promove a integração das lamelas e a formação de uma matriz híbrida contínua, responsável pelo aumento da resistência mecânica e pela estabilização hídrica observada nos ensaios.

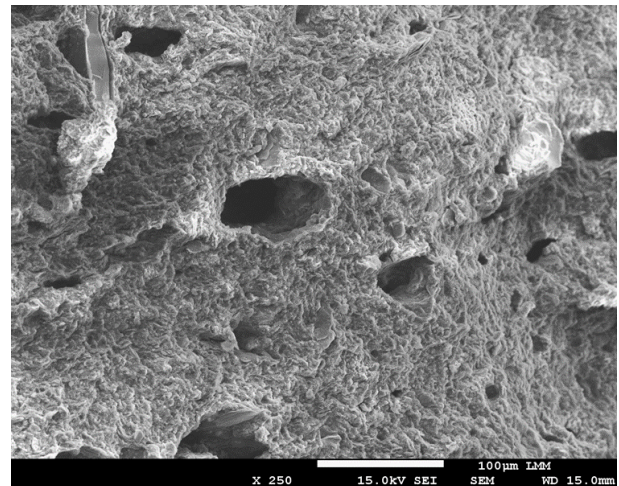
Na Figura 5.31(a-c) apresenta-se micrografia obtida por MEV de parte interna de corpos de provas com aumento de 250x da bentonita hidratada com água, B25 e B50.



(a)



(b)



(c)

Figura 5.31. Micrografias obtidas por MEV de aumento de parte interna de CPs com 250x (a) Bentonita hidratada com água; (b) B25; (c) B50.

As micrografias obtidas com ampliação de 250× permitem observar com maior detalhe a textura superficial e a disposição das lamelas após o processo de hidratação e estabilização. A bentonita hidratada (Figura 5.31(a)) apresenta superfícies irregulares, cavidades e fissuras abertas, com feições típicas de uma matriz expansiva e alta porosidade interlamelar. Essa

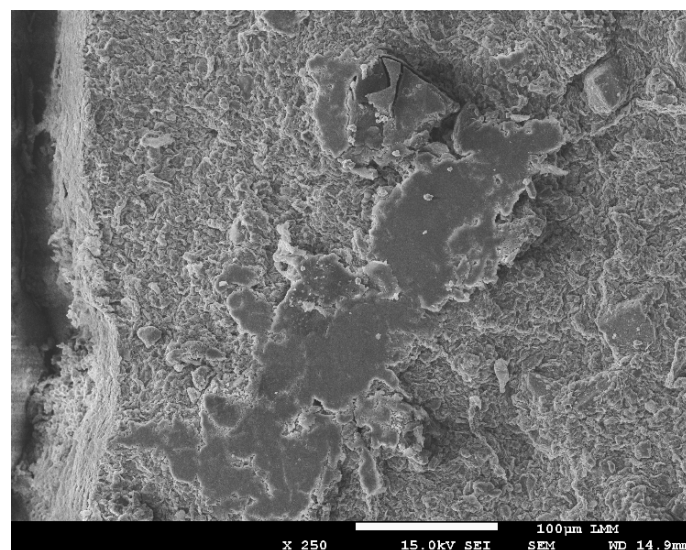
morfologia confirma o caráter altamente ativo e a capacidade de absorção de água do material, observada nas análises de sucção e DRX. (Fernandes *et al.*, 2023)

No B25 (Figura 5.31(b)), nota-se redução expressiva da porosidade e presença de películas contínuas, que recobrem parte das partículas e interligam agregados menores. O polímero atua como elemento de ligação superficial, suavizando as irregularidades e promovendo coesão entre as lamelas. Os poros remanescentes apresentam bordas arredondadas e menor conectividade, indicando que o recobrimento polimérico limitou a comunicação entre vazios.

O B50 (Figura 5.31(c)) exibe estrutura compacta e homogênea, com poros isolados e matriz densamente preenchida, característica de sistemas em que o polímero domina a morfologia interna. As lamelas originais tornam-se praticamente indistintas, substituídas por uma rede contínua de polímero interpenetrado. Essa configuração justifica o comportamento mais rígido e a menor sucção total observados, uma vez que a água passa a estar retida em microvolumes isolados, sem atuar de forma matricial.

De forma geral, as imagens de 250× reforçam a evolução progressiva da microestrutura: da matriz porosa e lamelar da bentonita para uma estrutura parcialmente consolidada em B25 e, por fim, para uma matriz coesa e contínua em B50. Essa transição visual resume o efeito do aumento do teor de polímero, que promove o selamento dos vazios, a uniformização da textura e a consolidação física da matriz

Na Figura 5.32(a-c) apresenta-se micrografia obtida por MEV de parte externa do corpo de prova com aumento de 250x da bentonita hidratada com água, B25 e B50.



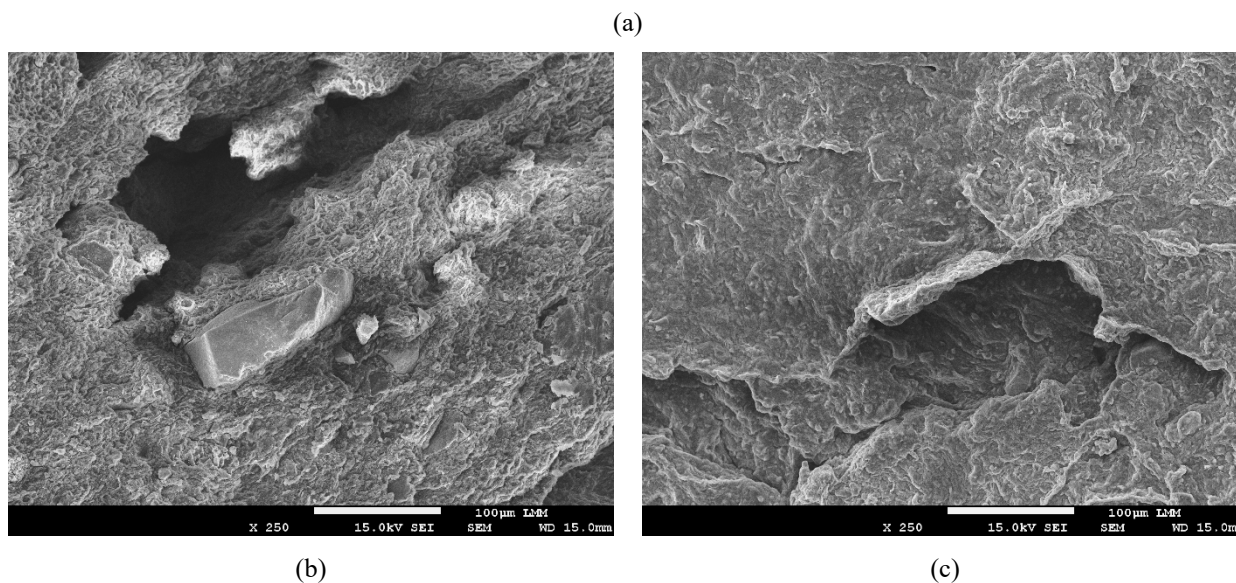


Figura 5.32. Micrografias obtidas por MEV de parte externa de CPs com 250x de aumento (a) Bentonita hidratada com água; (b) B25; (c) B50.

As micrografias obtidas na região externa dos corpos de prova evidenciam diferenças marcantes na textura superficial e na densificação das camadas expostas ao ar durante a cura. Essa zona é particularmente importante porque, no processo de estabilização polimérica, o contato com o oxigênio atua como catalisador da cura do polímero, promovendo reações de entrecruzamento mais intensas e originando uma película superficial com propriedades distintas do interior.

A bentonita hidratada (Figura 5.32(a)) apresenta superfície irregular, com fissuras e cavidades abertas resultantes da retração por secagem. A ausência de qualquer agente aglutinante favorece a delaminação superficial e a formação de microvazios interconectados, evidenciando o comportamento expansivo e a alta sensibilidade à variação de umidade.

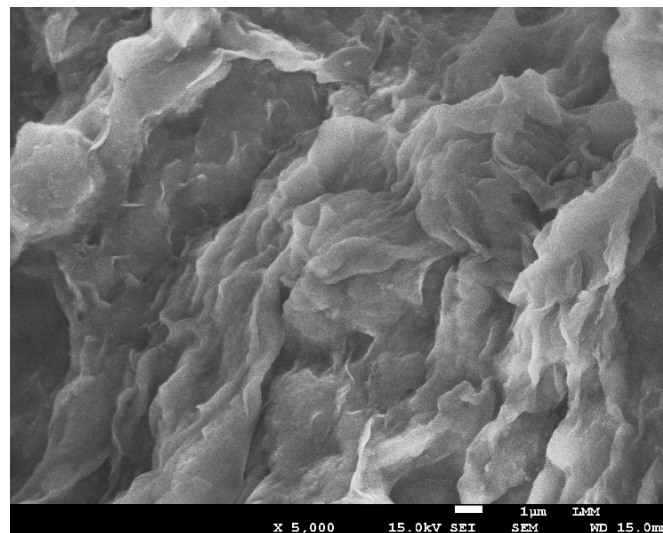
No B25 (Figura 5.32(b)), observa-se uma superfície parcialmente selada, com presença de poros isolados e cobertura polimérica descontínua. O polímero forma um filme irregular que preenche parcialmente os vazios e atua como uma espécie de “cola superficial”, reduzindo a permeabilidade e conferindo maior coesão à camada exposta. Essa morfologia indica que a cura polimérica ainda não é integral, mas já é suficiente para limitar o processo de retração e a propagação de fissuras.

O B50 (Figura 5.32(c)) exhibe uma superfície densamente polimerizada e contínua, com aspecto vitrificado e poucos vazios residuais. Essa morfologia confirma que o aumento do teor de polímero intensifica o efeito de selamento superficial, promovendo a formação de uma

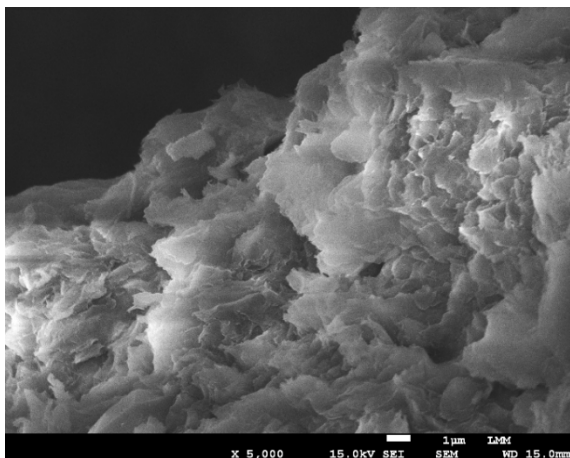
camada rígida e impermeável, resultado da cura acelerada por exposição ao ar. A reação mais intensa nessa região gera uma película com maior grau de entrecruzamento, o que explica a rigidez externa e o comportamento mais frágil do material após a cura total.

Comparativamente, enquanto a bentonita mantém textura aberta e porosa, os compósitos B25 e B50 apresentam transição para uma matriz selada e coesa, sendo que o B50 atinge praticamente o estágio de impermeabilização superficial. Essa camada externa atua como barreira de difusão, reduzindo o fluxo de umidade e contribuindo para a manutenção do equilíbrio hídrico interno, fenômeno que explica a estabilização observada nas curvas de sucção e o aumento da resistência nos ensaios mecânicos.

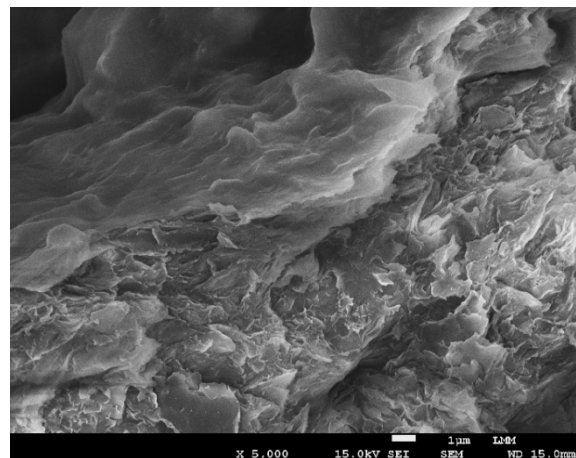
Na Figura 5.33(a-c) apresenta-se micrografia obtida por MEV com aumento de 5000x da bentonita hidratada com água, B25 e B50, respectivamente.



(a)



(b)



(c)

Figura 5.33. Micrografias obtidas por MEV de parte interior de CPs com 5000x de aumento (a) Bentonita hidratada com água; (b) B25; (c) B50.

As micrografias com aumento de 5000× permitem observar a morfologia em escala micrométrica das lamelas e a forma de interação entre o polímero e a fração argilosa. A bentonita hidratada (Figura 5.33(a)) exibe um empilhamento de lamelas sobrepostas e parcialmente delaminadas, separadas por espaços interlamelares bem definidos. A textura é típica de argilas esmectíticas em estado hidratado, apresentando superfície rugosa e presença de microvazios, compatíveis com a alta capacidade de absorção e liberação de água observada nas análises de sucção.

No compósito B25 (Figura 5.33(b)), a superfície revela camadas parcialmente recobertas por filme polimérico contínuo, que atua preenchendo poros e reduzindo a abertura entre as lamelas. As feições laminares ainda são perceptíveis, mas com bordas suavizadas e regiões de junção onde o polímero funciona como ponte interpartículas. Essa configuração evidencia o início da integração físico-química entre o polímero e a bentonita, reduzindo a conectividade dos microporos e conferindo maior coesão estrutural.

O B50 (Figura 5.33(c)) apresenta lamelas totalmente recobertas e envoltas por matriz polimérica homogênea, com ausência quase total de vazios e fronteiras interlamelares pouco visíveis. O polímero preenche os interstícios e gera uma textura compacta e contínua, indicando completa imobilização da água interlamelar e forte adesão entre as fases. Essa morfologia explica o comportamento mais rígido e a redução da sucção observada nos ensaios WP4C, além do aumento expressivo da coesão nos ensaios de cisalhamento direto.

De forma geral, o aumento da resolução evidencia o processo progressivo de recobrimento, preenchimento e consolidação lamelar, que evolui de uma estrutura aberta e porosa (bentonita) para uma matriz híbrida e densa (B50). Essa transição confirma que o mecanismo de estabilização ocorre por formação de filmes poliméricos entre e sobre as lamelas, resultando em menor expansibilidade, maior rigidez e elevada resistência ao cisalhamento.

5.9. MICROTOMOGRAFIA DE RAIOS X (μ CT)

A microtomografia de raios X (μ CT) foi empregada para complementar as análises microestruturais, permitindo a visualização tridimensional da distribuição interna de fases do compósito B50 e da bentonita hidratada com a água. O ensaio foi realizado para o compósito B50 apenas, por tido respostas mecânicas superiores ao compósito B25.

As imagens foram processadas com base no contraste de densidade, possibilitando a distinção entre partículas minerais, matriz polimérica e vazios. Na apresenta-se a reconstrução tridimensional e os planos ortogonais do corpo de prova de bentonita.

As imagens foram processadas com base no contraste de densidade, possibilitando distinguir partículas minerais, matriz polimérica e vazios. As Figura 5.34 (a-d) apresentam, respectivamente, as reconstruções tridimensionais e os planos ortogonais dos corpos de prova de bentonita hidratada e do compósito B50.

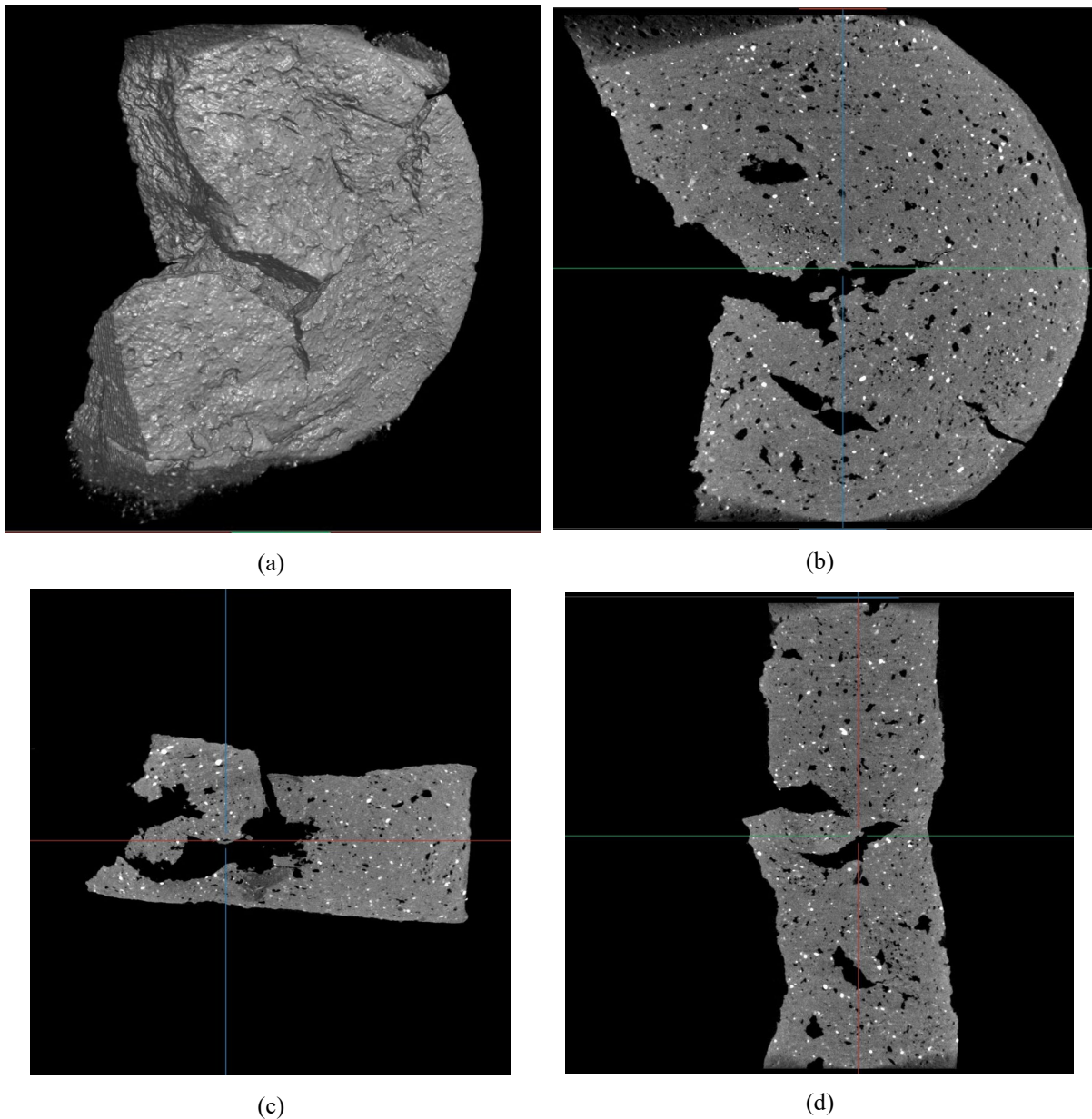


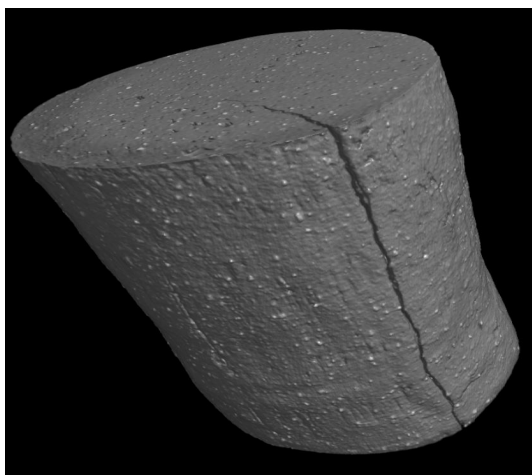
Figura 5.34. Bentonita hidratada com água (a) reconstrução tridimensional vista lateral; (b) reconstrução tridimensional vista superior; (c) plano ortogonal horizontal; (d) plano ortogonal vertical.

A bentonita hidratada apresentou estrutura interna irregular e fragmentada, marcada pela presença de trincas, reentrâncias e vazios alongados distribuídos ao longo de todo o corpo de prova. Essa morfologia é típica de materiais altamente plásticos e expansivos, que sofrem retração volumétrica significativa durante a secagem.

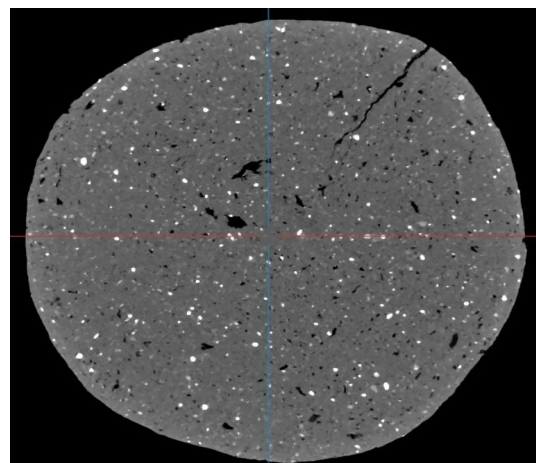
Nos planos ortogonais, é possível observar distribuição heterogênea de densidade e presença de macrovazios interconectados, especialmente nas regiões centrais e nas zonas de transição entre camadas compactadas. O padrão tridimensional confirma a ocorrência de anisotropia estrutural e heterogeneidade volumétrica, características associadas à natureza esmectítica e à elevada capacidade de absorção de água do material.

Devido à forma irregular e à presença de fissuras abertas nas faces externas, não foi possível realizar a quantificação precisa da porosidade total. As reentrâncias e o deslocamento do volume durante a reconstrução inviabilizaram o isolamento computacional da amostra. Ainda assim, a análise qualitativa permitiu identificar um alto grau de conectividade entre os vazios e uma estrutura interna instável, condizente com a elevada sucção total e a plasticidade observadas nos ensaios WP4C e de cisalhamento direto.

A Figura 5.35 apresenta as imagens obtidas por microtomografia de raios X do compósito B50, incluindo a reconstrução tridimensional e os planos ortogonais superior, lateral e vertical. A partir do contraste de densidade foi possível distinguir as diferentes fases constituintes do material, permitindo também a quantificação volumétrica das porosidades.



(a)



(b)

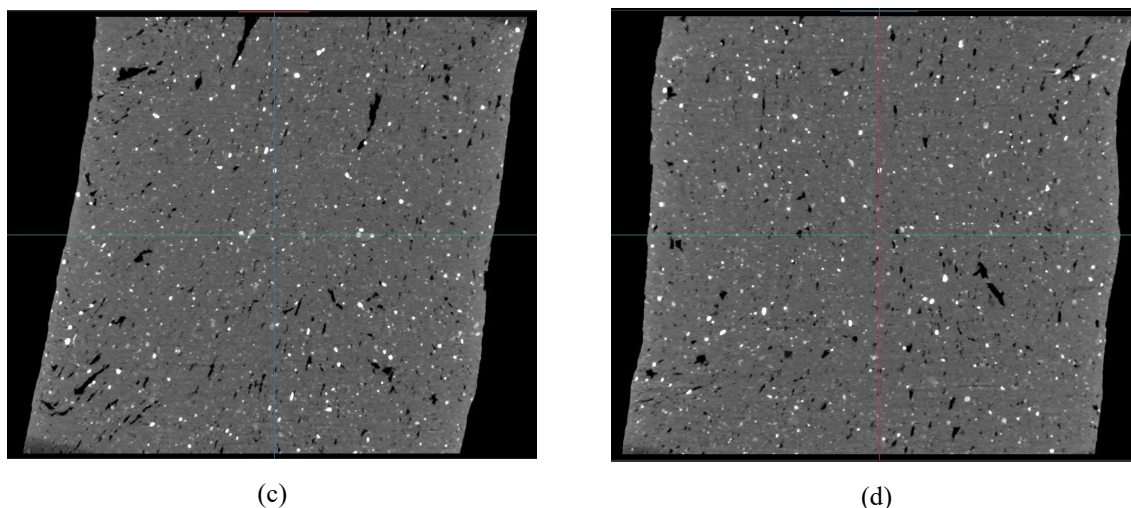


Figura 5.35. Compósito B50 (a) reconstrução tridimensional; (b) plano ortogonal superior; (c) plano ortogonal lateral; (d) plano ortogonal vertical.

As imagens tridimensionais revelam uma estrutura interna compacta, densa e homogênea, com distribuição de vazios pequena e bem definida. A análise volumétrica indicou três fases principais: uma fase cinza predominante (97,5 %), correspondente à matriz bentonítica recoberta e interpenetrada pelo polímero; uma fase escura (1,4 %), associada aos poros isolados e não interconectados; e uma fase clara (1,1 %), atribuída a minerais acessórios de maior densidade (provavelmente óxidos de ferro e/ou titânio) compatíveis com os teores de Fe_2O_3 e TiO_2 obtidos nas análises químicas por ICP-OES.

Nos planos ortogonais observa-se que os vazios residuais apresentam morfologia arredondada e distribuição homogênea, sem formar trajetórias contínuas ou fissuras interligadas. Essa configuração indica baixa conectividade de poros e efetivo preenchimento dos interstícios pela fase polimérica, o que reforça a eficiência do processo de estabilização. O contraste entre as regiões mais densas e os microvazios mostra ainda a ausência de segregação interna e a boa dispersão do polímero em toda a matriz.

O volume total de poros identificado ($\approx 1,4\%$) representa uma redução significativa em relação à estrutura inicial da bentonita pura, em que a presença de trincas e reentrâncias impossibilitou a quantificação. Essa densificação volumétrica é resultado direto da formação da matriz híbrida polimérica, que sela os microvazios, confere maior integridade mecânica e reduz drasticamente a permeabilidade. Além disso, a baixa fração de minerais pesados ($\approx 1\%$) e a homogeneidade observada confirmam que o polímero atuou como agente de ligação estável, promovendo uma estrutura isotrópica e coerente com o comportamento mecânico e hidráulico obtido nos ensaios de sucção e cisalhamento direto.

Portanto, a microtomografia de raios X evidencia que o compósito B50 apresenta microestrutura volumétrica altamente consolidada, com porosidade total próxima de 1 %, baixa anisotropia interna e ausência de defeitos estruturais relevantes. Esses resultados corroboram as análises micrográficas (MEV) e químicas (ICP-OES), demonstrando que a adição da solução de 50 % de polímero transforma a bentonita em um compósito denso, homogêneo e estável, no qual a resistência é controlada predominantemente pela coesão físico-química da matriz polimérica.

Na Figura 5.36(a-b) está o *QR-Code* do vídeo do ensaio de microtomografia de raio X (μ CT) realizado com SP40 para a reconstrução tridimensional e os planos ortogonais do corpo de prova.

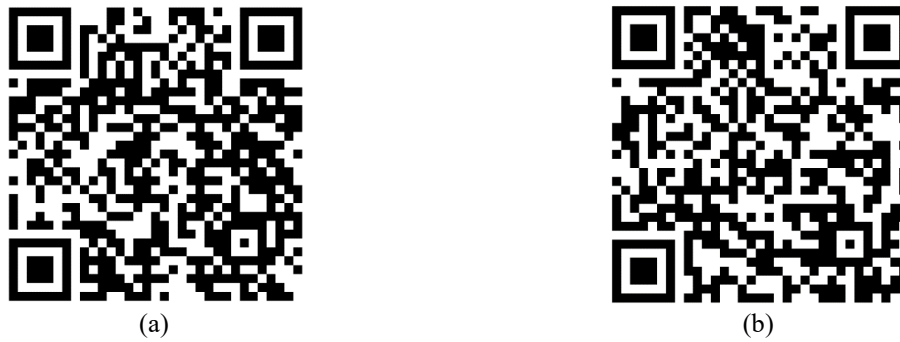


Figura 5.36. Microtomografia de raio X (μ CT) realizado com B50 (a) Reconstrução tridimensional (b) Corte da seção ortogonal.

5.10. CONSIDERAÇÕES FINAIS SOBRE RESULTADOS OBTIDOS

A caracterização física, mecânica e microestrutural da bentonita e dos compósitos B25 e B50 permitiu compreender a influência da adição de polímero sobre o comportamento expansivo e resistente do material. Os resultados demonstraram que o polímero atua simultaneamente como agente cimentante, selante e regulador hídrico, promovendo a transição da bentonita, originalmente plástica e expansiva, para uma matriz híbrida organo-mineral de elevada coesão e rigidez.

Nos ensaios de Limites de Atterberg e compactação, verificou-se redução expressiva da plasticidade e da umidade ótima com o aumento do teor de polímero, evidenciando menor expansibilidade e maior estabilidade volumétrica. O limite de liquidez reduziu de 462 % para 210 %, e o índice de plasticidade de 420 % para 127 %, deslocando a curva de compactação para menores teores de umidade e confirmando o efeito estabilizador da matriz polimérica.

Os ensaios de resistência à compressão não confinada (RCS) e cisalhamento direto mostraram evolução progressiva da resistência com o tempo de cura. O B25 apresentou crescimento de 0,14 MPa aos 7 dias para 6,4 MPa aos 45 dias, enquanto o B50 atingiu 7,8 MPa no mesmo período. No cisalhamento direto, o intercepto coesivo (c') evoluiu de 20 kPa para 1767 kPa no B25 e de 41 kPa para 2293 kPa no B50, acompanhados de aumentos no ângulo de atrito de 18° para 46° e 3° para 51° , respectivamente. Essa evolução indica a formação gradual de uma rede polimérica contínua, que cimenta as partículas e confere comportamento de ruptura frágil e de alta rigidez, típico de materiais densamente estruturados.

O aumento simultâneo de c' e ϕ' mostra que o ganho de resistência é controlado pela coesão físico-química da matriz e pela melhoria do intertravamento entre partículas, enquanto a ductilidade diminui com o avanço da cura.

A análise de sucção total (WP4C) revelou redução significativa do potencial mátrico nos compósitos, com valores estabilizados entre 30 e 60 MPa no B50, contra picos de 100 MPa na bentonita pura. O polímero atua reduzindo a conectividade dos poros e retardando a evaporação, o que explica o equilíbrio hídrico precoce e a menor variabilidade observada. Essa estabilização hídrica reflete-se no desempenho mecânico, indicando a transição de um controle físico (por água adsorvida) para um controle físico-químico, dominado pelas ligações poliméricas.

As análises de DRX e ICP-OES confirmaram a natureza esmectítica da bentonita (montmorilonita sódica ativa) e mostraram que o polímero não gera novas fases cristalinas no B25, mas recobre e interpenetra as lamelas. No B50, entretanto, foram identificadas sepiolita e saponita, indicando reorganização lamelar e complexação entre o polímero e os cátions metálicos da argila, o que reforça a redução da expansibilidade e o aumento da rigidez. A diminuição de SiO_2 e Al_2O_3 e o aumento da fração orgânica (“Outros”) evidenciam a formação de uma matriz híbrida organo-mineral consolidada.

A microscopia eletrônica (MEV) e a microtomografia de raios X (μCT) revelaram a evolução microestrutural: a bentonita apresentou estrutura lamelar aberta e porosa; o B25, lamelas recobertas e poros parcialmente preenchidos; e o B50, uma matriz compacta e homogênea, com porosidade total de apenas 1,4 %. As micrografias externas mostraram o “efeito cola” da camada superficial, intensificado pelo contato com o ar, formando uma película rígida e impermeável que contribui para o controle da evaporação e da retração. A μCT

confirmou o caráter isotrópico e denso da estrutura final do B50, sem trincas internas e com preenchimento uniforme dos interstícios pela fase polimérica.

De forma integrada, os resultados demonstram que a adição de polímero à bentonita promove redução da plasticidade, estabilização hídrica, aumento de coesão e rigidez estrutural e diminuição da porosidade, configurando um processo de estabilização progressivo e duradouro. O compósito B25 representa a fase intermediária de estruturação, enquanto o B50 consolida o estágio de maturação, com comportamento mecânico e microestrutural compatíveis a um material cimentado de alta resistência e baixa deformabilidade. Assim, a bentonita estabilizada com polímero revela grande potencial como matriz de engenharia geotécnica de alto desempenho, reunindo estabilidade volumétrica, elevada resistência ao cisalhamento e microestrutura densamente integrada

CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

6.1. CONCLUSÕES

O presente trabalho teve como objetivo avaliar o comportamento mecânico, químico e microestrutural de dois solos de naturezas distintas, um arenoso e outro expansivo, estabilizados com polímero sintético, buscando compreender os mecanismos de interação polímero-solo e propor parâmetros racionais de dosagem e correlação de resistência. A análise integrada dos resultados obtidos permitiu confirmar a efetividade do polímero como agente estabilizante, capaz de modificar substancialmente as propriedades físicas e estruturais dos solos, promovendo ganhos expressivos de rigidez, coesão e durabilidade.

Nos ensaios com o solo arenoso, verificou-se que a adição de 4% de polímero conferiu caráter coesivo a um material originalmente não coesivo, transformando sua estrutura granular em uma matriz parcialmente cimentada. Os resultados de compactação evidenciaram aumento da densidade seca e leve redução da umidade ótima, indicando melhor acomodação dos grãos e redução da porosidade. A resistência à compressão simples evoluiu de aproximadamente 0,5 MPa aos 2 dias para cerca de 2,5 MPa aos 30 dias, demonstrando a forte relação entre ganho mecânico, desenvolvimento das ligações poliméricas e tempo de cura. Os ensaios de cisalhamento direto apontaram aumento contínuo da coesão com estabilização do ângulo de atrito, evidenciando que o polímero atua como elemento ligante sem alterar significativamente o mecanismo de atrito entre partículas minerais. O módulo de resiliência apresentou incremento expressivo, alcançando valores superiores a 1000 MPa após 45 dias de cura, compatíveis com a formação de uma rede polimérica contínua e estável.

As análises de sucção total demonstraram que o aumento de resistência não está associado à variação do potencial matricial, mas sim à evolução físico-química da matriz tratada. As observações microestruturais por MEV e μ CT confirmaram a formação de películas poliméricas recobrando os grãos, redução da porosidade, homogeneização interna e ausência de trincas. As análises químicas e mineralógicas por DRX e ICP-OES indicaram que o polímero não altera a mineralogia básica do solo, atuando principalmente por mecanismos físico-químicos de recobrimento e ponteamto entre partículas. O modelo racional de dosagem,

baseado na relação entre porosidade e teor volumétrico de polímero, apresentou elevada correlação com os valores de resistência, demonstrando sua aplicabilidade como ferramenta preditiva robusta para compósitos solo-polímero.

Os ensaios envolvendo a bentonita e os compósitos poliméricos B25 e B50, constatou-se que o polímero alterou de forma significativa o comportamento expansivo e o caráter plástico do solo, promovendo aumento de coesão, redução da expansibilidade e formação de uma matriz rígida e estável. A resistência à compressão simples apresentou crescimento acentuado ao longo do tempo de cura, atingindo valores de até 7,8 MPa no compósito B50, acompanhados de interceptos coesivos superiores a 2200 kPa. Esse comportamento evidencia a consolidação de uma estrutura fortemente cimentada, de elevada rigidez e ruptura predominantemente frágil. As análises microestruturais confirmaram a formação de uma matriz densa e contínua, com redução significativa da porosidade total. A microtomografia revelou estrutura homogênea, com porosidade inferior a 1,5% e ausência de descontinuidades internas, reforçando o caráter altamente consolidado do compósito. As análises químicas sugeriram reorganização lamelar e complexação com cátions metálicos da argila, sem formação de novas fases cristalinas, mas com aumento expressivo da fração orgânica associada à matriz polimérica.

Os resultados de sucção demonstraram que o ganho de resistência é independente de variações hídricas, sendo determinado majoritariamente pelos efeitos físico-químicos introduzidos pelo polímero. A combinação entre rigidez, redução de porosidade e estabilidade estrutural observada no compósito B50 caracteriza um material de desempenho elevado, com comportamento comparável ao de compósitos cimentados tradicionais.

De modo geral, a incorporação do polímero promoveu modificações expressivas tanto em solos arenosos quanto na bentonita, embora por mecanismos distintos. Nos solos granulares, o efeito predominante foi o aumento da coesão e da densificação, resultando em ganho progressivo de resistência e rigidez. Nos solos expansivos, o polímero atuou reduzindo a plasticidade, atenuando a expansibilidade e substituindo parcialmente as interações capilares por ligações químicas e físico-químicas mais estáveis. Em ambos os casos, a formação de uma rede polimérica contínua se confirmou como o fator determinante para o desempenho final dos compósitos.

O método racional de dosagem proposto, baseado na relação entre porosidade e teor volumétrico de polímero, mostrou-se eficaz para estimar a resistência dos compósitos, com elevados coeficientes de determinação e comportamento consistente com o observado em

materiais cimentícios. Esse resultado confirma a possibilidade de aplicar conceitos consolidados da mecânica dos solos e da engenharia de pavimentos na modelagem de compósitos poliméricos, representando uma contribuição metodológica relevante para a área.

Do ponto de vista científico, esta tese apresenta contribuições originais e significativas para o estado da arte em solos estabilizados com polímeros. A investigação simultânea de um solo arenoso não coesivo e de uma bentonita altamente expansiva, utilizando o mesmo agente estabilizante e o mesmo protocolo experimental, constitui uma abordagem inédita na literatura nacional e internacional. A integração de análises mecânicas, hidráulicas, químicas e microestruturais permitiu compreender com maior profundidade os mecanismos de interação polímero-solo, destacando que o desempenho da estabilização é fortemente dependente da mineralogia e da microestrutura inicial de cada solo. A proposição e validação de um método racional de dosagem para compósitos poliméricos, alinhado aos fundamentos utilizados em materiais cimentados, representa outro avanço importante, ao fornecer uma ferramenta objetiva para estimativa de resistência e para a definição de teores ótimos de polímero. Além disso, o conjunto abrangente de análises microestruturais realizado nesta tese contribui para um entendimento ainda pouco explorado na literatura, ao evidenciar de forma integrada os mecanismos de recobrimento superficial, ponteamto, reorganização interna e evolução da matriz polimérica ao longo do tempo de cura.

Conclui-se, portanto, que a estabilização de solos com polímeros sintéticos constitui uma alternativa tecnicamente viável, de elevada eficiência e potencialmente mais sustentável quando comparada a métodos tradicionais baseados em aglomerantes minerais. O teor de polímero, o tipo de solo e o tempo de cura mostraram-se parâmetros fundamentais para o comportamento final dos compósitos. Os resultados obtidos consolidam as bases para o uso racional de polímeros na engenharia geotécnica, oferecendo subsídios experimentais e metodológicos que ampliam as possibilidades de aplicação desses materiais em pavimentação e em outras áreas da infraestrutura.

6.2. SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

- Realizar de ensaios triaxiais estáticos (CU e CD) em compósitos solo-polímero, visando aprofundar a avaliação do comportamento tensão-deformação e da resistência efetiva;

- Estudo da durabilidade e do desempenho em longo prazo sob ciclos de umedecimento e secagem, variação térmica e exposição ambiental;
- Análise da permeabilidade e da condutividade hidráulica dos compósitos, correlacionando-as à microestrutura obtida por μ CT e MEV;
- A aplicação de ensaios triaxiais cíclicos, fadiga e LWT para investigar a resposta resiliente, deformação permanente sob carregamentos repetidos e o desgaste dos compósitos sob carregamento repetidos, para aplicações em camadas de revestimentos de pavimentos;
- Validação e ampliação do método racional de dosagem para diferentes solos e tipos de polímeros, ajustando os parâmetros do modelo $\eta/(P_{iv})^{1,1}$ às diversas condições geotécnicas;
- Aplicação de ACV para os compósitos estudados, a fim de avaliar o impacto ambiental deste tipo de estabilização;
- Execução de trechos experimentais de pistas e aterros para avaliação do comportamento campo x laboratório dos compósitos, bem como mudança do comportamento mecânico a longo prazo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABDELGELIL, A. A.; *et al.* (2025). Enhancement of sandy soil water retention using polymeric hydrogels. *Scientific Reports*. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-94490-4>

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas (2016). NBR 6457: Amostras de solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro.

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas (2016). NBR 6459: Solo – Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro.

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas (2016). NBR 7180: Solo – Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro.

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas (2016). NBR 7182: Solo – Ensaio de compactação. Rio de Janeiro.

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas (2022). NBR 12770: Solo coesivo – Determinação da resistência à compressão não confinada – Método de ensaio. Rio de Janeiro.

AJAYI-MAJEBI, A.; *et al.* Strength characteristics of polymer-stabilized soils for low-volume airfield pavements. (Periódico/anais – completar com dados de publicação).

AL-KHANBASHI, A.; EL-GAMAL, M. (2003). Modification of sandy soil using water-borne polymer. *Journal of Applied Polymer Science*, 88(10): 2484–2491.

AL-MAHBASHI, M.; *et al.* (2024). The role of biopolymers on the water retention capacity of sand. *Sustainability*, 16(19), 8612. <https://doi.org/10.3390/su16198612>

ALELVAN, A.; FESTUGATO, L.; CONSOLI, N. C.; *et al.* (2022). Proposal of a new construction material: polymer-stabilized sand for geotechnical applications. *Sustainability*, 14(x): 1–xx.

ALMEIDA, G. B. O.; CASAGRANDE, M. D. T.; CALVANCANTE, E. H. (2016). Avaliação da resistência à compressão simples de misturas de solo e escória de cobre aditivadas com cimento portland aplicadas à pavimentação. 18º Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, Belo Horizonte, MG, 7 p.

ANTT – Agência Nacional de Transportes Terrestres (2015). Estudo do comportamento mecânico de solos estabilizados quimicamente no Estado do MS. Brasília.

ASTM, American Society for Testing and Materials (2011). D3080: Standard test method for direct shear test of soils under consolidated drained conditions.

ASTM, American Society for Testing and Materials (2014). D5550: Standard test method for specific gravity of soil solids by gas pycnometer.

ASTM D1557-12e1 (2015). Standard test methods for laboratory compaction characteristics of soil using modified effort (56,000 ft-lbf/ft³ (2,700 kN-m/m³)). West Conshohocken, PA: ASTM International.

ASTM D1633-17 (2017). Standard test methods for compressive strength of molded soil-cement cylinders. West Conshohocken, PA: ASTM International.

ASTM D6836-16. Standard test methods for determination of the soil water characteristic curve for desorption using hanging column, pressure extractor, chilled mirror hygrometer, or centrifuge. West Conshohocken, PA: ASTM International.

BAGHINI, M. S.; ISMAIL, A.; NASERALAVI, S. S.; FIROOZI, A. A. (2016). Performance evaluation of road base stabilized with styrene–butadiene copolymer latex and Portland cement. *Construction and Building Materials*

BALBO, J. T. (2002). *Pavimentação – Materiais, suas propriedades e técnicas construtivas*. São Paulo: Editora USP.

BANEDJSCHAFIE, S.; DÜRNER, W. (2013). Water retention properties of a sandy soil with superabsorbent polymers as affected by aging and water quality. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 176(5): 764–773.

BARRETO, T. M. (2019). *Influência da adição de copolímero de butadieno e estireno modificado no comportamento de uma areia*. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, RJ, 100 p.

BARRETO, T. M.; REPSOLD, L. L.; CASAGRANDE, M. D. T. (2018). Melhoramento de solos arenosos com polímeros. 19º Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, Salvador, BA, 11 p.

BELCHIOR, I. M. R. M.; CASAGRANDE, M. D. T.; ZORNBERG, J. G. (2017). Swelling behavior evaluation of a lime-treated expansive soil through centrifuge test. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 29(12).

BENETTI, M. (2015). *Comportamento hidráulico e mecânico de um solo residual tratado com cal*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre.

BENVINDO, R. A. F. (2009). *Análise comparativa dos instrumentos de regulamentação das políticas de proteção ambiental e de promoção do ecoturismo: caso do Parque Estadual do Jalapão – TO*. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de Brasília, DF, 196 p.

BOAVENTURA, N. F.; SOUSA, T.F.P; CASAGRANDE, M.D.T.. (2023). The application of an eco-friendly synthetic polymer as a stabilizer for sandy soil. *Polymers*, 15(1), 157. <https://doi.org/10.3390/polym15010157>

BRAJA, M. D. (2011). *Fundamentos de Engenharia Geotécnica*. 6ª ed. São Paulo: Cengage Learning.

BRAJA, M. D. (2008). *Advanced Soil Mechanics*. 3rd ed. Taylor & Francis Group.

BRAZETTI, R. (1996). Aditivos orgânicos para estabilização de solos: origem e pesquisas. In: 7ª Reunião de Pavimentação Urbana, São José dos Campos, SP.

BRAJA, M. D. (2011). *Fundamentos de Engenharia Geotécnica*. 6ª ed. São Paulo: Cengage Learning.

BRITO, L. C.; PARANHOS, H. S. (2017). Estabilização de solos. *Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento*, 2(1), 425–438.

BROWN, S.; BARTOS, M. (2023). Factors that affect measurement using the WP4C dewpoint potential meter to determine water potential. *Agricultural and Forest Meteorology*, xx(x): xx–xx.

- CANEVAROLO JR., S. V. (2006). Ciência dos polímeros: um texto básico para tecnólogos e engenheiros. São Paulo: Artliber Editora.
- CARNEIRO, B. M.; ADORNO, L. F. M. (2010). A implantação de vias e o manejo de áreas protegidas na região do Jalapão: a rodovia TO-110 e seu entorno. *Caminhos de Geografia*, 11(33): 120–137.
- CARNEIRO, B. M. (2020). Estabilização de rejeito de minério de ferro com copolímero acrílico estirenado e fibras de polipropileno. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Universidade de Brasília, 2020.
- CARVALHO, J.; GITIRANA JUNIOR, G. F. N.; MACHADO, S. L.; MASCARENHA, M. M. A.; SILVA FILHO, F. C. (Orgs.) (2015). Solos não saturados no contexto geotécnico. São Paulo: ABMS, 759 p.
- CARVALHO, L. M. C.; CASAGRANDE, M. D. T. (2019). Mechanical behavior of reinforced sand with natural curaua fibers through full-scale direct shear tests. 7th International Symposium on Deformation Characteristics of Geomaterials. E3S Web of Conferences, 92.
- CASAGRANDE, M. D. T. (2005). Comportamento de solos reforçados com fibras submetidos a grandes deformações. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 219 p.
- CEN – European Committee for Standardization (2003). EN 12697-22: Bituminous mixtures – Test methods for hot mix asphalt – Part 22: Wheel tracking.
- CNT – Confederação Nacional do Transporte (2018). Anuário CNT do Transporte: Estatísticas consolidadas. Brasília, DF, 229 p.
- CONSOLI, N. C.; CASAGRANDE, M. D. T.; THOMÉ, A.; ROSA, F. D.; FAHEY, M. (2009). Effect of relative density on plate loading tests on fibre-reinforced sand. *Géotechnique*, 59(5): 471–476.
- CONSOLI, N. C.; DALLA ROSA, A.; SALDANHA, R. B. (2011). Variables governing strength of compacted soil–fly ash–lime mixtures. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 23(4): 432–440.
- CONSOLI, N. C.; FOPPA, D.; FESTUGATO, L.; HEINECK, K. S. (2007). Engineering behavior of fiber-reinforced sand. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, 133(7): 993–1004.
- CONSOLI, N. C.; *et al.* (2007). Key parameters controlling strength of artificially cemented soils. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, 133(2): 197–205.
- COSTA, W. D. (2012). Geologia de barragens. São Paulo: Oficina de Textos.
- CRYSTAL IMPACT (2025). Match! – Phase Identification from Powder Diffraction. Version 3.x. Bonn, Germany: Crystal Impact.
- DALLA ROSA, A. (2009). Estudo dos parâmetros-chave no controle da resistência de misturas solo-cinza-cal. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre.
- DANIELS, J. L.; INYANG, H. I. (2004). Contaminant-immobilization and geomechanical stabilization of soils using polymeric materials. *Engineering Geology*, 72: 171–186.

- DAS, B. M. (2007). *Principles of Geotechnical Engineering*. 6th ed. Thomson, California, 672 p.
- DAS, B. M. (2008). *Advanced Soil Mechanics*. 3rd ed. Taylor & Francis, New York, 690 p.
- DAVIDOVITS, J. (1991). Geopolymers: inorganic polymeric new materials. *Journal of Thermal Analysis*, 37: 1633–1656.
- DING, S.; ZHANG, Y.; LIU, Z. (2021). Study on bentonite–polymer interactions using suction and microstructure analyses. *Applied Clay Science*, 203: 105992.
- DING, Y.; ZHANG, X.; CHEN, Y. (2021). Water retention and swelling characteristics of bentonite modified with cationic and anionic polymers. *Applied Clay Science*, 210: 106164.
- DNER (1994). ME 228: Solos – Compactação em equipamento miniatura – Método de ensaio. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, Rio de Janeiro.
- DNER-IE 004/94 (1994). Ensaio de compressão simples em misturas solo-cimento. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, Rio de Janeiro.
- DNER-ME 180/94 (1994). Solos – Determinação da resistência à compressão simples em corpos de prova cilíndricos. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, Rio de Janeiro.
- DNER-ME 201/94 (1994). Solos – Determinação da resistência à compressão simples de corpos de prova compactados. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, Rio de Janeiro.
- DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (2006). *Manual de pavimentação*. 3. ed. Rio de Janeiro, 274 p. (IPR Publ. 719).
- DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (2010). DNIT 143/2010-ES – *Pavimentação – Base de solo-cimento – Especificação de serviço*. Rio de Janeiro.
- DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (2018). 134: *Pavimentação – Solos – Determinação do módulo de resiliência – Método de ensaio*. Rio de Janeiro.
- DNIT (2018). 181/2018-ME – *Pavimentação – Solos estabilizados com ligantes hidráulicos – Determinação do módulo de resiliência – Método de ensaio*. Rio de Janeiro.
- FERNANDES, R.; BOAVENTURA, N. F.; SILVA, T. F. S. (2023). Microstructural analysis of polymer-treated bentonitic soils. *Geotechnical Testing Journal*, 46(5): 1–14.
- FORDE, M. (2009). Bitumen properties and test methods. In: *ICE Manual of Construction Materials*, Vol. I/II. ICE Publishing, London, cap. 23, p. 263–272.
- FREDLUND, D. G.; RAHARDJO, H. (1993). *Soil Mechanics for Unsaturated Soils*. New York: John Wiley & Sons.
- GARCIA, N. F.; VALDES, J. R.; CORTES, D. D. (2015). Strength characteristics of polymer-bonded sands. *Géotechnique Letters*, 5(3): 212–216.
- GOOGLE (2020). *Google Earth Pro – Imagens de satélite da região de Mateiros – TO, Brasil*. Acessado em 2020.
- GÓMEZ, A. M. J. (2016). *Comportamento mecânico de um agregado reciclado a partir de resíduos de construção e demolição submetido a carregamentos cíclicos*. Tese de Doutorado, Publicação GTD-117/16, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, DF, 185 p.

- GREEN, W. H.; STOTT, D. E. (1999). Polyacrylamide: a soil conditioner to reduce erosion on construction sites. *Journal of Soil and Water Conservation*, 54(3): 613–617.
- GRIM, R. E.; GÜVEN, N. (1978). *Bentonites: Geology, Mineralogy, Properties and Uses. Developments in Sedimentology*, v. 24. Amsterdam: Elsevier.
- GUIMARÃES, A. C. R.; MOTTA, L. M. G. (2000). Execução de revestimento asfáltico com agregado de laterita lavada no Acre. In: 13º Encontro de Asfalto, Rio de Janeiro. Anais..., p. 86–95.
- HERNÁNDEZ, J.; VARGAS, S.; ESTÉVEZ, M.; VÁZQUEZ, G.; ZEPEDA, A.; RODRÍGUEZ, R. (2005). Hydrophobic modification of an expansive soil using polymers and organic compounds: a comparative study with lime. *Géotechnique*, 55(8): 613–616.
- HICKS, R. G. (1970). *Factors Influencing the Resilient Properties of Granular Materials*. PhD Thesis – University of California, Berkeley.
- HOLLAWAY, L. (2009). Polymer composites in construction: a brief history. *Engineering and Computational Mechanics*, 162(3): 107–118.
- HUANG, J.; KOGBARA, R. B.; HARIHARAN, N.; MASAD, E. A.; LITTLE, D. N. (2021). A state-of-the-art review of polymers used in soil stabilization. *Construction and Building Materials*, 305: 124685.
- HUANG, J.; LI, S.; ZHENG, X. (2021). Chemical and structural modification of bentonite stabilized with polymer. *Construction and Building Materials*, 289: 123195.
- HUANG, W.; *et al.* (2021). Evolution of pore characteristics for bentonite modified by an ionic soil stabilizer (ISS). *Advances in Materials Science and Engineering*, Article ID 7777091. <https://doi.org/10.1155/2021/7777091>
- ICMBio – Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade (2013). *Atlas do Corredor Ecológico da Região do Jalapão*. 2. ed. Brasília, 87 p.
- IUPAC (2009). *Compendium of Polymer Terminology and Nomenclature: IUPAC Recommendations 2008*. 2. ed. Cambridge: Royal Society of Chemistry.
- KHAN, N.; *et al.* (2022). Recent advances in ICP-OES for multi-elemental analysis of environmental samples.
- KHATAMI, H. R.; O’KELLY, B. C. (2013). Improving mechanical properties of sand using biopolymers. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 139(8), ASCE.
- KINTER, E. B. (1975). *Development and evaluation of chemical soil stabilizers*. Report FHWA-RD-75-17. U.S. Department of Transportation.
- KOLAY, P. K.; SII, H. Y.; TAIB, S. N. L. Tropical residual soil stabilized with polymer.
- LAM, C.; JEFFERIS, S. A. (2018). Introduction to polymers and polymer fluids. In: *Polymer Support Fluids in Civil Engineering*. ICE Publishing, London, cap. 3, p. 29–53.
- LAM, C.; GANESHKUMAR, M.; NG, S. C.; LEE, F. H. (2014). Effects of polymer and bentonite support fluids on concrete–sand interface shear behaviour. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Geotechnical Engineering*, 167(1): 28–39.
- LAM, K.; WONG, Y.; CHEUNG, R. (2014). Physical and mechanical properties of clay-polymer composites. *Applied Clay Science*, 95: 1–10.

- LAMBE, T. W. (1952). Summary of the Conference on Soil Stabilization. Proceedings of Conf. on Soil Stabilization. Massachusetts, EUA.
- LAMBE, T. W.; WHITMAN, R. V. (1969). Soil Mechanics. New York: John Wiley & Sons, 553 p.
- LEE, S.; CHUNG, M.; PARK, H. M.; SONG, K.; CHANG, I. (2019). Xanthan gum biopolymer as soil-stabilization binder for road construction using local soil in Sri Lanka. Journal of Materials in Civil Engineering, 31(11).
- LI, J.; ZHOU, X.; GUO, T. (2020). Mineralogical evolution of polymer-treated bentonite. Applied Clay Science, 190: 105581.
- LI, M.; ZHANG, Y.; YUAN, Q.; LIU, G. (2020). The behavior of polymer–bentonite interface under shear. Construction and Building Materials, 262: 120685.
- LIANG, C.; ZHANG, M.; XU, P. (2024). Chemical and microstructural assessment of polymer–bentonite–sand mixtures. Applied Clay Science, 245: 106878.
- LIANG, S.; LIU, J.; ZHAO, X.; CHEN, Y. (2024). Hydraulic conductivity of polymer-enhanced bentonite. Case Studies in Construction Materials, 20: e01840.
- LIKOS, W. J.; LU, N. (2006). Pore-scale mechanisms for hysteresis in capillary saturation of unsaturated soils. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 132(5): 595–605.
- LIU, J.; *et al.* (2018). An experimental study on the shear behaviors of polymer–sand composite materials after immersion. Polymers, 10(8): 924.
- LOPES, L. S. E.; MALKO, J. A. C.; CASAGRANDE, M. D. T.; MOTTA, L. M. G. (2015). Análise do comportamento de um solo estabilizado com cinzas de carvão mineral para aplicação em camadas de base e sub-base de pavimentos. Revista Pavimentação, 36: 63–82.
- LOUZADA, N. S. L.; MARTINEZ, I. M. R.; REPSOLD, L. M.; CASAGRANDE, M. D. T. (2016). Mechanical behavior of a clayey soil with the insertion of fine crushed polyethylene terephthalate. 3rd Pan-American Conference on Geosynthetics, Miami, EUA, 8 p.
- LOUZADA, N. S. L.; MALKO, J. A. C.; CASAGRANDE, M. D. T. (2019). Behavior of clayey soil reinforced with polyethylene terephthalate. Journal of Materials in Civil Engineering, 31(10).
- MALKO, J. A. C.; BRAZETTI, R.; CASAGRANDE, M. D. T.; SILVA, B. A. (2016). Applicability of soil-enzyme for paving. Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, v. 2, n. 61, p. 2082–2085.
- MARINHO, A. A.; MACHADO, A. S.; REIS, J. A.; ANDRADE, J. S.; GOMES, W. P. S. (2016). Degradação ambiental causada pelo desenvolvimento turístico na Cachoeira da Formiga – Parque Estadual do Jalapão. Secretaria do Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Governo do Estado do Tocantins, 14 p.
- MEDINA, J.; MOTTA, L. M. G. (2004). Apostila de estabilização de solos. Escola de Engenharia, UFRJ, Rio de Janeiro.
- MEDINA, J.; MOTTA, L. M. G. (2015). Mecânica dos pavimentos. 3. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 638 p.
- MME – Ministério de Minas e Energia (2021). Anuário Mineral Brasileiro – Bentonita. Brasília.

- MILLARD, R. (1993). *Roads Building in Tropics – State of the Art Review n° 9*. London.
- MURRAY, G. E. (1952). Soil stabilization by chemical means. *Proceedings of Conf. on Soil Stabilization*. Massachusetts, EUA.
- NAEINI, S. A.; GHORBANALIZADEH, M. (2010). Effect of wet and dry conditions on strength of silty sand soils stabilized with epoxy resin polymer. *Journal of Applied Sciences*, 10(22): 2839–2846.
- NITRR (1986). *Cementitious Stabilizers in Road Construction (TRH 13)*. Pretoria, South Africa: National Institute for Transport and Road Research.
- OKONTA, F. (2019). Pavement geotechnical properties of polymer modified weathered semi-arid shale subgrade. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 12(1): 54–63.
- OLIVEIRA, M. S.; GÓNGORA, I. A. G. (2016). Solo estabilizado com resíduo de construção e demolição reciclado para fins de pavimentação. 18º Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, Belo Horizonte, MG, 7 p.
- OWNTECH (2018). *Manual de operação do sistema triaxial cíclico MS151*. São Carlos, SP.
- ÖZHAN, A. (2019). Mechanical and chemical characterization of polymer-treated sandy soil. *Construction and Building Materials*, 215: 447–456.
- ÖZHAN, H. O. (2019). Measuring shear strength parameters of polymer-added bentonite–sand mixtures in laboratory experiments. *E3S Web of Conferences*, 92, 11014. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20199211014>
- PALMEIRA, E. M. (2018). Introdução aos polímeros. In: *Geossintéticos em geotecnia e meio ambiente*. São Paulo: Oficina de Textos, cap. 2, p. 17–25.
- PETRY, T. M.; LITTLE, D. N. (2002). Review of stabilization of clays and expansive soils in pavements and lightly loaded structures – history, practice and future. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 14(6): 447–460.
- PINTO, A. R. A. G. (2008). *Fibras de curauá e sisal como reforço em matrizes de solo*. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, PUC-Rio, 103 p.
- PINTO, C. S. (2006). *Curso básico de mecânica dos solos*. São Paulo: Oficina de Textos, 367 p.
- PINTO, S. (1991). *Estudo do comportamento à fadiga de misturas betuminosas e aplicação na avaliação estrutural de pavimentos*. Tese de Doutorado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 478 p.
- RAMIREZ, G. G. D.; CASAGRANDE, M. D. T. (2014). Experimental study of granular rubber waste tire reinforced soil for geotechnical applications. *Key Engineering Materials*, 600.
- REDDY, K. R.; ZHOU, Y.; KIM, B. (2021). Evaluation of chemical composition of commercial soil-stabilizing polymers. *Journal of Hazardous Materials Advances*, 4: 100053.
- REDDY, P. S.; REDDY, K. V.; KUMAR, R. P.; ANIL, K. (2021). Investigations for chemical parameters effect on swelling characteristics of expansive soils. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 25: 2543–2554.

- REZENDE, L. R. (2003). Estudo do comportamento de materiais alternativos utilizados em estruturas de pavimentos flexíveis. Tese de Doutorado, Publicação G.TD-014A/03, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, DF, 372 p.
- REZENDE, L. R.; MARQUES, M. O.; CUNHA, N. L. (2015). The use of non-conventional materials in asphalt pavements base. *Road Materials and Pavement Design*, 16(4): 799–814.
- RIBEIRO, L. C.; *et al.* (2022). Mapa geológico e de recursos minerais do Estado do Tocantins – folha Mateiros. (Órgão responsável – completar: CPRM/órgão estadual).
- RODRIGUES, J. F.; VALENZUELA-DÍAZ, F. R.; *et al.* (2007). Caracterização granulométrica por difração a laser de bentonita da região de Boa Vista – PB.
- ROMERO, E. (2013). Retention curves of deformable clays and clayey mixtures. *Géotechnique*, 63(2): 133–147.
- ROMERO, E. (2013). Retention and hydraulic behavior of unsaturated soils. *Soils and Foundations*, 53(4): 482–497.
- ROQUE, P. F. B. (2017). Uso de materiais alternativos para melhoria de solos em pavimentação. Tese de Doutorado, Publicação G.DM-131/17, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, DF, 141 p.
- ROSS, C. S.; SHANNON, E. V. (1926). The minerals of bentonite and related clays and their physical properties. *Journal of the American Ceramic Society*, 9(2): 77–96.
- RÚVER, C. A. Enhancing bearing capacity of shallow foundations through cement-stabilised sand layer over weakly bonded residual soil. (Tese/Dissertação – completar dados).
- SANDRONI, S. S.; CONSOLI, N. C. (2010). Sobre a prática da engenharia geotécnica com dois solos difíceis: os extremamente moles e os expansivos. XV Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, Gramado.
- SANTOS, M.; LIMA, D.; BUENO, B. (1995). Estabilização dos solos com cal e betume. In: 6ª Reunião de Pavimentação Urbana, Santos, SP, p. 74–97.
- SEPLAN (2003). Plano de Manejo da APA do Jalapão. Governo do Estado de Tocantins, Palmas – TO, 209 p.
- SILVA, N. A. B. S. S.; NUNES, R. C.; HAROLDO, S. P. (2018). Utilização de resíduo de corte de rochas ornamentais como estabilizantes de solo laterítico e base rodoviária. 3º Congresso Luso-Brasileiro de Materiais de Construção Sustentáveis, Coimbra, 10 p.
- SILVA, N.A.B.S. (2020). Estudo do comportamento mecânico de compósitos solo–polímero. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Universidade de Brasília, Brasília, DF, 180 p.
- SILVEIRA, M. V.; CALHEIROS, A. V.; CASAGRANDE, M. D. T. (2018). Applicability of expanded polystyrene as a soil improvement tool. *Journal of Materials in Civil Engineering*, v. 30, p. 06018006, 2018. DOI: <https://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%29MT.1943-5533.0002276>
- SKEMPTON, A. W. (1964). The pore-pressure coefficients A and B. *Géotechnique*, 14(4): 143–147.
- SMITH, C. J. (1952). The Chrome-Lignin Process and Ion Exchange Studies. Proceedings of the Conference on Soil Stabilization. Massachusetts, EUA.

- SOLTANI, A.; *et al.* (2017). Swelling potential of a stabilized expansive soil: a comparative experimental study. *Geotechnical and Geological Engineering*, 35(4): 1717–1744.
- SOTOMAYOR, J. M. G.; CASAGRANDE, M. D. T. (2018). The performance of a sand reinforced with coconut fibers through plate load tests on a true scale physical model. *Soils & Rocks*, 41: 361–368.
- SPERLIND, L. H. (2006). *Introduction to Physical Polymer Science*. 4th ed. New York: Wiley.
- TANG, A. M.; *et al.* (2011). Influence of suction on the thermal conductivity of compacted bentonite. *Applied Clay Science*, 52(1–2): 78–83.
- TANG, C.; SHI, B.; LIU, C.; ZHAO, L. (2011). Experimental characterization of expansive soil and polymer interactions. *Applied Clay Science*, 51(1–2): 1–8.
- TERZAGHI, K.; PECK, R. B. (1967). *Soil Mechanics in Engineering Practice*. 2nd ed. New York: John Wiley & Sons.
- TERZAGHI, K.; PECK, R. B.; MESRI, G. (1996). *Soil Mechanics in Engineering Practice*. 3rd ed. New York: Wiley, 549 p.
- TINGLE, J.; *et al.* (2007). Stabilization mechanisms of nontraditional additives. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1989: 59–67.
- TOCANTINS (2000). Lei nº 1.172, de 31 de julho de 2000. Cria a unidade de conservação ambiental denominada APA-Jalapão. *Diário Oficial* nº 958.
- USDT – United States Department of Transportation (2014 – Draft). *Advisory Circular. Standards for Specifying Construction of Airports*. AC No. 150/5370-10G.
- UZAN, J. (1985). Characterization of granular material. *Transportation Research Record*, 1022: 52–59.
- VALENZUELA-DÍAZ, F. R. *Argilas bentoníticas: conceitos, propriedades e aplicações*. (Publicação – completar com ano, editora e local).
- VARGAS, M. (1977). *Introdução à mecânica dos solos*. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, 509 p.
- VILLIBOR, D. F. (1982). *Estabilização granulométrica ou mecânica*. São Carlos: Gráfica EESC-USP.
- VIZCARRA, G. O. C.; CASAGRANDE, M. D. T.; MOTTA, L. M. G. (2014). Applicability of municipal solid waste incineration ash on base layers of pavements. *Journal of Materials in Civil Engineering*, ASCE.
- WANG, H.; ZHAO, J.; FENG, D. (2023). Effect of polymer content on the swelling behavior of expansive clays. *Engineering Geology*, 318: 107048.
- WANG, Q.; LIU, J.; LIANG, S. (2023). Hydro-mechanical behavior of polymer-treated expansive clay under wetting–drying cycles. *Engineering Geology*, 323: 107193.
- WILLIS, E. A.; CARPENTER, C. A. (1939). Studies of water-retentive chemicals as admixtures with nonplastic road-building materials. *Public Roads*, 20(9).
- WOODRING, P. W. (1952). Requirements and experience in expeditious military soil solidification. *Proceedings of the Conference on Soil Stabilization*. Massachusetts, EUA.

- XU, S.; LI, Q.; WANG, J. (2022). Hydro-mechanical behavior of polymer-modified bentonite. *Construction and Building Materials*, 347: 128497.
- XU, Y.; LI, M.; HUANG, W. (2022). Effect of polymer modification on the hydraulic and swelling properties of bentonite. *Applied Clay Science*, 229: 106664.
- XUAN, D.; MOLENAAR, A. A. A.; HOUBEN, L. J. M.; SHUI, Z. (2012). Mechanical properties of cement-treated aggregate material – A review. *Materials & Design*, 33: 496–502.
- YANG, Q.; *et al.* (2019). Impact of polymer mixtures on the stabilization and erosion behavior of silty sand soil. *Journal of Mountain Science*, 16(4): 863–873.
- YEO, Y. S.; JITSANGIAM, P.; NIKRAZ, H. (2011). Mix design of cementitious basecourse. *International Conference on Advances in Geotechnical Engineering (ICAGE 2011)*, Perth, p. 379–385.
- ZANDIEH, A. R.; YASROBI, S. S. (2010). Study of factors affecting the compressive strength of sandy soil stabilized with polymer. *Geotechnical and Geological Engineering*, 28(2): 139–145.
- ZHANG, H.; *et al.* (2023). Effects of several polymeric materials on the improvement of sandy soil under rainfall simulation. *Environmental Research*, 231: 117779. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.117779>
- ZHOU, X.; *et al.* (2023). Advances in ICP-OES techniques for multi-element analysis in geotechnical and environmental applications.