

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

**DESEMPENHO DE UM COMPÓSITO SOLO-POLÍMERO  
PARA APLICABILIDADE EM OBRAS GEOTÉCNICAS E DE  
PAVIMENTAÇÃO**

**NATHÁLIA ARAÚJO BOAVENTURA DE SOUZA E SILVA**

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

Co-orientador: **MÁRCIO MUNIZ DE FARIAS, Ph.D.**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM GEOTECNIA

PUBLICAÇÃO: G.DM-339/2020

BRASÍLIA – DF, 21 FEVEREIRO DE 2020.

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

**DESEMPENHO DE UM COMPÓSITO SOLO-POLÍMERO PARA  
APLICABILIDADE EM OBRAS GEOTÉCNICAS E DE PAVIMENTAÇÃO**

**NATHÁLIA ARAÚJO BOAVENTURA DE SOUZA E SILVA**

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

**APROVADA POR:**

---

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

---

**MÁRCIO MUNIZ DE FARIAS, Ph.D. (UnB)  
(CO-ORIENTADOR)**

---

**RAFAEL CERQUEIRA SILVA, DSc. (UnB)  
(EXAMINADOR INTERNO)**

---

**NILO CESAR CONSOLI, Ph.D. (UFRGS)  
(EXAMINADOR EXTERNO)**

**DATA: BRASÍLIA/DF, 21 DE FEVEREIRO DE 2020.**

## FICHA CATALOGRÁFICA

SILVA, NATHÁLIA ARAÚJO BOAVENTURA DE SOUZA E;  
**Desempenho de um compósito solo-polímero para aplicabilidade em obras geotécnicas e de pavimentação** (Distrito Federal) 2020.

xviii, - 111., 210 x 297 mm (ENC/FT/UnB, Mestre, Geotecnia, 2020)

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

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

1. Novos Materiais Geotécnicos      2. Compósito Solo-Polímero

3. Obras Geotécnicas                4. Pavimentação

I. ENC/FT/UnB

II. Título (série)

## REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

SILVA, N.A.B.S. (2020). **Desempenho de um compósito solo-polímero para aplicabilidade em obras geotécnicas e de pavimentação**. Dissertação de Mestrado, Publicação G.DM-339/20 Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 111p.

## CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: NATHÁLIA ARAÚJO BOAVENTURA DE SOUZA E SILVA.

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO: **Desempenho de um compósito solo-polímero para aplicabilidade em obras geotécnicas e de pavimentação**.

GRAU / ANO: Mestre / 20.

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

---

Nathália Araújo Boaventura de Souza e Silva

SQN 309, Bloco C, Apt 604, Asa Norte  
70.755-030 – 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

---

Nesse momento queria ser poeta ou escritora para saber passar, nestas breves palavras de agradecimento, todo o meu sincero sentimento de amor e gratidão.

Primeiramente, quero agradecer a todas mulheres presentes na minha vida. Cada uma tem um pedaço de mim. Virgem Santíssima, por ser mãe das mães, mulher das mulheres, exemplo de amor, sabedoria e serviço lhe dedico esse trabalho, e agradeço por toda intercessão em minha vida.

Minha mãe, que não satisfeita de me dar a vida, ainda me deu exemplo de determinação, firmeza, amor, doçura, alegria, exemplo de mulher. Agradeço por todo apoio, desde que eu disse que queria me dedicar a pesquisa, educação e ensino, me incentivou infinitamente e está ao meu lado em cada segundo.

Minha avó Luíza, madrinha Cássia, tias (Eliana e Flávia), primas (Marina, Maria Clara, Fernanda, Cibele, Cora, Renata e Andressa) agradeço e dedico cada palavra desse trabalho a vocês, que me escutaram e apoiaram, minha eterna gratidão.

Às minhas coisinhas, Ana Laura, Larissa, Marcele, Mariana, Michelle, Patrícia e Priscilla que suportaram escutar minhas histórias sobre polímero e solo. Minhas parceiras de faculdade, amigas engenheiras e amigas de vida, Pabline, Raíssa e Yngrid.

Minha querida e amada orientadora, Michéle Casagrande, melhor escolha que poderia ter feito, amiga, incentivadora, parceira. Agradeço as ideias loucas, inúmeros ensaios, cafés, caipiroskas, selfies, fotos, risadas e broncas. Tanto que ganha o status de “mami acadêmica” que cuida de verdade.

Não poderia faltar o agradecimento ao presentinho que ganhei nesse mestrado a dona Andressa, amiga e parceira, não sei o que seria de mim nessa pesquisa sem sua alegria, patadas, risadas. Ajudou a diminuir toda essa pressão que vivemos trazendo leveza.

Meu irmão, amor da minha vida, que desejei imensamente e veio como o meu maior presente, minha motivação, meu amigo e para sempre meu “pitcheno”.

Thiago, meu amor, obrigada por todo apoio, cuidado, carinho e ajudas. Que essa seja o primeiro agradecimento, em forma de palavras, de muitos que virão. Minha surpresa, meu amor, meu parceiro e meu trem.

Aos meus familiares, primos, tios e amigos, por sempre me apoiarem a conquistar e superar minhas barreiras e dificuldades.

À empresa WaterFlows, em especial ao Newton Vasconcelos, por todo apoio nessa pesquisa e por acreditar na pesquisa brasileira.

Meu co-orientador, Márcio Muniz, pela ajuda na pesquisa e apoio nas análises. Aos profissionais do Infralab, Amanda, Letícia e Sanderson, que me ajudaram incontáveis vezes.

Aos colegas de laboratório, por toda parceria e ajuda, somente quem é experimental consegue entender que não conseguimos fazer nada sozinhos. Meu eterno agradecimento.

Aos colegas do grupo de pesquisa, Adriano Malko, José Wilson, Gabriela Queiroz, Karla Costa, Giovanna Alelvan, Daniel Gurgel, Matheus Machado, por apoiarem e serem meus irmãos acadêmicos. Ao parceiro de graduação e pós-graduação e grande amigo Matheus Oliveira, obrigada por todo apoio.

Ao DER-DF pelo apoio a pesquisa, ajudando com equipamentos, e ao engenheiro Paulo por toda ajuda.

Ao CAIQ e seus profissionais pelo apoio nas análises químicas. Ao departamento de Geologia, especialmente ao professor João Carlos Abreu, nas análises geológicas. Ao departamento de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, especialmente ao Laboratório de Microscopia Eletrônica de Varredura e Confocal Laser e ao professor Cosme Roberto Moreira da Silva e técnico Ivan Banho de Andrade Reis, pela ajuda nas análises microestruturais. Ao departamento de pós-graduação de Biologia, à técnica Yngrid, pela disponibilidade na metalização das amostras.

À professora Beatriz Barcelos, professora da época de graduação, que não mediu esforços para ajudar nas análises ambientais.

Por fim, ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio à pesquisa realizada e à pesquisa brasileira.

O comportamento do solo se altera de acordo com o clima, região, estratificações, mineralogia, dentre inúmeros fatores. De acordo com a finalidade da aplicação, ao exemplo de aterros, taludes e pavimentação, o solo pode precisar passar por processos de melhoramento ou estabilização. A região do Jalapão – Tocantins é uma área de proteção ambiental (APA) e com isso há limitações para execução de obras pelas questões ambientais do local e impactos que as construções podem gerar ao ambiente. A presente pesquisa visa o estudo do comportamento de um solo arenoso, advindo da APA – Jalapão, melhorado com solução polimérica como agente estabilizante para formação do compósito solo-polímero. Os estudos foram feitos visando a aplicação em estradas não pavimentadas, base de pavimentos, bem como aterros e taludes. Foi avaliado o comportamento do compósito para duas dosagens de polímero, 2,5% e 5% em relação ao volume total, e em tempos de cura distintos. A análise se deu nos âmbitos físico, mecânico, químico, ambiental, mineralógico e microestrutural. O solo puro e compósitos foram avaliados por meio de ensaios de compactação, compressão simples, cisalhamento direto, expansão, determinação da resistência à tração por compressão diametral, módulo de resiliência, simulador de tráfego laboratorial (desgaste superficial no equipamento DWT) e dano por umidade induzida. Ensaios de permeabilidade, absorção da água e sucção total, bem como refração de Raios X, fluorescência, espectrometria, microscopia eletrônica (MEV) e lixiviação dos compósitos. Em todas análises mecânicas realizadas observou-se incremento e melhoras significativas dos resultados dos parâmetros de resistência encontrados para os compósitos em ambas dosagens, quando comparados com os do solo sem estabilização, em que os parâmetros obtidos para a dosagem com 5% de polímero foram maiores. Constatou-se o incremento de intercepto coesivo, resistência à compressão simples, resistência à deformação superficial (desgaste) e aumento do módulo de resiliência. Os resultados corroboram para que a solução polimérica adicionada ao solo estudado possa ser aplicada para melhoramento deste, gerando um novo material geotécnico. As soluções poliméricas, sendo aplicadas como agentes estabilizantes, tornam-se uma possibilidade adequada para aplicação em obras geotécnicas, pois além de aumentarem a resistência mecânica, também são ambientalmente corretas em todo o seu ciclo de vida.

The behavior of the soil changes according to the climate, region, stratifications, mineralogy, among numerous factors. According to the purpose of the application, like landfills, embankments and paving, the soil may need to undergo improvement or stabilization processes. *Jalapão - Tocantins* region is an environmental protection area (*APA*) and with this there are limitations for the execution of works due to the environmental issues of the place and the impacts that the constructions can generate to the environment. This research aims to study the behavior of a sandy soil, derived from *APA - Jalapão*, improved with polymeric solution as a stabilizing agent for the formation of the soil-polymer composite. The studies were made aiming at the application in unpaved roads, pavement base, as well as embankments and slopes. The behavior of the composite was evaluated for two polymer dosages, 2.5% and 5% in relation to the total volume, and at different curing times. The analysis took place in the physical, mechanical, chemical, environmental, mineralogical and microstructural areas. Pure soil and composites were evaluated by means of compaction tests, simple compression, direct shear, expansion, determination of tensile strength by diametrical compression, resilience module, laboratory traffic simulator (surface wear on DWT equipment) and moisture damage induced. In addition to determining the permeability coefficient, water absorption and total suction. As well, studies of XRD, X-ray flowering, SEM, EDS and chemical analysis of the leachate of composites were carried out. In all mechanical analyzes performed, there was an increase and significant improvements in the results found for the composites when compared to those of the soil without stabilization. The resistance values for the dosage with 5% of polymer were higher than the dosage of 2.5%. For both dosages, there was an increase in cohesive intercept, presence of resistance to simple compression, resistance to surface deformation, increase in the resilience module. Thus, the results corroborate so that the polymeric solution added to the studied soil can be applied as a new geotechnical material to improve that soil. The polymeric solutions, being applied as stabilizing agents, become an excellent possibility for application in geotechnical works, because in addition to increasing the mechanical resistance, they are also environmentally correct throughout their life cycle.

<b>CAPÍTULO 1</b> .....	<b>1</b>
<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>1</b>
1.1. MOTIVAÇÃO DA PESQUISA .....	1
1.2. OBJETIVOS .....	2
1.3. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO .....	3
<b>CAPÍTULO 2</b> .....	<b>4</b>
<b>REVISÃO DE LITERATURA</b> .....	<b>4</b>
2.1. ESTABILIZAÇÃO E MELHORAMENTO DE SOLOS .....	4
2.1.1. Estabilização Mecânica .....	5
2.1.2. Estabilização Química.....	6
2.2. POLÍMERO .....	11
2.2.1. Compósitos Solo-Polímero .....	13
<b>CAPÍTULO 3</b> .....	<b>17</b>
<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	<b>17</b>
3.1. MATERIAIS E PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS .....	17
3.1.1. Solo .....	17
3.1.2. Polímero .....	19
3.1.3. Compósitos.....	20
3.1.3.1. Tempo de Cura.....	20
3.1.3.2. Preparação das amostras .....	20
3.2. ENSAIOS REALIZADOS .....	25
3.2.1. Caracterização Mecânica.....	25
3.2.1.1. Ensaio de Compactação .....	26
3.2.1.2. Determinação da Resistência à Compressão Não Confinada .....	26
3.2.1.3. Ensaio de Cisalhamento Direto.....	27
3.2.1.4. Determinação da Expansão.....	29
3.2.1.5. Determinação da Resistência à Tração por Compressão Diametral .....	29
3.2.1.6. Determinação do Módulo de Resiliência.....	30
3.2.1.7. Ensaio Hamburg Wheel-Track adaptado .....	36
3.2.1.8. Determinação do Dano por Umidade Induzida .....	37
3.2.2. Caracterização Hidráulica .....	39

3.2.2.1. Determinação do Coeficiente de Permeabilidade .....	40
3.2.2.2. Determinação da Absorção de Água.....	42
3.2.2.3. Determinação da Sucção Total .....	43
3.2.3. Caracterização Químico-Ambiental-Mineralógica .....	43
3.2.3.1. Difração de Raios-X (DRX).....	44
3.2.3.2. Espectrometria de Florescência de Raios X (XRF/EDX).....	44
3.2.3.3. Análise Elementar CHN .....	44
3.2.3.4. Análise Química do Lixiviado .....	45
3.2.4. Caracterização Microestrutural .....	46
3.2.4.1. Microscopia Óptica.....	46
3.2.4.2. Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).....	46
3.2.4.3. Espectroscopia por Dispersão de Energia (EDS).....	47
<b>CAPÍTULO 4 .....</b>	<b>48</b>
<b>RESULTADOS E ANÁLISES.....</b>	<b>48</b>
4.1. RESULTADOS PARA O SOLO DO JALAPÃO.....	48
4.2. CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA .....	49
4.2.1. Compactação .....	49
4.2.2. Ensaio de Resistência à Compressão Não Confinada .....	51
4.2.3. Ensaio de Cisalhamento Direto .....	57
4.2.4. Ensaio Triaxial Cíclico - Módulo de Resiliência .....	73
4.2.4.1. Módulo de Resiliência – Indicado Para Solos .....	73
4.2.4.2. Módulo de Resiliência –Indicado Para Misturas Asfálticas .....	80
4.2.5. Determinação da Resistência à Tração por Compressão Diametral .....	81
4.2.6. Ensaio Hamburg Wheel-Track – Simulador de Tráfego Laboratorial.....	81
4.2.7. Ensaio de Dano por Umidade Induzida .....	82
4.3. CARACTERIZAÇÃO HIDRÁULICA.....	84
4.3.1. Determinação do Coeficiente de Permeabilidade .....	84
4.3.2. Determinação da Absorção de Água.....	84
4.3.3. Determinação da Sucção Total.....	85
4.4. CARACTERIZAÇÃO QUÍMICO-AMBIENTAL-MINERALÓGICA .....	85
4.4.1. Difração de Raio – X (DRX) .....	86
4.4.2. Espectrometria de Florescência de Raios X (XRF/EDX).....	91
4.4.3. Análise Elementar CHN.....	92
4.4.4. Análise do Lixiviado .....	93

4.5. CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL .....	94
4.5.1. Microscopia Ótica .....	94
4.5.2. Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).....	95
4.6. CONSIDERAÇÕES FINAIS SOBRE RESULTADOS OBTIDOS.....	101
<b>CAPÍTULO 5 .....</b>	<b>103</b>
<b>CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS .....</b>	<b>103</b>
5.1. CONCLUSÕES.....	103
5.2. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	105
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>106</b>

## LISTA DE QUADROS

---

Quadro 3.1. Componentes toxicológicos do produto (Fonte: Fabricante).....	19
Quadro 3.2. Ensaio realizados e tempos de cura referentes .....	20
Quadro 3.3. Critérios das normas AASTHO T-324 e EN 12697-22 B. ....	37

## LISTA DE TABELAS

---

Tabela 2.1 Classificação Austrods para materiais estabilizados com cimento (Yeo et al, 2011) .....	9
Tabela 3.1. Pares de tensão aplicados para cada ciclo. (AASHTO T307-99, 2007) .....	32
Tabela 4.1. Resultados de RCS para 2,5% de polímero em diferentes tempos de cura. ....	52
Tabela 4.2. Resultados de RCS para 5% de polímero em diferentes tempos de cura. ....	54
Tabela 4.3. Valores do intercepto coesivo e ângulo de atrito para SP_2,5%. ....	64
Tabela 4.4. Valores típicos de Ângulo de atrito de diversos tipos de rocha (Costa, 2012) .....	68
Tabela 4.5. Valores do intercepto coesivo e ângulo de atrito para SP_5%. ....	70
Tabela 4.6. Valores de MR do Solo, SP_2,5% e SP_5% para diferentes tempos de cura.....	73
Tabela 4.7. Constantes de regressão e R <sup>2</sup> para o modelo dependente de $\sigma_3$ . ....	74
Tabela 4.8. Constantes de regressão e R <sup>2</sup> para o modelo dependente de $\sigma_d$ . ....	76
Tabela 4.9. Constantes de regressão e R <sup>2</sup> para o modelo composto. ....	78
Tabela 4.10. MR adaptado de misturas asfálticas dos compósitos para três níveis de tensão. ....	80
Tabela 4.11. Resultados do valor da resistência à tração por compressão diametral dos compósitos. ....	81
Tabela 4.12. Resultados da determinação por umidade induzida para SP_2,5% e SP_5%.....	83
Tabela 4.13. Resultados ensaio de expansão para solo e compósitos.....	83
Tabela 4.14. Coeficiente de permeabilidade do solo e dos compósitos SP_2,5% e SP_5%. ..	84
Tabela 4.15. Valor de absorção dos compósitos SP_2,5% e SP_5%. ....	84
Tabela 4.16. Resultado das análises do Lixiviado dos compósitos SP_2,5% e SP_5%.....	93

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 Classificação resiliente de solos granulares (DNIT, 2006) .....	10
Figura 2.2. Organização dos polímeros. (a) Organização aleatória; (b) Organização alternada; (c) Organização em bloco; (d) Organização grafitizada. (Modificado - Canevarolo, 2006)..	12
Figura 3.1. (a) Localização local de coleta do solo (Google, 2020); (b) Solo após secagem..	17
Figura 3.2. Mapa da Unidade de Conservação (Fonte: SEPLAN 2003) .....	18
Figura 3.3. Produto utilizado como estabilizante.....	19
Figura 3.4. Método de moldagem dos CPs do ensaio de compressão simples.....	21
Figura 3.5. Corpos de prova cilíndricos com 10x5 cm.....	22
Figura 3.6. Corpo de prova cilíndricos com 12x10 cm.....	22
Figura 3.7. CP para ensaios adaptados de mistura asfáltica. ....	23
Figura 3.8. CPs gerados a partir de CP 10x5 cm. ....	23
Figura 3.9. Placa para avaliar desgaste na superfície.....	24
Figura 3.10. Método de moldagem para análise da sucção total. ....	24
Figura 3.11. CP cilíndrico 1x1 cm para MEV e fluorescência de Raio-X.....	25
Figura 3.12. (1) Display e LVDTs; (2) Caixa de cisalhamento; (3) Aplicação das cargas e anel para medição da força. ....	28
Figura 3.13. Equipamentos utilizados para a realização do ensaio.....	28
Figura 3.14. (1) Prensa utilizada para realização do ensaio; (2) Corpo de Prova após ruptura. ....	30
Figura 3.15. Equipamento Triaxial Cíclico.....	33
Figura 3.16. Método de montagem para determinação do MR. ....	33
Figura 3.17. Método de montagem para determinação do MR para mistura asfáltica. ....	35
Figura 3.18. DWT - Double Wheel Tracker .....	36
Figura 3.19. Método para realização do ensaio de dano por umidade induzida.....	38
Figura 3.20. (1) Prensa utilizada para realização do ensaio; (2) Corpo de prova rompido após ensaio. ....	39
Figura 3.21. Materiais e métodos utilizados para determinação do coeficiente de permeabilidade do compósito. ....	40
Figura 3.22. Materiais e métodos para a determinação do coeficiente de permeabilidade do solo granular. ....	41

Figura 3.23. Método para determinação da absorção de água dos compósitos. ....	42
Figura 3.24. Materiais e métodos utilizados para determinação da sucção total. ....	43
Figura 3.25. Lixiviado coletado. ....	45
Figura 3.26. Lupa eletrônica modelo SLQ-M-003. ....	46
Figura 3.27. Amostras metalizadas. ....	47
Figura 4.1. Curva Granulométrica do solo estudado. ....	48
Figura 4.2. Curvas de compactação com energia normal, solo e compósitos. ....	49
Figura 4.3. Curvas de compactação com energia intermediária, solo e compósitos. ....	50
Figura 4.4. Curvas RCS x Def. Axial, de acordo com o tempo de cura e para 2,5% de polímero. .....	53
Figura 4.5. (a) SP_2,5% (1 dia de cura) após ruptura; (b) SP_2,5% (2 dias de cura) após ruptura; (c) SP_2,5% (4 dias de cura) após ruptura.....	53
Figura 4.6. (a) SP_2,5% (7 dias de cura) após ruptura; (b) SP_2,5% (15 dias de cura) após ruptura; (c) SP_2,5% (30 dias de cura) após ruptura; (d) SP_2,5% (45 dias de cura) após ruptura. ....	54
Figura 4.7. Curvas RCS x Def. Axial, de acordo com o tempo de cura e para 5% de polímero. .....	55
Figura 4.8. (a) SP_5% (1 dia de cura) após ruptura; (b) SP_5% (2 dias de cura) após ruptura; (c) SP_5% (4 dias de cura) após ruptura; (d) SP_5% (7 dias de cura) após ruptura; (e) SP_5% (15 dias de cura) após ruptura; (f) SP_5% (30 dias de cura) após ruptura; (g) SP_5% (45 dias de cura) após ruptura.....	56
Figura 4.9. Valor RCS por tempo de cura. ....	57
Figura 4.10. Curvas tensão de cisalhamento por deformação horizontal para o solo com adição de água para tensões normais de 50 kPa, 100 kPa, 200 kPa e 400 kPa. ....	58
Figura 4.11. Curvas tensão de cisalhamento por deformação horizontal para cada tempo de cura e para aplicação das tensões normais de 50 kPa, 100 kPa, 200 kPa e 400 kPa para 2,5 % de polímero. ....	59
Figura 4.12. SP_2,5% sem cura, após ruptura. ....	60
Figura 4.13. SP_2,5% 1 dia de cura, interior úmido e capinha seca.....	60
Figura 4.14. SP_2,5% 2 dias de cura, após ruptura. ....	61
Figura 4.15. SP_2,5% 4 dias de dia, após ruptura. ....	62
Figura 4.16. SP_2,5% 7 dias de dia, após ruptura. ....	62
Figura 4.17. SP_2,5% 45 dias de dia, após ruptura. ....	62
Figura 4.18. Envoltória de Ruptura para SP_2,5%. ....	63

Figura 4.19. Curvas tensão de cisalhamento por deformação horizontal para o solo com adição de água para tensões normais de 50 kPa, 100 kPa, 200 kPa e 400 kPa. ....	64
Figura 4.20. Curvas tensão de cisalhamento por deformação horizontal para cada tempo de cura e para aplicação das tensões normais de 50 kPa, 100 kPa, 200 kPa e 400 kPa para 5% de polímero. ....	66
Figura 4.21. SP_5% sem cura, após ruptura. ....	66
Figura 4.22. SP_5% com 1 dia de cura, após ruptura. ....	67
Figura 4.23. SP_5% com 2 dia de cura, após ruptura, com interior úmido e parte externa seca. ....	67
Figura 4.24. SP_5% com 15 dia de cura, após ruptura. ....	69
Figura 4.25. SP_5% com 45 dia de cura, após ruptura. ....	69
Figura 4.26. Envoltória de Ruptura para SP_5%. ....	70
Figura 4.27. Curvas de tensão x deslocamento horizontal dos compósitos com 45 dias de cura e solo. ....	71
Figura 4.28. Curvas de tensão x deslocamento horizontal 50 kPa e 200 kPa para SP_2,5% e solo. ....	71
Figura 4.29. Curvas de tensão x deslocamento horizontal 50 kPa e 200 kPa para SP_5% e solo. ....	72
Figura 4.30. Relação ângulo de atrito e intercepto coesivo por tempo de cura para os compósitos. ....	72
Figura 4.31. Relação Módulo de Resiliência x $\sigma_3$ , para Solo e SP_2,5% com diferentes tempos de cura. ....	75
Figura 4.32. Relação Módulo de Resiliência x $\sigma_3$ , para Solo e SP_5% com diferentes tempos de cura. ....	75
Figura 4.33. Relação Módulo de Resiliência x $\sigma_d$ , para Solo e SP_2,5% com diferentes tempos de cura. ....	77
Figura 4.34. Relação Módulo de Resiliência x $\sigma_d$ , para Solo e SP_5% com diferentes tempos de cura. ....	77
Figura 4.35. Modelo Composto do Solo, representado em MPa. ....	78
Figura 4.36. (a) Modelo Composto SP_2,5% com 7 dias de cura; (b) Modelo Composto SP_2,5% com 15 dias de cura; (c) Modelo Composto SP_2,5% com 30 dias de cura; (d) Modelo Composto SP_2,5% com 45 dias de cura. ....	79
Figura 4.37. (a) Modelo Composto SP_5% com 7 dias de cura; (b) Modelo Composto SP_5% com 15 dias de cura; (c) Modelo Composto SP_5% com 30 dias de cura; (d) Modelo Composto SP_5% com 45 dias de cura. ....	79
Figura 4.38. Relação entre N° de ciclos e deformação para ambos compósitos. ....	82

Figura 4.39. DRX do Solo. ....	86
Figura 4.40. DRX do compósito SP_2,5%. ....	86
Figura 4.41. DRX do compósito SP_5%. ....	87
Figura 4.42. Mapa dos elementos encontrados no Solo (a) Elementos principais; (b) União desses elementos. ....	88
Figura 4.43. EDS do Solo. ....	88
Figura 4.44. Mapa dos elementos encontrados no SP_2,5% (a) Elementos principais; (b) União desses elementos. ....	89
Figura 4.45. EDS do compósito SP_2,5%. ....	89
Figura 4.46. Mapa dos elementos encontrados no SP_5% (a) Elementos principais; (b) União desses elementos. ....	90
Figura 4.47. EDS do compósito SP_5%. ....	90
Figura 4.48. Resultados da Espectrometria de Florescência de Raio-X do Polímero; .....	91
Figura 4.49. Resultados da Espectrometria de Florescência de Raio-X (b) SP_2,5%; (c) SP_5%. ....	91
Figura 4.50. CHN do polímero. ....	92
Figura 4.51. Imagens obtidas por microscopia ótica (a) Solo; (b) Solo; (c) Parte externa do SP_2,5% com 15 dias de cura; (d) Parte externa SP_5% com 15 dias de cura; (e) Parte interna do SP_2,5% com 15 dias de cura;.....	94
Figura 4.52. Imagens obtidas por MEV (a) Solo com aumento de 75 vezes; (b) Solo com aumento de 85 vezes; (c) Solo com aumento de 140 vezes; (d) Solo com aumento de 950 vezes; .....	95
Figura 4.53. MEV do compósito SP_2,5% com aumento de 15 vezes. ....	96
Figura 4.54. MEV do compósito SP_2,5% com aumento de 75 vezes. ....	97
Figura 4.55. MEV do compósito SP_2,5% com aumento de 270 vezes. Verifica-se união dos grãos de solo (em azul). ....	97
Figura 4.56. MEV do compósito SP_2,5% com aumento de 330 vezes. Verifica-se união dos grãos de solo (em azul) e polímero nas superfícies dos grãos (em vermelho). ....	98
Figura 4.57. MEV do compósito SP_5% com aumento de 22 vezes. ....	99
Figura 4.58. MEV do compósito SP_5% com aumento de 90 vezes. ....	99
Figura 4.59. MEV do compósito SP_5% com aumento de 300 vezes. Verifica-se união dos grãos de solo (em azul) e polímero nas superfícies dos grãos (em vermelho). ....	100
Figura 4.60. MEV do compósito SP_5% com aumento de 550 vezes. Verifica-se união dos grãos de solo (em azul) e polímero nas superfícies dos grãos (em vermelho). ....	100

## LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIACÕES

---

$\bar{X}$	.....	Média dos valores
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 sessão transversal da amostra
ASTM	.....	<i>American Society of Testing Materials</i>
$c'$	.....	Intercepto coesivo
Cc	.....	Coefficiente de curvatura
Cu	.....	Coefficiente de uniformidade
D <sub>10</sub>	.....	Diâmetro das partículas de solo correspondente a 10% passante em peso
D <sub>30</sub>	.....	Diâmetro das partículas de solo correspondente a 30% passante em peso
D <sub>60</sub>	.....	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 <sub>0</sub>	.....	Altura inicial referência do corpo de prova
k <sub>1</sub>	.....	Coefficiente de regressão obtido por ensaio laboratorial
k <sub>2</sub>	.....	Coefficiente de regressão obtido por ensaio laboratorial
k <sub>3</sub>	.....	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>
$\Delta$ .....	Deformação elástica ou resiliente
$\Delta h$ .....	Deslocamento vertical máximo
$\delta$ .....	Massa específica dos grãos
$\varepsilon$ .....	Deformação axial específica
$\varepsilon_1$ .....	Deformação resiliente axial vertical
$\varepsilon_p$ .....	Deformação axial plástica
$\varepsilon_r$ .....	Deformação resiliente axial vertical
$\varepsilon_t$ .....	Deformação axial total
$\varepsilon_\tau$ .....	Deformação específica recuperável
$\mu$ .....	Coefficiente de Poisson
$\sigma$ .....	Tensão normal
$\sigma_1$ .....	Tensão normal vertical
$\sigma_3$ .....	Tensão de confinamento ou Tensão normal horizontal
$\sigma_d$ .....	Tensão desviadora ou desvio
$\sigma_h$ .....	Tensão normal horizontal
$\sigma_v$ .....	Tensão normal vertical
$\sigma_\tau$ .....	Tensão de tração aplicada no plano diametral
$\Phi'$ .....	Ângulo de atrito efetivo

# INTRODUÇÃO

O olhar sobre a construção civil tornou-se mais crítico ao ponto de vista ambiental. A sociedade e o ambiente, de maneira geral, exigem obras cada vez mais sustentáveis. Destarte, a implementação de materiais alternativos em diversas obras geotécnicas tornou-se um tema de grande interesse para estudo e aplicação. Seja para estabilização, melhoramento seja no reforço das diversas estruturas geotécnicas (Rezende, 2003).

Obras de infraestrutura rodoviária geram certo impacto ambiental na sua implementação. Uma maneira de minorar esse impacto é a utilização de materiais alternativos como estabilizantes das estradas pavimentadas ou não pavimentadas. No Brasil há 1,3 milhões de km de estradas não pavimentadas, 78,5% do total de quilômetros existentes no Brasil, (CNT, 2018). A utilização de materiais alternativos, visando uma menor exploração dos materiais tradicionais, poderá ser uma possibilidade factual de mitigação do impacto causado. Tendo em vista que grande parte das rodovias brasileiras são não pavimentadas, as soluções para essas rodovias devem buscar melhora no comportamento estrutural, segurança, conforto ao usuário e diminuição de manutenção.

O solo é elemento comum das obras geotécnicas e há grande variação e estratificação entre regiões, sendo muitas vezes requerida a estabilização e, conseqüentemente, o melhoramento do substrato utilizado (Barreto, 2019). A utilização de polímeros orgânicos como modificadores das estruturas de solo mostra-se promissora, melhorando a microestrutura das misturas e aumentando a durabilidade dos compósitos.

## 1.1. Motivação da Pesquisa

Unidades de conservação (UC) de uso sustentável, de acordo com o Ministério do Meio Ambiente são áreas que visam a conciliação da conservação da natureza mediante o uso sustentável dos recursos. Deste modo, todas as atividades, nesses locais, devem visar a perdurabilidade dos recursos ambientais renováveis. Um exemplo de área de proteção ambiental (APA) com as características citadas é APA-Jalapão.

APA-Jalapão foi criada em 2000 por meio da lei nº 1.172, possuindo 461.630 ha, sendo uma região que concentra grande extensão do bioma cerrado preservado (Tocantins, 2000; Benvindo, 2009). Além disso, é uma área com grande movimentação turística e possui potencial para crescimento econômico com características sustentáveis (Benvindo, 2009).

ICMbio (2013) afirma que o acesso à região do Jalapão é composto por estradas não pavimentadas e há alterações das condições delas de acordo com a época do ano: lama e poças na época de chuvas e excesso de poeira na época de seca. Carneiro & Adorno (2010) afirmam que além do exposto, outro dificultador da situação é a recorrente e constante necessidade de manutenção dessas estradas. Causando problemas ambientais associados a retirada de uma parte do cascalho, areia e argila das cabeceiras das vertentes de água (Carneiro & Adorno, 2010).

Assim, a utilização dos copolímeros nos compósitos da região da APA-Jalapão para melhoramento das estradas não pavimentadas pode ser uma possibilidade para a mitigação do impacto ambiental que obras de pavimentação geram, além de levar a uma melhora dos acessos ao local e dos parâmetros de resistência do solo, diminuição de manutenções, ganho de segurança e conforto aos usuários. Por conseguinte, o aumento da atividade turística na região e da economia.

## **1.2. Objetivos**

O presente trabalho tem como objetivo a compreensão do comportamento mecânico, bem como físico-químico-ambiental, de compósitos solo-polímero, buscando avaliar e comparar a influência da variação de parâmetros importantes na estabilização do solo com o polímero. A pesquisa visa, por meio de avaliação experimental, mostrar uma possibilidade de implementação de um novo material geotécnico, para aplicabilidade em pavimentação, aterros e taludes, com solução ao apelo ambiental local.

Os objetivos específicos da pesquisa são:

- Realizar caracterização física, mecânica, química e ambiental dos compósitos solo-polímero;
- Avaliar a influência da inserção do polímero no comportamento mecânico dos compósitos, por meio da realização de ensaios de compactação, resistência à

compressão não confinada, cisalhamento direto e triaxial cíclico para obtenção do módulo de resiliência, bem como avaliar o desgaste permanente dos compósitos em ensaios em simulador de tráfego laboratorial;

- Analisar a influência da variação da concentração do polímero no solo para tempos de cura distintos, para duas dosagens do aditivo;
- Comparar os parâmetros físicos, químicos e de resistência obtidos para o solo e compósitos e com as análises microestruturais entender a ação do polímero com o solo e o comportamento dos compósitos.

### **1.3. Estrutura da Dissertação**

A dissertação está estruturada em cinco capítulos. No capítulo 1 apresentam-se uma breve introdução e motivação da problemática estudada. Ademais, o objetivo geral e os objetivos específicos do trabalho são apontados. No capítulo 2 é exposto uma breve revisão da literatura sobre o tema, para que o leitor compreenda os conceitos necessários para os capítulos posteriores. Dentre os assuntos abordados no capítulo, destacam-se: conceitos e tipos de estabilização e melhoramento de solos; breve definição de polímero; e uma sucinta revisão dos trabalhos mais recentes envolvendo compósitos solo-polímero.

No capítulo 3 explicita os materiais e equipamentos necessários para o desenvolvimento dos estudos laboratoriais realizados, bem como as metodologias aplicadas nos ensaios de caracterização física, mecânica, hidráulica, química, mineralógica e morfológica.

O capítulo 4 reúne-se os resultados obtidos nos ensaios de caracterização citados no capítulo precedente. Também estão incluídos nesse capítulo todas as análises necessárias para que os objetivos descritos fossem atingidos. Por fim, no capítulo 5 encerra-se a dissertação com as conclusões encontradas, tal como apresenta sugestões para pesquisas futuras.

### REVISÃO DE LITERATURA

O comportamento de um solo depende da relação entre as três fases que são presentes: sólido, ar e água. Pinto (2006) afirma que para identificação do solo e das partículas que constituem é fundamental a realização de dois tipos de ensaio: caracterização granulométrica (por peneiramento e por sedimentação) e os índices de consistência (liquidez, plasticidade, contração).

Ademais, para que haja uma melhor compreensão do solo deve-se conhecer os índices físicos (índice de vazios, porosidade, teor de umidade, grau de saturação, porcentagem de ar, massa específica – real dos grãos, aparente úmida, seca, aparente do solo saturado e solo submerso) e as propriedades físicas e mecânicas (permeabilidade, capilaridade, compressibilidade, elasticidade, contratilidade e expansibilidade, resistência ao cisalhamento) (DNIT, 2006).

#### 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 o 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 compacidade, 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 argílicosargilosos. 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 centrifuga. 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 de 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 (2014) 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 resistiva 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 Austroads, agência Australiana, para materiais estabilizados com cimento (Tabela 2.1).

Tabela 2.1 Classificação Austroads 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.

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).

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. 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 depende 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.

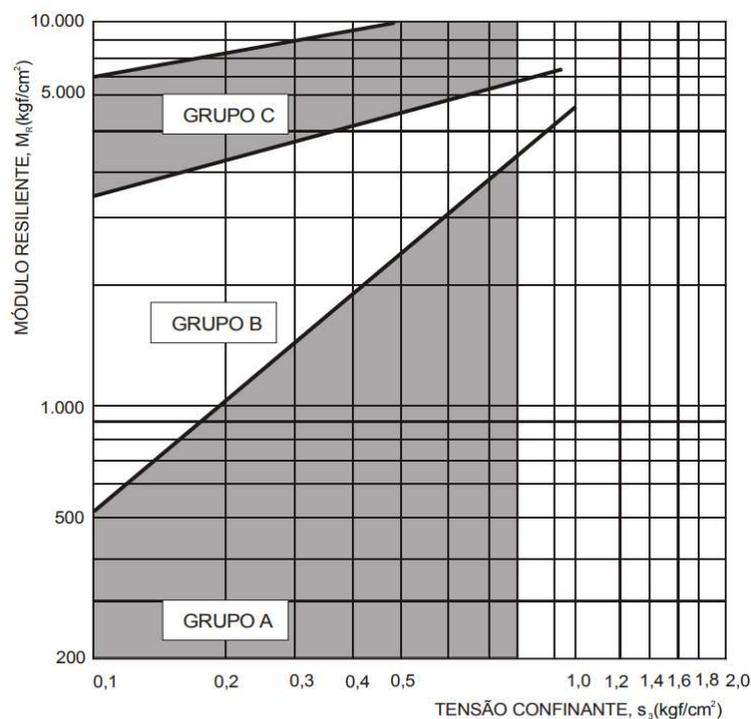


Figura 2.1 Classificação resiliente de solos granulares (DNIT, 2006)

## 2.2. Polímero

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 (Sperling, 2005; Canevarolo, 2006).

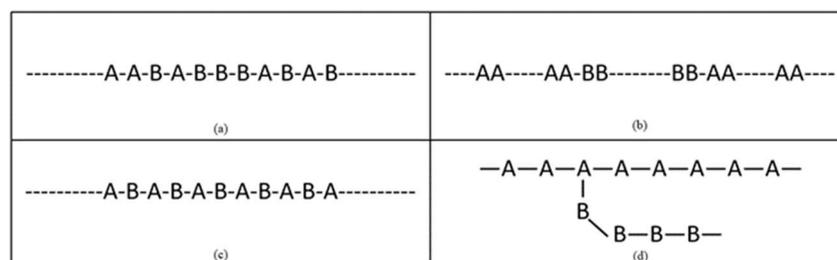


Figura 2.2. Organização dos polímeros. (a) Organização aleatória; (b) Organização alternada; (c) Organização em bloco; (d) Organização grafitizada. (Modificado - Canevarolo, 2006)

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.

### **2.2.1. Compósitos Solo-Polímero**

Hollaway (2009) afirma que foi visível por mais de 30 anos, após a Segunda Grande Guerra, a ausência de investimento em pesquisa e desenvolvimento da indústria de construção civil, devido à falta de progresso nos métodos de construção e dos materiais. Contudo, a partir da década de 1980 o interesse sobre a construção civil e suas metodologias, juntamente com aumento de investimentos, começou uma revolução a nível mundial. Ainda de acordo com Hollaway (2009) um elemento de destaque para essa revolução foi a introdução das fibras polimérica para reforço de estruturas.

Na engenharia geotécnica o uso e desenvolvimento de polímeros para a estabilização química também está atrelado aos momentos da Segunda Grande Guerra cujo os objetivos eram as necessidades militares. Era necessário desenvolver produtos que facilitaríamos 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. (Brazentti, 1996).

Tendo em vista as dificuldades de construção e melhoramento de solo para usos militares, houve incentivo do governo americano ao desenvolvimento de pesquisas de novos materiais para que fosse possível tornar diferentes solos adequados para a construção rodoviária. Woodring (1952) detalha que houve métodos norteadores para a pesquisa: agentes químicos conhecidos e não estudados e agente químicos com potencial de utilização. Desses

norteadores seriam feitas revisões bibliográficas e experimentos laboratoriais, pesquisa experimental com desenvolvimento e intensivo desenvolvimento laboratorial com testes em campo.

A grande conclusão advinda desses estudos foi 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. Assim, conectados por reações de troca iônica e polimerização do produto, assim, construindo cadeias de moléculas que se conectam com as partículas, formando compósitos solo-aditivo químico (Woodring, 1952; Benzetti, 1996).

Grandes institutos americanos como FHWA, universidades, departamentos estaduais, USDA e indústrias intensificaram estudos relacionados ao emprego desses novos materiais químicos para uso em aeroportos e rodovias. Um exemplo é o MIT que em 1946 começou um programa que visava o desenvolvimento de materiais e métodos para a melhora da estabilização do solo. (Willis e Carpenter 1939; Woodring, 1952; Smith, 1941; Benzetti, 1996).

Thomas Willian Lambe pesquisador e professor emérito do MIT realizou diversos estudos sobre a estabilização de solo. Na primeira grande conferência internacional sobre o tema em 1952, ele relatou os progressos sobre estudos de aditivos. Juntamente com pesquisas expostas por Lambe (1952), Murrey (1952) apresenta resultados sobre agregações das partículas e as forças existentes nos compósitos formados, estudos da granulometria e mineralogia dos materiais como fundamentais para os processos químicos e físicos de estabilização.

Com o aumento de estudos e novos resultados houve um aumento do interesse de indústrias e de órgãos federais. Kinter (1975) relata sobre os acordos feitos entre as indústrias e o FHWA. As indústrias que cooperaram tinham privilégios para regulamentação de seus produtos, por terem sido pioneiras no desenvolvimento de novas tecnologias e todo esforço advir diretamente delas. Por outro lado, o governo facilitaria a aplicação desses materiais em campo quando provada a sua eficácia. Contudo, Kinter (1975) faz uma crítica, que pode ser aplicada aos dias atuais, sobre a pouca informação sobre os produtos utilizados e suas propriedades. Porém, se observados os resultados de estudos mecânicos e comportamentais dos compósitos era vantajosa a sua aplicação.

Com todo histórico exposto, pode-se avaliar alguns estudos mais recentes sobre de compósitos solo-polímero e visando a aplicação em diferentes áreas da geotecnia. A aplicação

de estabilização química utilizando polímeros visa o melhoramento do comportamento mecânico do material, para as mais diversas aplicações geotécnicas.

Al-Khanbashi & El-Gamal (2003) estudaram emulsão polimérica acrílico estirenada em um solo arenoso do deserto Al Ain nos Emirados Árabes Unidos. Avaliaram a condutividade hidráulica e a resistência à compressão não confinada para diferentes dosagens de solução polimérica e para duas metodologias de compactação. O solo arenoso fofo com o tempo de cura se solidificou, além de serem observadas melhoras significativas das propriedades mecânicas e hidráulicas para todas as porcentagens de solução adicionadas quando comparado com o solo sem melhoramento

Hernández *et al.* (2005) comparam um solo expansivo sendo melhorado com cal e com dois tipos de copolímeros. Os resultados com ambos 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 o coeficiente relativo de expansão.

Zandieh & Yasrobi (2010) aplicaram polímero em solos arenosos advindos de dunas do deserto de Garmsar no Irã. Avaliaram com tempo de cura de 1, 2, 7, 14 e 28 dias com 7 porcentagens distintas de dois tipos de polímeros, realizando ensaio de resistência à compressão não confinada. Verificaram um aumento considerável na resistência à compressão não confinada e melhora da resistência à deterioração na presença de água. Avaliaram que entre o 3º e 7º dia de cura já há 90% de ganho da resistência a compressão não confinada total.

Naeini & Ghorbanalizadeh (2010) realizaram estudo com uma areia siltosa buscando estabilizá-la com uma emulsão polimérica de resina epóxi e avaliando comportamento mecânico nas condições seca e submersa. Avaliaram que a adição da emulsão aumentou significativamente a resistência à compressão não confinada, contudo as amostras não submersas tiveram melhor resultado que as submersas a partir do 7º dia de cura.

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 de ruptura e melhora de todos valores do solo arenoso não tratado.

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

Barreto *et al.* (2018) constataram 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.

Okonta (2019) avaliou a aplicação de solução polimérica acrílica em diferentes tempos de cura, porcentagens e temperaturas para um solo característico da região da África do Sul. Okonta verificou a redução de vazios com o aumento da porcentagem de solução polimérica. Além disso, verificou que com a cura a maiores temperaturas houve incremento da resistência à compressão não confinada quando comparado a cura para mesmo tempo com menor temperatura. O solo utilizado tinha características arenosas predominantes e assim a adição da solução polimérica mostrou-se eficaz por gerar cimentação entre os grãos.

Lee *et al.* (2019) estudaram a estabilização de um solo para estradas no Sir-Lanka comparando resultados de uma solução biopolimérica (xanthan gum), cinzas volantes, cimento Portland e cinzas de fundo. A comparação mecânica se deu por ensaios de compressão não confinada. A resistência à compressão não confinada do solo melhorado com a solução biopolimérica foi menor nos primeiros dias e maior com 28 dias. Os resultados do solo melhorado com a solução biopolimérica mostraram-se mais dúcteis do que os outros materiais.

### 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 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

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  $10^{\circ}24'32,8''$  sul e longitude  $47^{\circ}05'45,2''$  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, 2001; Marinho *et al.*, 2003; ICMbio, 2013). Na Figura 3.2 está representado o mapa da Unidade de Conservação do Jalapão.

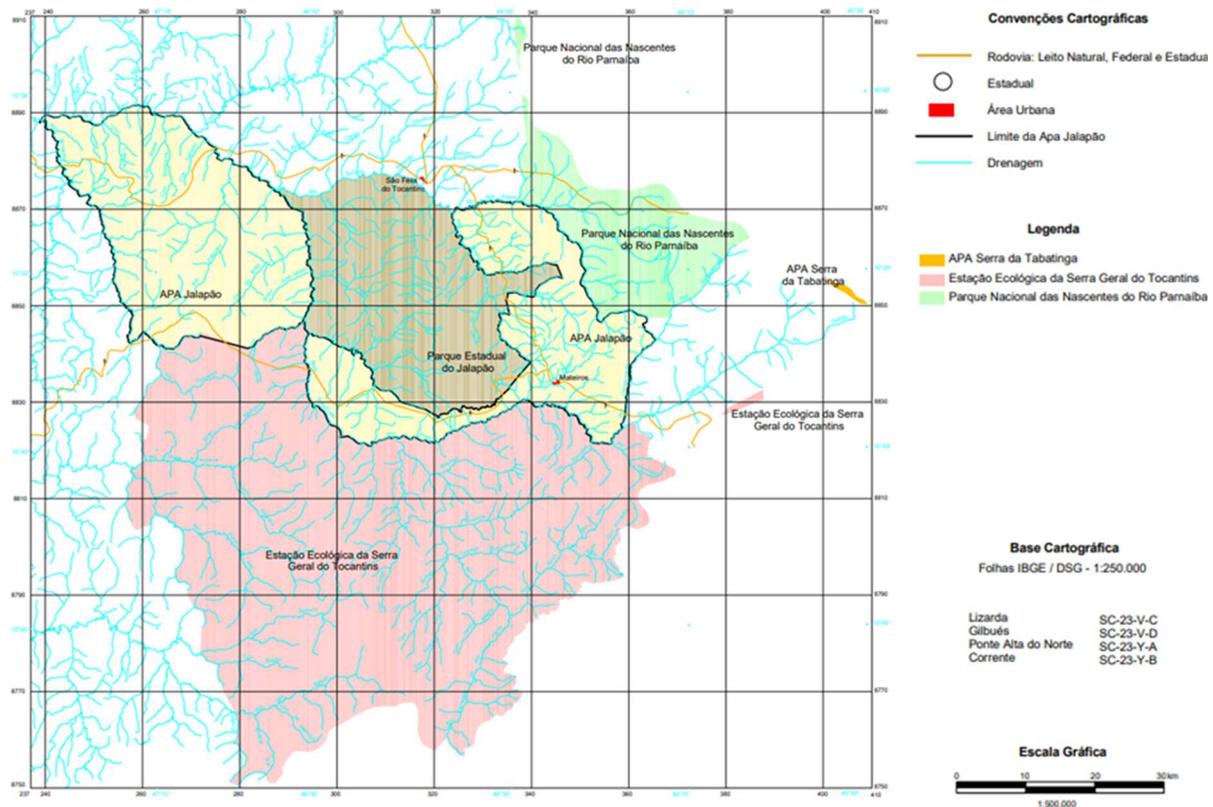


Figura 3.2. Mapa da Unidade de Conservação (Fonte: SEPLAN 2003)

O solo foi caracterizado por meio dos ensaios normatizados: Análise granulométrica (ABNT NBR 7181, 2016), limite de liquidez (ABNT NBR 6459, 2016), limite de plasticidade (ABNT NBR 7180, 2016), massa específica dos grãos (ASTM D5550, 2014), compactação (ABNT NBR 7182, 2016) (energias normal e intermediária), determinação da expansão do solo (ABNT NBR 9895, 2017), módulo de resiliência (AASHTO T307-99) e determinação do coeficiente da permeabilidade à carga constante (ABNT NBR 13292, 1995).

Realizou-se ensaios de caracterização química e mineralógica do solo para melhor entendimento dos elementos constituintes e para que a avaliação comparativa posterior fosse mais precisa. Ademais, realizou-se os ensaios de microscopia eletrônica de varredura (MEV) e difração de raio X (DRX) do solo e compósitos.

### 3.1.2. Polímero

Na pesquisa foi utilizado o material TERRAFIX 11 (CAS: 25035-69-2) o qual consiste em um copolímero acrílico-estirenado, orgânico, obtido aleatoriamente. Sendo uma emulsão aquosa de caráter aniônico, produzido e distribuído pela empresa Waterflows. O polímero possui pH 8,0–9,0, densidade de 0,98–1,04 g/cm<sup>3</sup> e viscosidade 3.000–10.000 cps, e totalmente solúvel em água. De acordo com o fabricante o produto pode ser usado como selante (reduzidor de poeira) e estabilizante do solo. A Figura 3.3 mostra o galão no qual o produto é distribuído e o polímero.

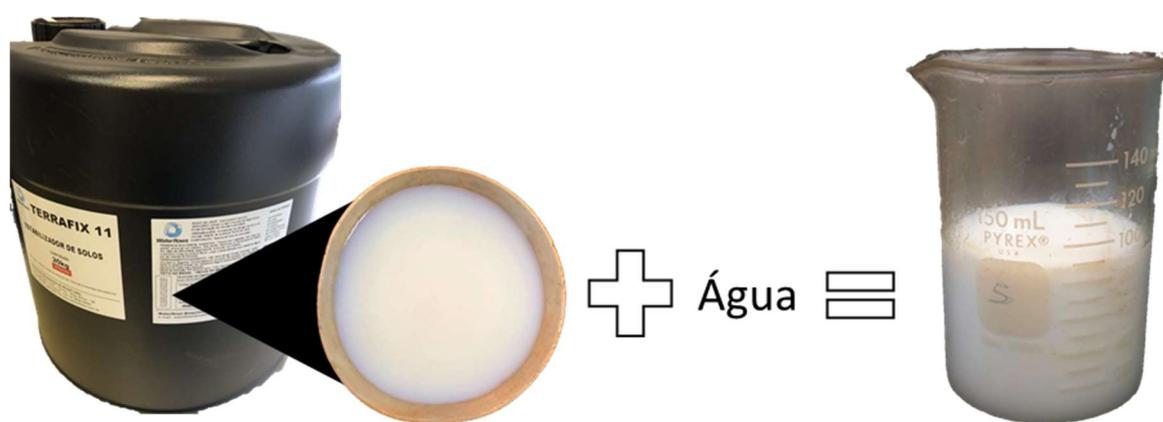


Figura 3.3. Produto utilizado como estabilizante.

A composição quali-quantitativa do material não foi fornecida pelo fabricante, por se tratar de sigilo comercial e industrial. Contudo no Quadro 3.1, fornecido pelo fabricante, compilam-se três compostos que podem possuir impurezas com potencial toxicológico.

Quadro 3.1. Componentes toxicológicos do produto (Fonte: Fabricante)

Composto Químico	Fórmula Química	Faixa de Concentração (%)
Éster de ácido acrílico na forma livre	C <sub>3</sub> H <sub>4</sub> O	< 0,5
Vinil Benzeno	C <sub>8</sub> H <sub>8</sub>	< 0,5
Amoníaco em Solução	H <sub>5</sub> NO	< 0,25

Foram realizadas as caracterizações química e biológica do polímero para obter um maior conhecimento e esclarecimento do produto em si e das possíveis reações com o solo.

Foram feitas duas dosagens para o estudo. A primeira solução continha 25% de polímero e 75% de água, ou seja, na proporção de 1:4 do volume total, sugerida pelo fabricante do polímero. A segunda solução continha 50% de polímero e 50% de água, ou seja, na proporção de 1:2 do volume total. A adição da solução polimérica foi realizada em relação à massa do

solo seco. Dessa maneira, quando houve a adição da solução de 25%, em relação à massa do solo seco e de acordo com a umidade ótima encontrada (item 4.2) o equivalente à 2,5% de polímero estava presente no compósito. Enquanto, a solução de 50% é equivalente à 5% de polímero que presente no compósito.

### 3.1.3. Compósitos

Apresentará os tempos de cura dos compósitos e as preparações dos corpos de prova para os ensaios a serem realizados

#### 3.1.3.1. Tempo de Cura

Os tempos de cura avaliados estão compilados no Quadro 3.2 organizados de acordo com os ensaios. A cura foi feita ao ar, pois o endurecimento dos compósitos só ocorreu com o contato ao ar. A contagem dos dias de cura se dá após a confecção do corpo de prova.

Quadro 3.2. Ensaios realizados e tempos de cura referentes

Métodos de Ensaio	Tempos de Cura (dias)
Determinação da Resistência à Compressão não Confinada	1, 2, 4, 7, 15, 30 e 45
Cisalhamento Direto	0, 1, 2, 4, 7, 15, 30 e 45
Determinação do Módulo de Resiliência para Solo	7, 15, 30 e 45
WP4C – Medidor de Potencial Hídrico	0, 1, 2, 4, 7, 15 e 30

Os ensaios com compósito: determinação do MR – misturas asfálticas –, dano de umidade, determinação da resistência à tração por compressão diametral, ensaio da Hamburg Wheel-Track, determinação de permeabilidade, determinação da absorção d'água, avaliações químicas, ambientais e microestruturais foram realizadas com 15 dias de cura.

#### 3.1.3.2. Preparação das amostras

As amostras de compósito para a realização dos ensaios foram preparadas com a junção do solo com a solução polimérica. Pelo fato de a pesquisa contemplar tempos de cura distintos, foi necessária a moldagem prévia dos materiais, cada qual respeitando a energia de compactação utilizada e dimensões necessárias para cada ensaio. Buscou-se manter todos os

corpos de prova em um mesmo ambiente, para que tivessem as mesmas condições de cura (variações controladas de temperatura e umidade).

Os corpos de prova foram mantidos no Laboratório de Geotecnia da Universidade de Brasília, na sala de ensaios especiais. A exposição das amostras foi com uma média de umidade de 20-40% e de temperatura de 21-35°C. Deve-se pontuar que no momento da mistura entre o solo e a solução polimérica verifica-se uma consistência pastosa, que se endurece quando em contato com o ar (do contato com o meio externo com o meio interno da amostra) e com o passar dos dias de cura.

As amostras ficaram em cura sem os moldes, pois observou-se que a cura dos compósitos ocorria ao ar e de forma progressiva, de fora para dentro. Deve-se pontuar que o polímero era adicionado na água, nas devidas dosagens e misturado manualmente, e após a obtenção da solução polimérica toda ela era utilizada. Para, assim, evitar qualquer tipo de reação química, devido ao armazenamento, e, também, assemelhando o empregado em campo, onde o polímero puro é adicionado à água em caminhões pipas para posterior aplicação e mistura com o solo.

Para o ensaio de cisalhamento direto foram utilizadas amostras com as dimensões de 60x60 mm com 25 mm de altura. Realizou-se a compactação com energia normal no cilindro grande, representando a possível quebra de grãos e interação entre elementos do solo e solução. Dessa maneira, buscando “desbastar” as amostras, assim cada cilindro compactado gerava as amostras necessárias para ensaio de cisalhamento direto. Houve controle da massa específica e umidade. Na Figura 3.4 mostra-se como foi realizada a moldagem desse corpo de prova e o corpo de prova final.

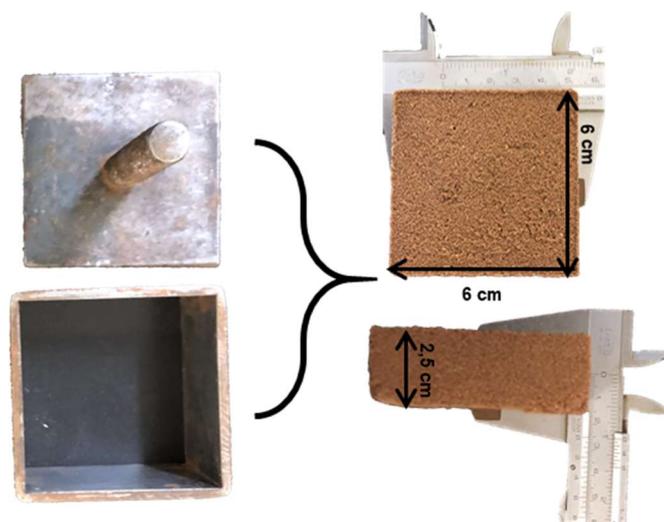


Figura 3.4. Método de moldagem dos CPs do ensaio de compressão simples

Para a determinação da resistência à compressão não confinada, do módulo de resiliência para solo e da absorção d'água, utilizaram-se amostras cilíndricas com as dimensões de  $10 \pm 0,5$  cm de altura e com  $5 \pm 0,1$  cm de diâmetro. A moldagem desses corpos de prova foi realizada no compactador miniatura e seus acessórios. Esses corpos de prova foram moldados para a energia intermediária, utilizando 3 camadas com 7 golpes com soquete grande. Na Figura 3.5 mostra-se o corpo de prova após a moldagem.

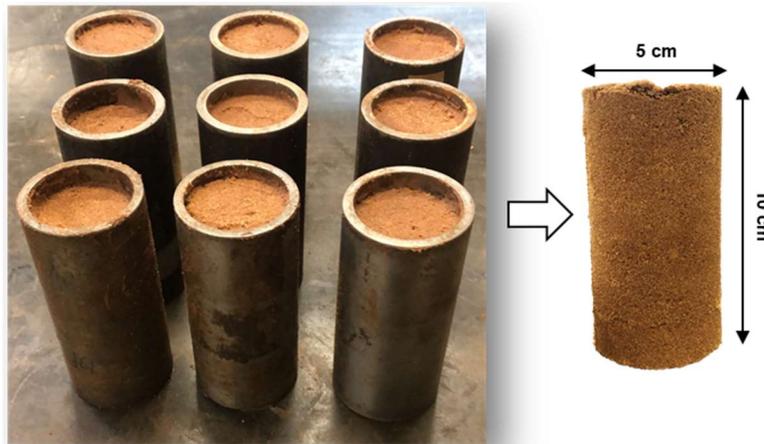


Figura 3.5. Corpos de prova cilíndricos com 10x5 cm.

Para a determinação da permeabilidade dos compósitos foram utilizadas amostras cilíndricas com as dimensões de  $12 \pm 0,1$  cm de altura e com  $10 \pm 0,1$  cm de diâmetro. A moldagem desses corpos de prova foi feita para a energia intermediária e com cilindro pequeno determinado na norma NBR 7182 (ABNT, 2016) (equivalente à ASTM D1557-12e1). O corpo de prova final está representado na Figura 3.6.

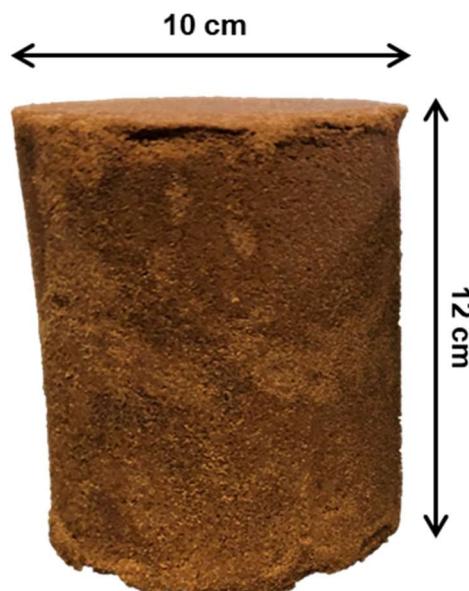


Figura 3.6. Corpo de prova cilíndricos com 12x10 cm.

Para os ensaios adaptados de resistência à tração por compressão diametral e determinação do módulo de resiliência de mistura asfáltica para os compósitos foram utilizadas amostras cilíndricas com as dimensões de  $6\pm 0,1$  cm de altura e com  $10\pm 0,1$  cm de diâmetro. A moldagem desses corpos de prova foi feita para a energia intermediária. Para atingir a respectiva energia e par de umidade e massa específica a compactação foi realizada com soquete grande com 2 camadas, sendo 20 golpes em cada. O corpo de prova final está representado na Figura 3.7.

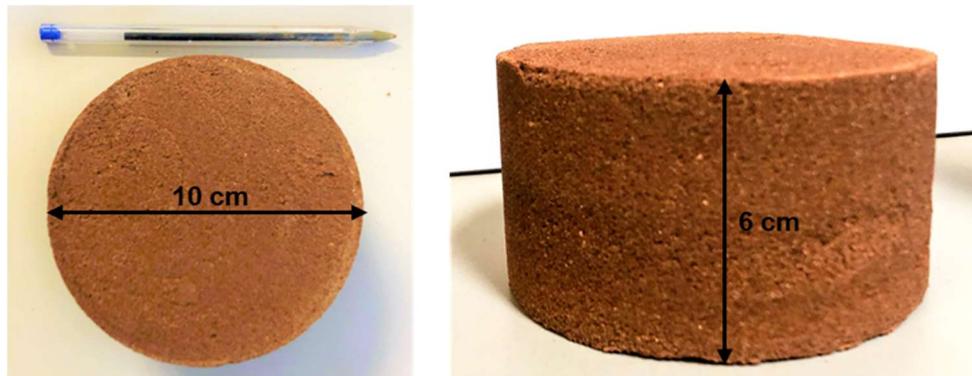


Figura 3.7. CP para ensaios adaptados de mistura asfáltica.

Outro ensaio adaptado foi o de dano por umidade induzida. Foram empregadas amostras cilíndricas com as dimensões de  $3,3\pm 0,1$  cm de altura e com  $5\pm 0,1$  cm de diâmetro. A moldagem desses corpos de prova foi feita para a energia intermediária. Realizou-se a compactação na base de MCT, colocou-se um papel filtro agindo como divisor entre camadas, formando 3 corpos de prova para 1 cilindro, seguindo as especificações das moldagens dos corpos de prova para módulo de resiliência e compressão simples. O corpo de prova final está representado na Figura 3.8.

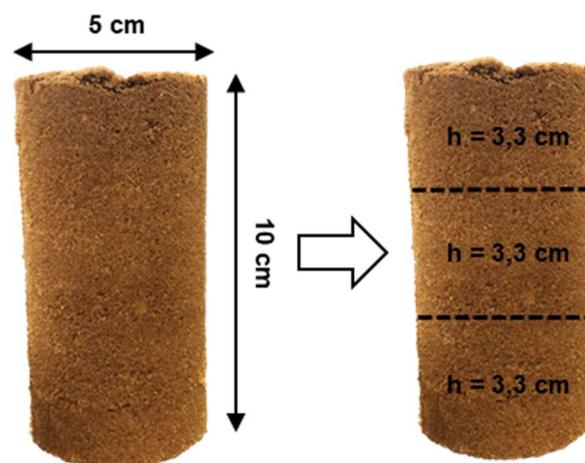


Figura 3.8. CPs gerados a partir de CP 10x5 cm.

Outro ensaio que foi adaptado para os compósitos foi o *Hamburg Wheel-Track*, estilo simulador de tráfego laboratorial, para avaliação do desgaste permanente da superfície. Foram confeccionadas amostras retangulares com as dimensões de 30 por 40 cm e com 6 cm de altura. A moldagem desses corpos de prova foi feita para a energia intermediária, controlando o par de umidade ótima e massa específica seca. O corpo de prova final está representado na Figura 3.9.

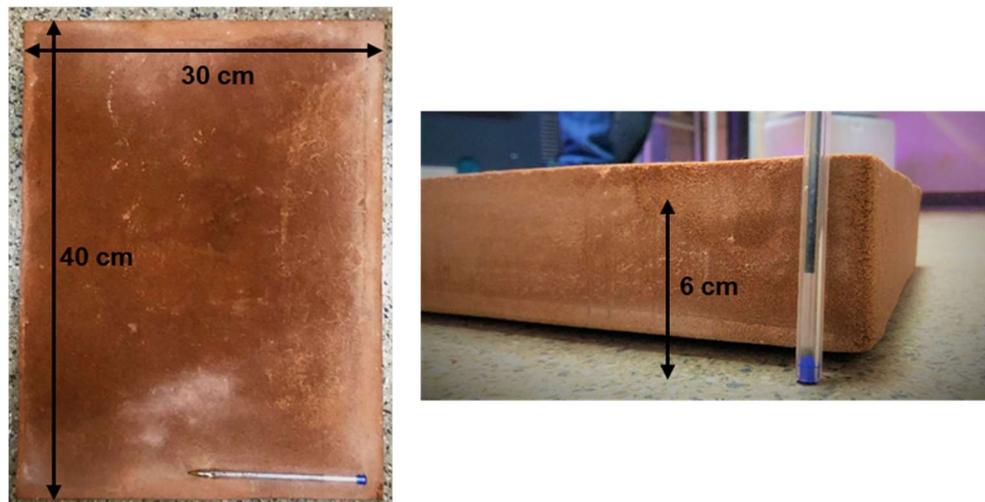


Figura 3.9. Placa para avaliar desgaste na superfície.

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. A moldagem desses corpos de prova foi feita para a energia intermediária, controlando o par de umidade ótima e massa específica seca. Tanto os equipamentos para a moldagem quanto o corpo de prova final estão representados na Figura 3.10.



Figura 3.10. Método de moldagem para análise da sucção total.

Para a amostra a ser analisada por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e de Florescência de Raio-X, foram utilizadas amostras cilíndricas com as dimensões de 1 cm de altura e com 1 cm de diâmetro. A moldagem desses corpos de prova foi feita para a energia intermediária, controlando o par de umidade ótima e massa específica seca. O corpo de prova final está representado na Figura 3.11.

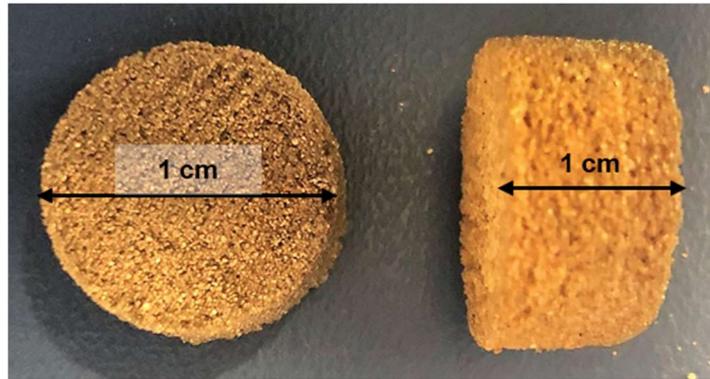


Figura 3.11. CP cilíndrico 1x1 cm para MEV e fluorescência de Raio-X.

## 3.2. Ensaio Realizados

Nos itens subsequentes serão explicados os ensaios realizados para a caracterização mecânica, hidráulica, química, ambiental, mineralógica e microestrutural.

### 3.2.1. Caracterização Mecânica

Nos itens subsequentes serão explicados os ensaios realizados para a caracterização mecânica, os quais são: compactação, cisalhamento direto, determinação da resistência à compressão não confinada, determinação da expansão, determinação do módulo de resiliência, avaliação de desgaste da superfície em simulador de tráfego laboratorial, determinação da resistência à tração por compressão diametral e determinação do dano por umidade induzida.

### **3.2.1.1. Ensaio de Compactação**

O ensaio de compactação foi realizado de acordo com a NBR 7182 (ABNT, 2016) (equivalente à ASTM D1557-12e1), as energias utilizadas foram energia normal e energia intermediária. Os resultados obtidos no ensaio de compactação com a energia normal foram aplicados para o ensaio de cisalhamento direto e com energia intermediária para os outros ensaios realizados.

A realização da compactação para os compósitos foi adaptada com o requerido em norma. Ao invés da adição de água a cada ponto era realizada a adição de solução polimérica. Preparou-se previamente a solução na dosagem desejada, sendo, então, adicionada em massa em relação ao solo seco. Procedeu-se dessa maneira, pois realiza-se em campo desse modo e caso se adicionasse a água previamente e posteriormente o polímero (não diluído) não haveria a garantia de que todas as partes do solo estariam umedificadas com o polímero de maneira equivalente, nem garantia da porcentagem de solução adicionada.

Por exemplo, caso a umidade ótima da mistura fosse 10%, para a solução 1:4 há adição de 2,5% de polímero. Com o caso hipotético, mantendo uma umidade de 10% para a solução 1:2 haveria um total de 5% de polímero.

Percebeu-se a existência de perda de umidade em aproximadamente 1,5% com a adição da solução. Dessa maneira, para atingir o respectivo par de umidade ótima e máxima massa específica seca deve-se adicionar 1,5% de solução em massa de solo seco.

A realização da compactação para o solo foi feita nas energias citadas anteriormente sem adaptações.

### **3.2.1.2. Determinação da Resistência à Compressão Não Confinada**

A norma NBR 12770 (ABNT, 1992) (equivalente à ASTM D1633-17) tem como objetivo a determinação da resistência à compressão não confinada por aplicação de uma carga axial. Os corpos de prova utilizados possuem a relação 5 cm de diâmetro e 10 cm de altura e foram obtidos por meio de compactação com energia intermediária.

A velocidade de ensaio foi de 1,27 mm/min.. Para uma melhor comparação entre os compósitos e para obtenção da curva completa realizou-se até 3 minutos de ensaio, apesar de já ter ocorrido a ruptura. Verificou-se que com esse tempo todos corpos de prova sofreram 20% de deformação ou atingiram o pico. Buscou-se continuar o ensaio para avaliar o pós-pico e dessa maneira entender o comportamento do compósito – nas diferentes dosagens e tempos de cura – após a ruptura. A RCS (Resistência à compressão simples) foi calculada de acordo com o representado na expressão:

$$RCS = \frac{P}{(100 \cdot A_i) / (100 - \varepsilon)} \quad (3.1)$$

Em que: P é a carga aplicada;  $A_i$  é a área da seção transversal média;  $\varepsilon$  é a deformação axial específica correspondente ao carregamento.

Não foi possível a realização do ensaio com o solo, por ser um solo não plástico e arenoso, sem coesão, além de se tratar de um ensaio não confinado.

### 3.2.1.3. Ensaio de Cisalhamento Direto

O ensaio de cisalhamento direto foi realizado de acordo com a ASTM D3080-04. Esse ensaio busca a determinação dos parâmetros de resistência do solo, coesão e ângulo de atrito, estabelecendo, então, a envoltória de resistência de Mohr-Coulomb em tensões efetivas.

Na Figura 3.12 mostra-se o equipamento disponível no Laboratório de Geotecnia da Universidade de Brasília e utilizado para a realização desse ensaio. O equipamento consiste em um aquisitor de dados, medidores de deslocamento – LVDTs (do inglês, *Linear Variable Differential Transformer*) – um vertical e um horizontal, e uma célula de carga para medição da força aplicada.

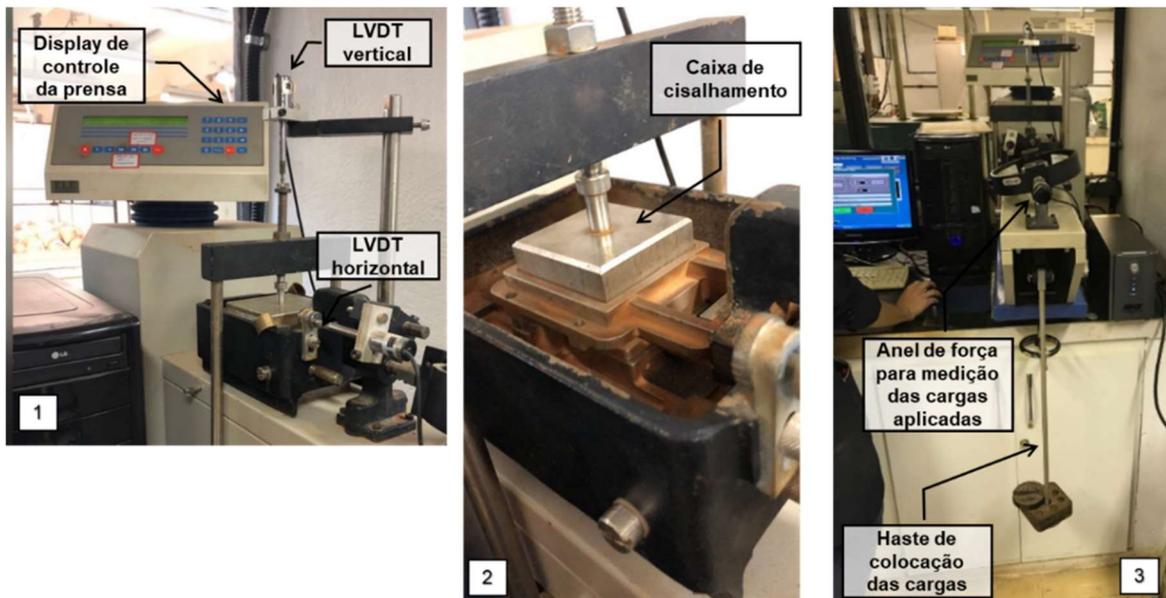


Figura 3.12. (1) Display e *LVDTs*; (2) Caixa de cisalhamento; (3) Aplicação das cargas e anel para medição da força.

Na Figura 3.13 representam-se os acessórios usados para a montagem do ensaio. A realização do ensaio se deu com a caixa de cisalhamento pequena (60 x 60 mm).



Figura 3.13. Equipamentos utilizados para a realização do ensaio.

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 e com os compósitos, para ambas dosagens. Os corpos de prova foram confeccionados obedecendo o teor de umidade ótima e massa

específica seca referente ao ensaio de compactação na energia normal. Aplicou-se 50, 100, 200 e 400 kPa de tensão normal para a obtenção da envoltória de resistência de Mohr-Coulomb.

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.

#### **3.2.1.4. Determinação da Expansão**

Realizou-se o ensaio de expansão com ambos compósitos e com o material puro. O ensaio foi realizado de acordo com a norma DNIT 172 (2016). A determinação da expansão se deu por duas maneiras para os compósitos: colocando os corpos de prova imersos em água e ao contato com o ar. Definiu-se a medição com os corpos de prova não submersos pela cura do mesmo ser realizada em contato com o ar e buscar o entendimento da expansão do material em condição lateralmente confinada e com a sobrecarga.

Foram realizadas leituras dos extensômetros de 24 em 24 horas durante um período de 15 dias. O período de leituras foi estendido em 3 dias comparado com a norma, por entender que o comportamento do compósito se alterava significativamente até o 15º dia.

#### **3.2.1.5. Determinação da Resistência à Tração por Compressão Diametral**

O ensaio foi realizado no laboratório do DER (Departamento de Estradas e Rodagem) do Distrito Federal localizado no distrito rodoviário na região administrativa de Sobradinho, na BR-020. O ensaio foi realizado de acordo com a normativa 136/2018 (DNIT, 2018). A aplicação da carga vertical de compressão teve velocidade de deformação de 0,8 mm/seg até a ruptura completa. Na Figura 3.14 mostram-se o equipamento utilizado e o corpo de prova já rompido.



Figura 3.14. (1) Prensa utilizada para realização do ensaio; (2) Corpo de Prova após ruptura.

Com os valores obtidos é calculada a resistência à tração por compressão diametral de acordo com a equação:

$$\sigma_R = \frac{2F}{\pi \cdot D \cdot H} \quad (3.9)$$

Em que: F é a carga aplicada; D é o diâmetro médio do CP; H é a altura média do CP.

Com os resultados é feita uma média aritmética e determinado o valor da resistência à tração por compressão diametral (RT) para os compósitos.

### 3.2.1.6. Determinação do Módulo de Resiliência

Desde 1986, no 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:

$$MR = \frac{\sigma_d}{\mathcal{E}_1} \quad (3.2)$$

Em que:

$$\mathcal{E}_1 = \frac{\Delta h}{h_o} \quad (3.3)$$

Em que:  $\sigma_d$  é a tensão desvio;  $\mathcal{E}_1$  é a deformação resiliente axial;  $\Delta h$  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.

$$\mathcal{E}_t = \mathcal{E}_r + \mathcal{E}_p \quad (3.3)$$

- **Ensaio Triaxial de Cargas Cíclicas – Ensaio para Solos**

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).

A norma utilizada para a realização do ensaio foi AASHTO T 307-99 (2007) referente ao ensaio para base e sub-base. Na Tabela 3.1 apresentam-se os pares de tensões aplicados a cada ciclo, tensão normal horizontal ( $\sigma_3 = \sigma_h$ ) e vertical ( $\sigma_1 = \sigma_v$ ). Para os cálculos usa-se os pares de tensão confinante ( $\sigma_3$ ) e tensão desvio ( $\sigma_d = \sigma_1 - \sigma_3$ ).

Tabela 3.1. Pares de tensão aplicados para cada ciclo. (AASHTO T307-99, 2007)

$\sigma_3$ (kPa)	$\sigma_d$ (kPa)	$\sigma_1/\sigma_3$ (kPa)
20,7	20,7	2
	41,4	3
	62,1	4
34,5	34,5	2
	68,9	3
	103,4	4
68,9	68,9	2
	137,9	3
	206,8	4
103,4	68,9	1,6
	103,4	2
	206,8	3
137,9	103,4	1,7
	137,9	2
	275,8	3

Aplica-se uma carga cíclica de forma de onda *heversine* com pulsos de 0,1 s e descarregamento de 0,9 s, resultando em uma frequência de 1 Hz. O ciclo 0 é dito ciclo de acomodação (aplica-se o valor de 103,4 kPa para ambas tensões confinante e desvio) e aplica-se um total de 500 aplicações. Seguem-se, então, 15 ciclos, cada um com 100 repetições, para os referentes pares tensão representados na Tabela 3.1.

O equipamento Triaxial Cíclico utilizado encontra-se no Laboratório de Infraestruturas (Infralab), localizado na Universidade de Brasília. Ele foi desenvolvido pela empresa *ELE International* e utiliza ar comprimido para a aplicação de cargas. Consiste basicamente de 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 externos 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 3.15 mostra-se o equipamento e seus acessórios.

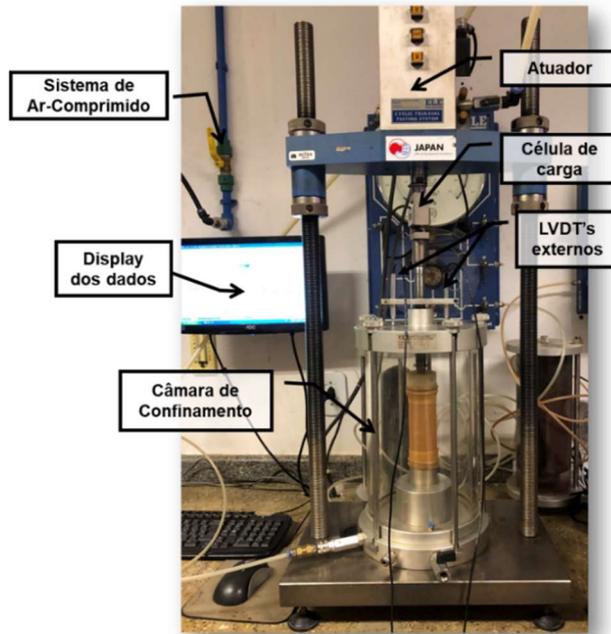


Figura 3.15. Equipamento Triaxial Cíclico.

Para determinação do MR dos compósitos foram confeccionados três corpos de provas e por ser um ensaio não destrutivo reutilizou-se os corpos de prova para cada tempo de cura. Durante o ensaio, os corpos de prova são envoltos com uma membrana de látex e colocados na base. Os dois LVDTs, medem as deformações axiais a cada ciclo, são colocados externamente à câmara e conectados a uma haste que está em contato direto com o corpo de prova. O equipamento existente no laboratório comporta corpos de prova nas dimensões de 10 x 5 cm. Na Figura 3.16 mostra-se os passos utilizados para a montagem do ensaio triaxial de cargas repetidas.

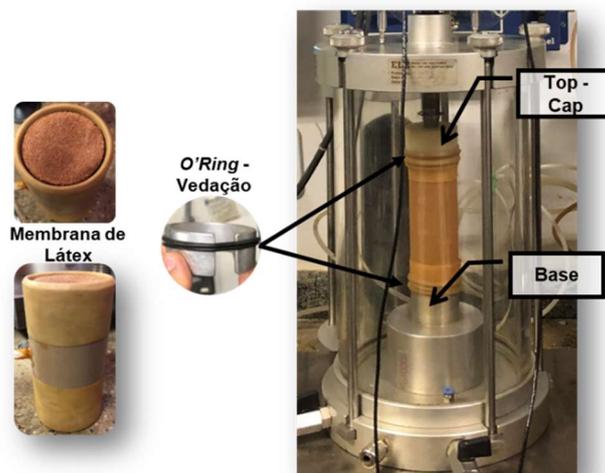


Figura 3.16. Método de montagem para determinação do MR.

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 bipartido.

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 seguinte equação:

$$MR = k_1 \cdot \sigma_3^{k_2} \quad (3.4)$$

Em que:  $\sigma_3$  é a tensão confinante;  $k_1$  e  $k_2$  são as constantes de regressão do modelo.

Alternativamente, pode-se usar a soma das tensões principais ( $\theta$ ):

$$MR = k_1' \cdot \theta^{k_2'} \quad (3.5)$$

No caso da compressão triaxial  $\theta = \sigma_1 + 2\sigma_3 = \sigma_d + 3\sigma_3$ ;

Para solos argilosos, usa-se 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:

$$MR = k_1 \cdot \sigma_d^{k_2} \quad (3.6)$$

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

O Modelo composto 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:

$$MR = k_1 \cdot \sigma_3^{k_2} \cdot \sigma_d^{k_3} \quad (3.7)$$

Em que:  $\sigma_3$  é a tensão confinante;  $\sigma_d$  é a tensão desvio;  $k_1$ ,  $k_2$ ,  $k_3$  são as constantes de regressão do modelo.

Contudo, é importante frisar que não há modelos específicos para todos tipos de solos. Por se tratar de dados obtidos em ensaios laboratoriais é possível estatisticamente desenvolver diferentes modelos e equações (Medina & Motta, 2015).

Para a modelagem e tratamento dos resultados utilizou-se o software LABFit *Curve Fitting* – V.7.2.50.

- **Ensaio de determinação do módulo de resiliência – ensaio para misturas asfálticas.**

O ensaio realizado nos compósitos foi adaptado seguindo a referência normativa DNIT 135 (2018) que é equivalente à norma americana ASTM D 7369-11. De acordo com o exposto na norma brasileira, o módulo de resiliência de misturas asfálticas é regido pela expressão:

$$MR = \frac{\sigma_{\tau}}{\epsilon_{\tau}} \quad (3.8)$$

Em que:  $\sigma_{\tau}$  é a tensão tração;  $\epsilon_{\tau}$  é a deformação específica recuperável correspondente à tensão aplicada.

O equipamento utilizado é o mesmo do item anterior, mudando a montagem do equipamento. Para a determinação do módulo há aplicação de carga cíclica de forma *haversine* em uma frequência de 1 Hz (60 aplicações por minuto) e com duração de 0,1 s. Aplicou-se primeiramente um pré-condicionamento de 195 aplicações, seguido por cinco ciclos, nos quais realizavam-se as leituras dos dados efetivamente usados no cálculo do módulo. Para isso, considerou-se ainda um coeficiente de Poisson de 0,3. Na Figura 3.17 observa-se a montagem do ensaio:

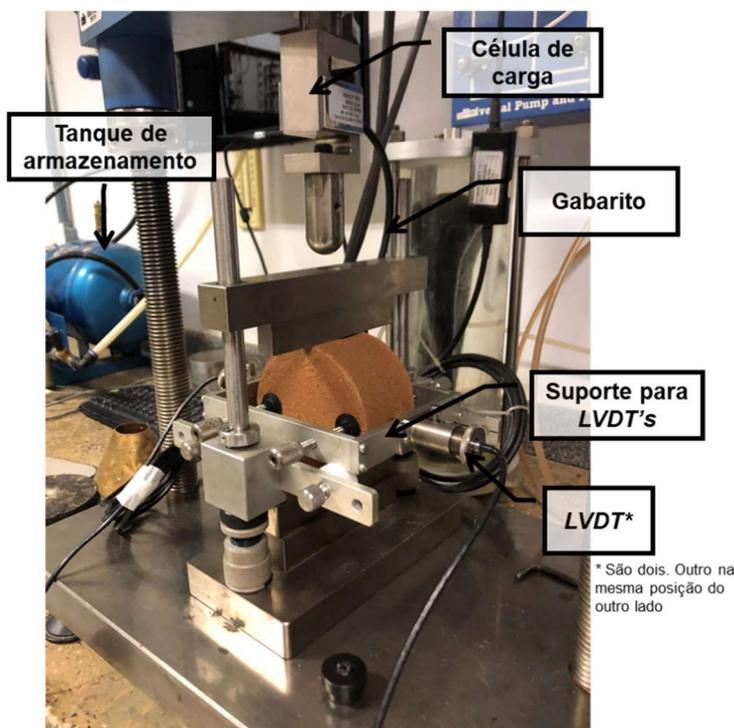


Figura 3.17. Método de montagem para determinação do MR para mistura asfáltica.

Os sensores de temperatura externo e interno são colocados em um corpo de prova similar ao utilizado e na lateral ao equipamento.

Além disso, salienta-se que o ensaio foi realizado três valores de carga vertical aplicada diametralmente no corpo de prova: 700, 1000 e 3000 N. Decidiu a utilização de três cargas para melhores comparações com diferentes misturas asfálticas, para conhecimento do comportamento do compósito, aplicando-o como revestimento, e para comparação dos valores.

### 3.2.1.7. Ensaio *Hamburg Wheel-Track* adaptado

Foram avaliados o desgaste e a deformação da amostra, simulando o tráfego, sob carga cíclica, avaliando a profundidade da deformação formada de acordo com as passagens repetidas de uma roda carregada a certa temperatura. Foi utilizado o equipamento DWT - *Double Wheel Tracker*, desenvolvido pela IPC global, *Controls Grup* e CVI TECH, representado na Figura 3.18.

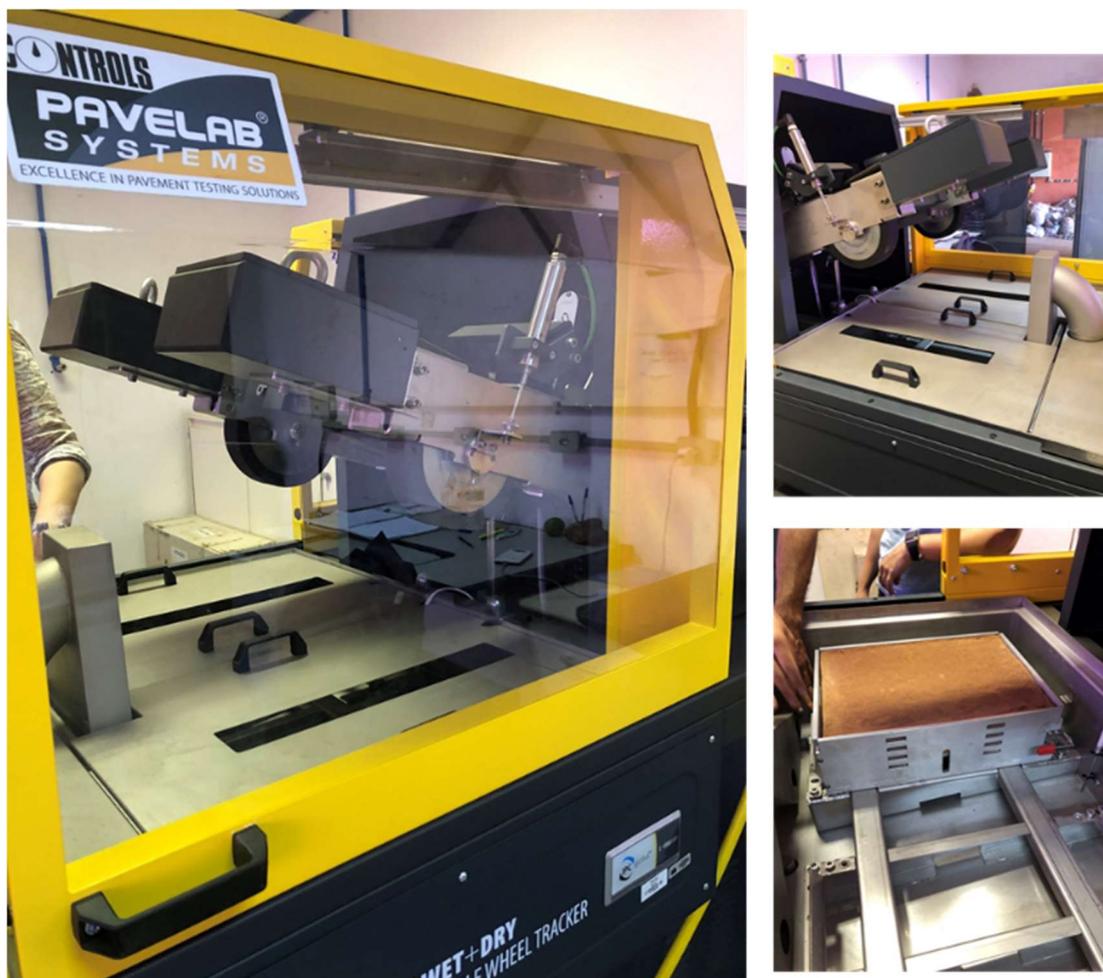


Figura 3.18. DWT - Double Wheel Tracker

O equipamento foi desenvolvido para a mensurar e avaliar a suscetibilidade que uma mistura betuminosa/asfáltica tem de se deformar sobre ação de uma carga repetida ao longo de passadas de uma roda a certa temperatura. O modelo do equipamento disponível no Infralab é o modelo universal o qual compila tanto a norma EN 12697-22 e quando a AASTHO T-324. As normas internacionais foram norteadoras para a execução e adaptação do ensaio para o referente compósito estudado. Não foi possível a realização do ensaio com o solo puro, por não se conseguir moldar uma placa em solo arenoso.

As normas internacionais norteadoras foram para buscar a melhor condição para adaptação do equipamento para o compósito. No Quadro 3.3 são estabelecidos os pontos das normas considerados relevantes para a pesquisa, e o que foi adotado de cada uma delas.

Quadro 3.3. Critérios das normas AASTHO T-324 e EN 12697-22 B.

<b>Critérios</b>	<b>AASTHO T-324</b>	<b>EN 12697-22 B</b>
Nº máximo de ciclos (critério de parada)	10.000	10.000
Nº de ciclos por minuto	26 ciclos/min	26,5 ciclos/min
Tipo de roda e dimensões	Metálica (aço)	Borracha
Diâmetro	203 mm	203 mm
Largura	47 mm	50 mm
Deformação máxima aceitável (critério de parada)	-	20 mm

Um ciclo equivale a duas passadas, ou seja, um vai e vem da roda. A carga de aplicação de cada roda varia de 700 a 1500 N, utilizou-se o menor valor, por se tratar da avaliação da deformação considerando a utilização como em estradas vicinais. O trilho de roda é 203 mm e o critério de parada para deformação máxima foi de 25 mm.

Realizou-se o ensaio com temperatura inicial de 26,0° C, que é o valor médio anual a região da APA - Jalapão em Tocantins. Contudo, ao longo do ensaio houve aumento da temperatura com aumento das passadas. O ensaio procedeu com as placas com contato ao ar para ambas dosagens estudadas.

### **3.2.1.8. Determinação do Dano por Umidade Induzida**

A realização do ensaio por dano por umidade induzida não seguiu orientações normativas, contudo foi realizado à luz da norma DNIT 180/2018. Inicialmente, o processo (Figura 3.19) se deu com os corpos de prova submersos por 48 horas com a água a temperatura

de 25°C, buscando saturá-los. Posteriormente, foram resfriados a uma temperatura de -8°C pelo mesmo período, dentro de sacos plásticos impermeáveis, contendo água em seu interior. O terceiro ponto foi colocar os conjuntos em banho maria em água à 60°C por 24 horas e depois conduzidos para um banho maria por mais 24h à uma temperatura de 25°C. Por fim, os corpos de prova foram retirados do banho maria, secados superficialmente e depois de 4 horas foram ensaiados.

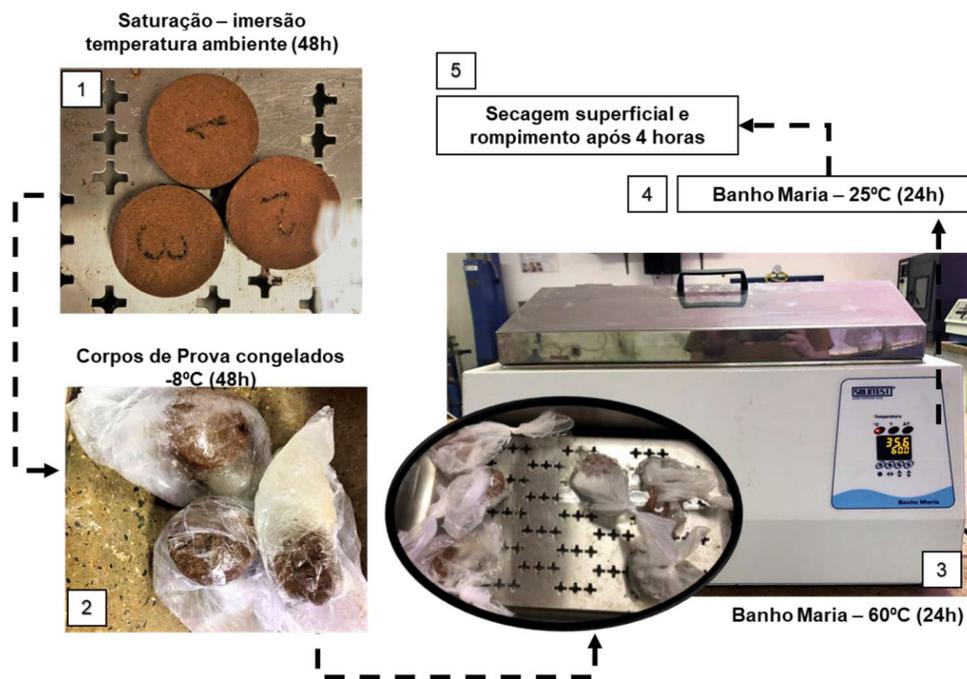


Figura 3.19. Método para realização do ensaio de dano por umidade induzida.

Por fim, a realização do ensaio de compressão a tração diametral com os dois conjuntos, que possuíam 3 corpos de prova, e realizada uma média das resistências com e sem condicionamento.

O ensaio de resistência à tração por compressão diametral foi realizado no laboratório do DER do Distrito Federal localizado no distrito rodoviário na região administrativa de Sobradinho, na BR-020. A velocidade de ensaio foi de 1,28 mm/minuto até a ruptura completa. Decidiu-se realização do ensaio com velocidade citada para seguir a mesma velocidade do ensaio compressão simples. Na Figura 3.20 mostram-se o equipamento utilizado e o corpo de prova já rompido.

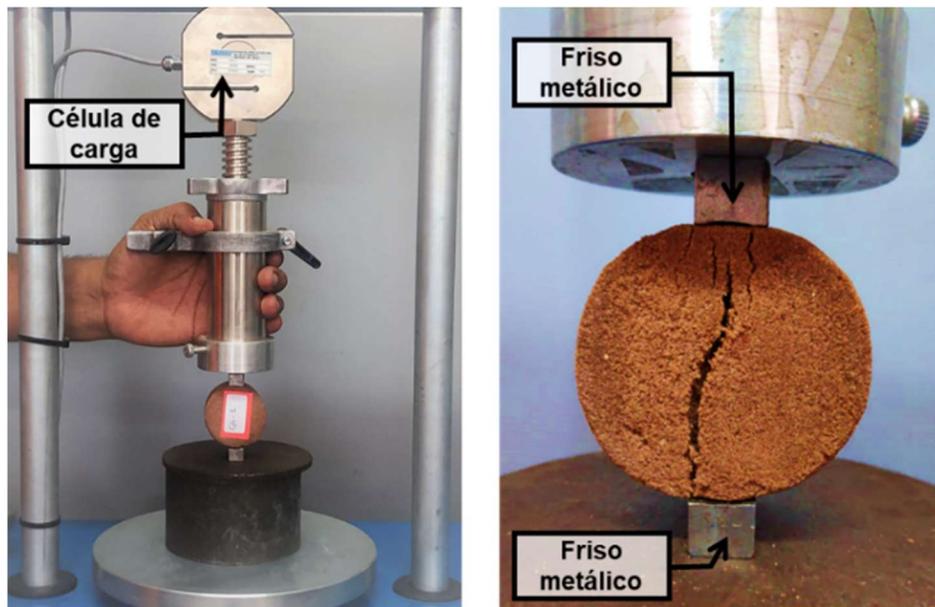


Figura 3.20. (1) Prensa utilizada para realização do ensaio; (2) Corpo de prova rompido após ensaio.

Definiu-se a utilização de corpos de prova com as dimensões aproximadas 3,3 cm de altura e 5 cm de diâmetro para que fosse mantido o mesmo padrão de compactação dos corpos de prova confeccionados para a determinação do MR para solo e para a determinação a resistência a compressão simples. O valor da resistência à tração por compressão diametral se deu utilizando a Equação 3.9.

É calculada a razão à tração retida (RTT) que consiste na razão entre o valor médio da resistência à tração por compressão diametral dos corpos de prova que passaram por condicionamento ( $RT_c$ ) e o valor médio da resistência à tração por compressão diametral dos corpos de prova que não passaram (RT), de acordo com a expressão:

$$RRT = \frac{RT_c}{RT} \cdot 100 \quad (3.10)$$

### 3.2.2. Caracterização Hidráulica

Nos itens subsequentes serão explicados os ensaios para a caracterização hidráulica, os quais são: determinação do coeficiente de permeabilidade, determinação da absorção de água, determinação da sucção total pelo método do psicrômetro.

### 3.2.2.1. Determinação do Coeficiente de Permeabilidade

- Permeômetro de Carga Constante

A determinação do coeficiente de permeabilidade do solo foi realizado de acordo com a norma NBR 13292 (ABNT, 1995) que especifica a metodologia para determinação do coeficiente de permeabilidade de solos granulares à carga constante. Na Figura 3.21 mostra-se os equipamentos utilizados para a realização do ensaio.

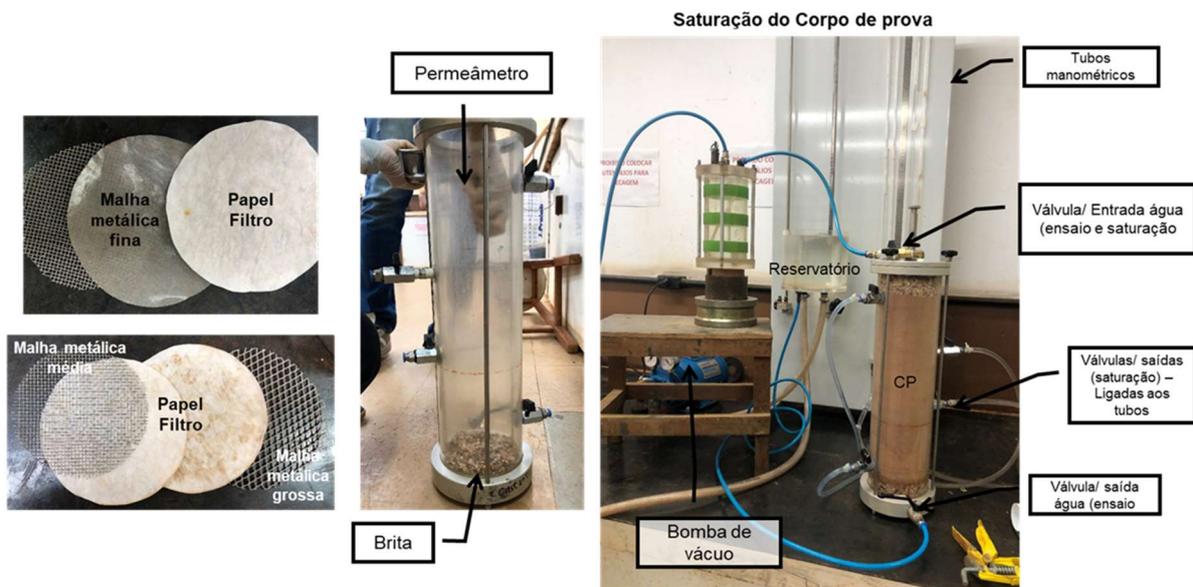


Figura 3.21. Materiais e métodos utilizados para determinação do coeficiente de permeabilidade do solo.

A primeira parte do ensaio consiste na saturação do corpo de prova. Posteriormente, de maneira suscita, o ensaio consta um reservatório em que o nível de água é mantido constante e assim permite-se a percolação da água para um mesmo volume e mede-se o tempo para completar o volume determinado. A cada 5 leituras para um determinado gradiente hidráulico ( $i$ ), aumenta-se a altura do reservatório em 0,5 cm, até a percepção da velocidade de percolação da água se tornar fluxo turbulento. Por visualmente essa percepção ser complexa, fez-se esse procedimento em um total de 10 vezes.

Para cada conjunto de 5 leituras (mesmo  $i$ ), calculou-se um coeficiente de permeabilidade médio ( $k_m$ ) – considerou a alteração da viscosidade da água pela alteração da temperatura. A média aritmética dos  $k_m$  resultou no coeficiente de permeabilidade do solo.

- Permeâmetro de Carga Variável

A determinação do coeficiente de permeabilidade do solo foi realizado de acordo com a norma NBR 14545 (ABNT, 2000) que especifica a metodologia para determinação do coeficiente de permeabilidade de solos argilosos à carga variável. Na Figura 3.22 estão representados os equipamentos utilizados para a realização do ensaio.

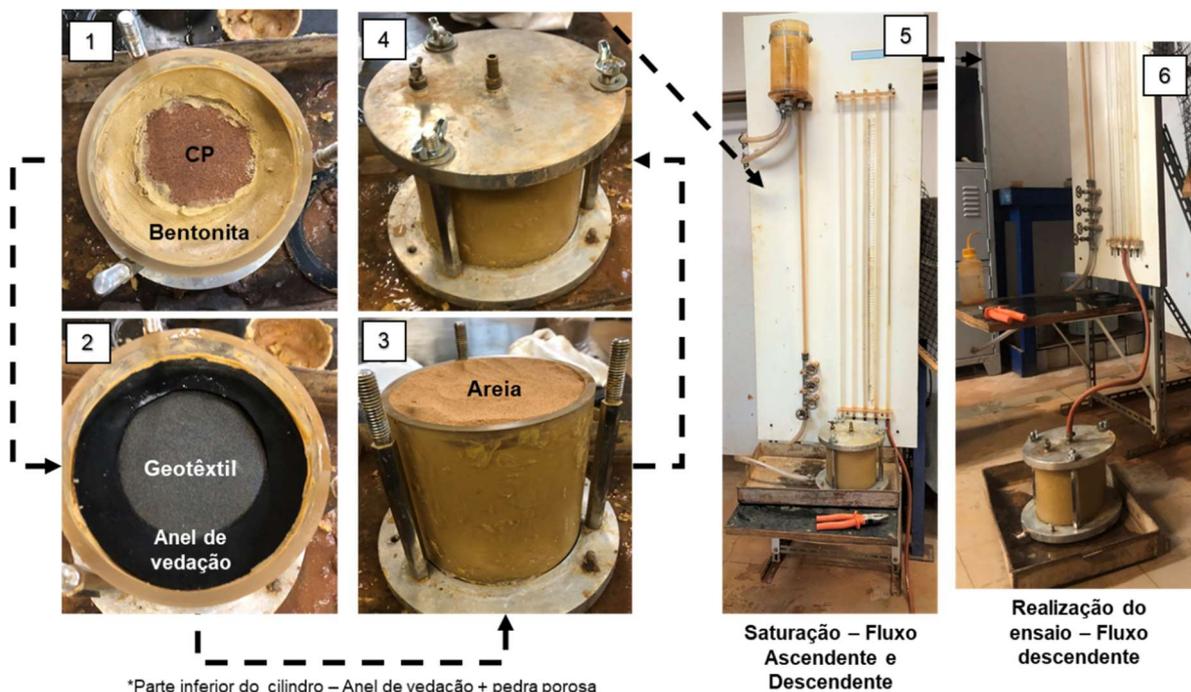


Figura 3.22. Materiais e métodos para a determinação do coeficiente de permeabilidade dos compósitos.

Como o corpo de prova foi preparado por compactação e curado ao ar por 15 dias a determinação por essa metodologia tornou-se mais precisa e correta para os compósitos. Houve a saturação por 2 dias, em fluxo ascendente e descendente.

Para a execução do ensaio de permeabilidade a carga variável em si, medem-se os valores  $h$  obtidos para diversos valores de tempo decorrido desde o início do ensaio. Foram anotados os valores da temperatura dada a efetuação de cada medida. O coeficiente de permeabilidade dos solos foi calculado fazendo-se uso da lei de Darcy e levando-se em conta que a vazão de água passando pelo solo é igual a vazão da água que passa pela bureta. Com o tratamento matemático necessário determina-se o coeficiente de permeabilidade ( $k$ ) pela expressão:

$$k = 2,3 \frac{aL}{A\Delta t} \log \frac{h_0}{h_1} \quad (3.11)$$

Em que:  $a$  é a área interna da bureta de vidro;  $L$  é a altura do corpo de prova;  $A$  é área inicial do corpo de prova;  $\Delta t$  é dado pela diferença entre instantes inicial e final;  $h_0$  é a altura no instante inicial;  $h_1$  altura no instante final.

Para cada conjunto de 10 leituras (até a diferença de tempo não se alterar significativamente) calculou-se um coeficiente de permeabilidade médio ( $k_m$ ) – considerou a alteração da viscosidade da água pela alteração da temperatura. A média aritmética dos  $k_m$  resultou no coeficiente de permeabilidade do solo.

### 3.2.2.2. Determinação da Absorção de Água

A determinação da absorção de água dos compósitos de seu seguindo a norma NBR 13555 (ABNT, 2012) cujo nome é solo-cimento – determinação da absorção de água. Os corpos de prova foram moldados e deixados em cura por 15 dias. Para a realização do ensaio medidos e pesados antes de serem submersos em água por 24 horas à temperatura ambiente. Após esse tempo retirou-os da imersão foram secados superficialmente com um pano úmido e pesados em seguida. Na Figura 3.23 demonstra-se a metodologia descrita.



Figura 3.23. Método para determinação da absorção de água dos compósitos.

A Absorção foi determinada pelo valor médio dos corpos de prova ensaiados e a pela expressão, em que  $m$  são as massas medidas em cada momento descrito:

$$A(\%) = \frac{m_{úmido} - m_{seco}}{m_{seco}} \times 100 \quad (3.12)$$

### 3.2.2.3. Determinação da Sucção Total

Realizou-se a avaliação de cargas de sucção com o uso do ensaio de psicrômetro (WP4C), o qual determina o valor da sucção total, conforme a ASTM D6836. Há a determinação das cargas de sucção com base na lei psicométrica, segundo a qual a sucção da água do solo em equilíbrio com o ambiente está relacionada termodinamicamente à umidade relativa do ar (Fredlung & Rahardjo, 1993). O equipamento reconhece valores de sucção total de 0 a 300 MPa, ou seja, maiores valores de sucção associados a menores umidades. O equipamento e seus acessórios estão representados na Figura 3.24.

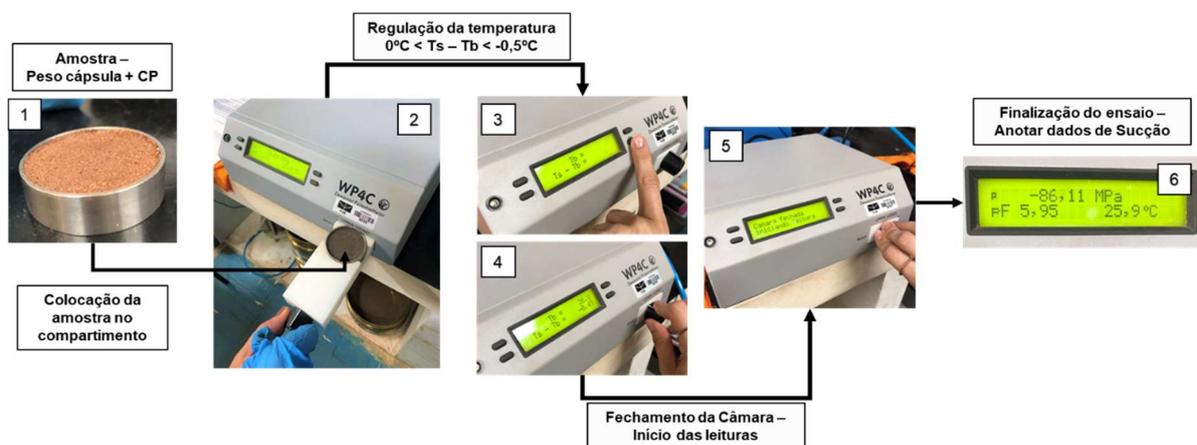


Figura 3.24. Materiais e métodos utilizados para determinação da sucção total.

O ensaio ocorreu com duas medidas diárias, uma por volta das 9 horas da manhã e outra leitura no período noturno, por volta de 18h. As leituras ocorreram com ambos compósitos e com solo arenoso todos com 10% de umidade. O intuito do ensaio não era a obtenção da curva característica do material, mas sim o entendimento, ao longo do tempo, do acréscimo da sucção com o avanço da cura do compósito.

### 3.2.3. Caracterização Químico-Ambiental-Mineralógica

Nos itens subsequentes serão explicados os ensaios realizados para a caracterização químico-ambiental-mineralógica, os quais são: DRX, EDX, análise elementar CHN e análise do lixiviado.

### **3.2.3.1. Difração de Raios-X (DRX)**

A difração de Raios X (DRX) foi feita no Laboratório de Difractometria de Raios X no Instituto de Geociências da Universidade de Brasília (IG - UnB). O equipamento utilizado foi o *X-Ray Diffractometer Ultima IV* da *Rigaku*.

Pelo DRX permite-se a identificação mineral por meio de da caracterização de sua estrutura cristalina. Foi realizado com o material passante na peneira #200, tanto com o solo arenoso quanto com os compósitos.

### **3.2.3.2. Espectrometria de Florescência de Raios X (XRF/EDX)**

O ensaio de Espectrometria de Florescência de Raios X foi realizado a Central Analítica do Instituto de Química da UnB (CAIQ). O equipamento utilizado foi o Espectrômetro de Florescência de Raio X por Energia Dispersiva EDX-720 *Shimadzu*. O equipamento faz uma determinação quantitativa e qualitativa dos elementos presentes na amostra analisada, foi realizado para o polímero puro e para os compósitos para ambas dosagens.

### **3.2.3.3. Análise Elementar CHN**

A análise elementar CNH (Carbono, Nitrogênio e Hidrogênio) foi realizada na Central Analítica do Instituto de Química da UnB (CAIQ). O equipamento utilizado foi o analisador elementar CHNS da *Perkin Elmer* modelo EA 2400 série II.

Esse equipamento determina a pureza de um composto de coordenação. O princípio da técnica é baseado na combustão de uma amostra em altas temperaturas (~900°C) na presença de oxigênio. Por meio de da detecção de gases resultantes da decomposição do composto, o percentual em massa dos elementos C, H e N são obtidos, realizado para o polímero puro.

### 3.2.3.4. Análise Química do Lixiviado

A análise do lixiviado foi realizada na Central Analítica da Universidade Católica de Brasília (UCB) e no laboratório de águas da UCB. Realizou análises de DQO, benzeno, manganês, nitrogênio, ferro e alumínio. A coleta do lixiviado se deu por corpos de prova com 15 dias de cura serem imersos em água destilada por 7 dias. Após esse período coletou-se esse lixiviado e encaminhado para a análise (Figura 3.25).

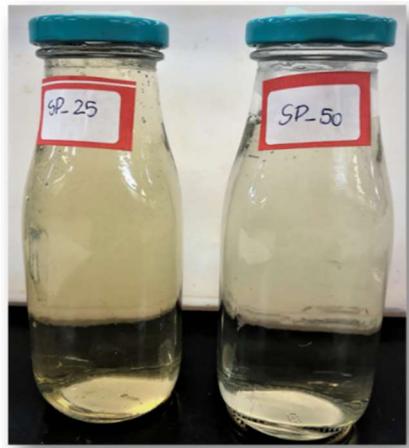


Figura 3.25. Lixiviado coletado.

Analisando o lixiviado dos compósitos como um efluente que será lançado a um corpo hídrico receptor deve-se considerar três resoluções do conselho nacional do meio ambiente (CONAMA) e uma norma brasileira da ABNT:

- Resolução CONAMA nº 420/2009 - Dispõe sobre critérios e valores orientadores e qualidade do solo quanto à presença de substâncias químicas e estabelece diretrizes para o gerenciamento ambiental de áreas contaminadas por essas substâncias em decorrência de atividades antrópicas. Desta Resolução foi retirado o valor orientador de investigação para água subterrânea.
- Resolução CONAMA nº 430/2009 - Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes;
- A norma NBR 10004/2004 – Resíduos Sólidos. Em seu anexo F (normativo) determina a concentração dos limites máximos obtidos no ensaio de lixiviação. O Laboratório realizou o ensaio de lixiviação de acordo com a norma NBR 10.005 (ABNT, 2004)

### 3.2.4. Caracterização Microestrutural

Nos itens subsequentes serão explicados os ensaios realizados para a caracterização microestrutural, os quais são: microscopia ótica, MEV e EDS.

#### 3.2.4.1. Microscopia Óptica

Os microscópios ópticos são instrumentos que fazem uso da refração da luz em lentes para ampliar e enquadrar os elementos em análise, permitindo a observação de estruturas que não são visíveis a olho nu. As imagens foram coletadas com o uso microscópio eletrônico modelo SLQ-M-003 (Figura 3.26)

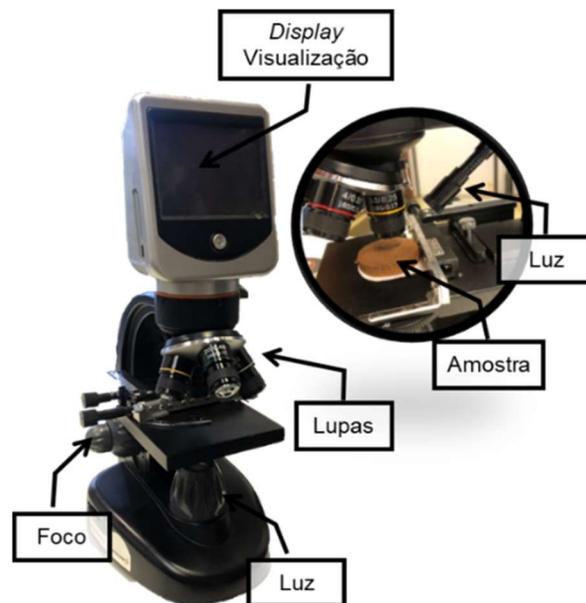


Figura 3.26. Lupa eletrônica modelo SLQ-M-003.

#### 3.2.4.2. Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

Os microscópios eletrônicos de varredura (MEV) utiliza feixes de elétrons ao invés de fótons, que os microscópicos 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 SG-9 no departamento de Engenharia Mecânica da UnB, no Laboratório de Metalografia/ENM. 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 3.27).



Figura 3.27. Amostras metalizadas.

### 3.2.4.3. Espectroscopia por Dispersão de Energia (EDS)

Ao MEV pode ser acoplado o sistema de EDS (*Energy Dispersive System*), técnica analítica usada para caracterização química de uma amostra que permite a determinação da composição qualitativa e semi-quantitativa das amostras. Neste método, um feixe de elétrons é focalizado sobre a amostra no MEV, interagindo com os átomos presentes e liberando energia na forma de raios-X. Logo, após a análise qualitativa da microestrutura dos grãos de solo, foi então feita a determinação semi-quantitativa da composição química (Dedavid *et al.*, 2007).

## RESULTADOS E ANÁLISES

Nesta seção serão apresentados os resultados dos ensaios realizados juntamente com a discussão e análises dos dados obtidos.

### 4.1. Resultados para o Solo do Jalapão

Buscou-se obter os valores para os limites de Attemberg, contudo não foi possível, desse modo o solo é classificado como um solo não plástico (NP). O solo possui massa específica de  $2,7 \text{ g/cm}^3$ . Analisando a curva granulométrica do solo (Figura 4.1) de acordo com a classificação HRB adotada pela AASHTO corresponde a como um solo tipo A-3. Avaliando pela classificação SUCS para solos granulares podemos classificar como um solo SP.

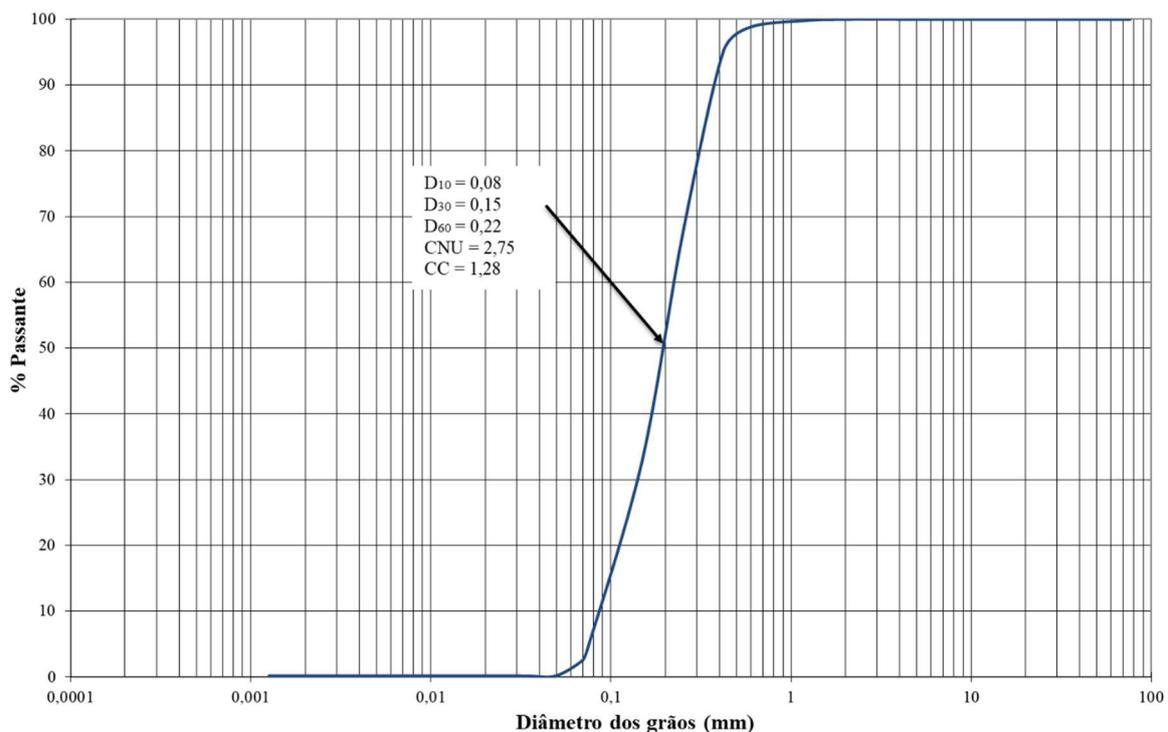


Figura 4.1. Curva Granulométrica do solo estudado.

## 4.2. Caracterização Mecânica

A caracterização mecânica se deu por meio dos ensaios de: compactação, resistência à compressão não confinada, cisalhamento direto, ensaio de triaxial cíclico (determinação do módulo de resiliência indicado para solos e para misturas asfálticas), resistência à tração por compressão diametral, ensaio de *Hamburg Wheel-Track* (simulador de tráfego laboratorial) e dano por umidade induzida.

### 4.2.1. Compactação

Nas Figuras Figura 4.2 e Figura 4.3 apresentam-se as curvas de compactações para energia normal e energia intermediária respectivamente.

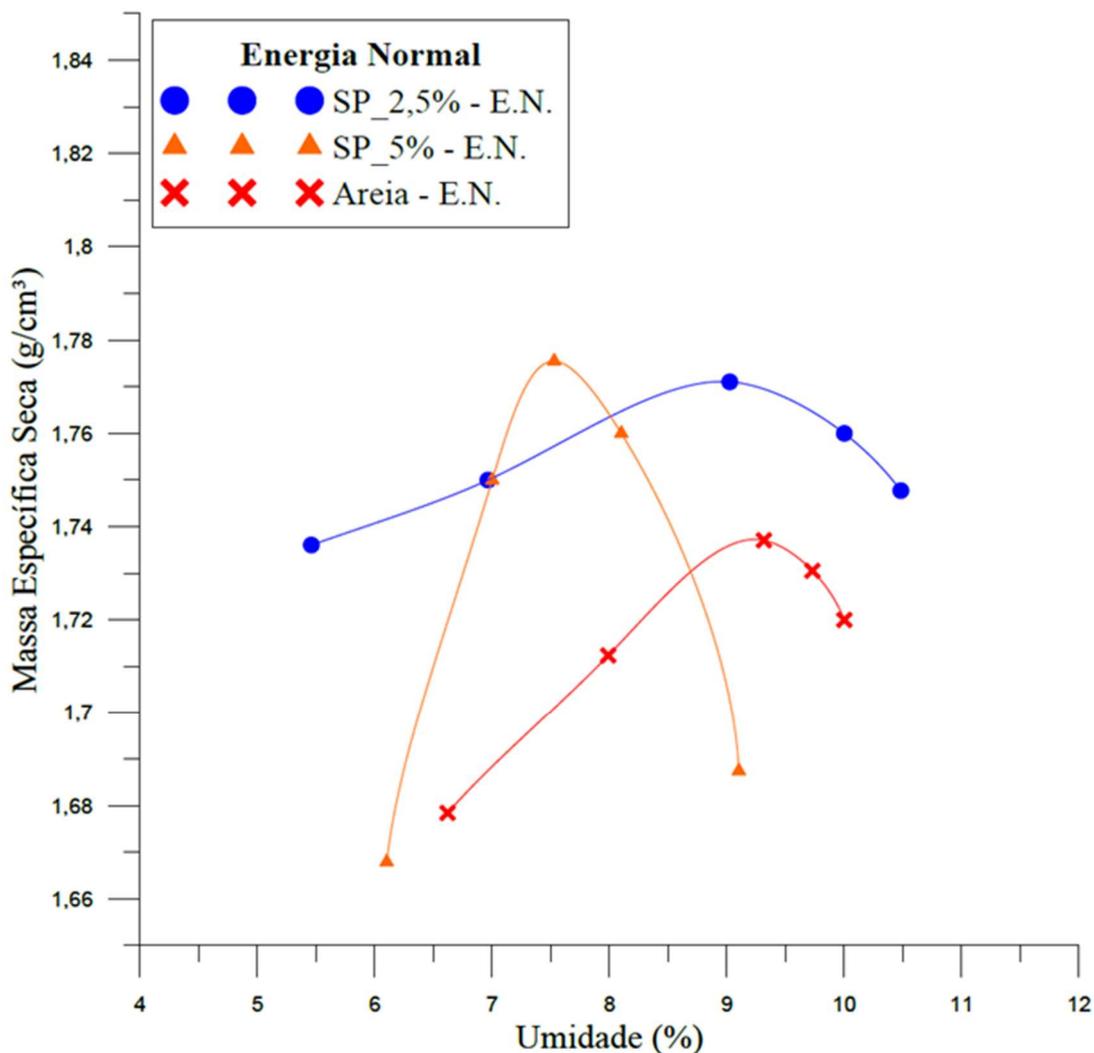


Figura 4.2. Curvas de compactação com energia normal, solo e compósitos.

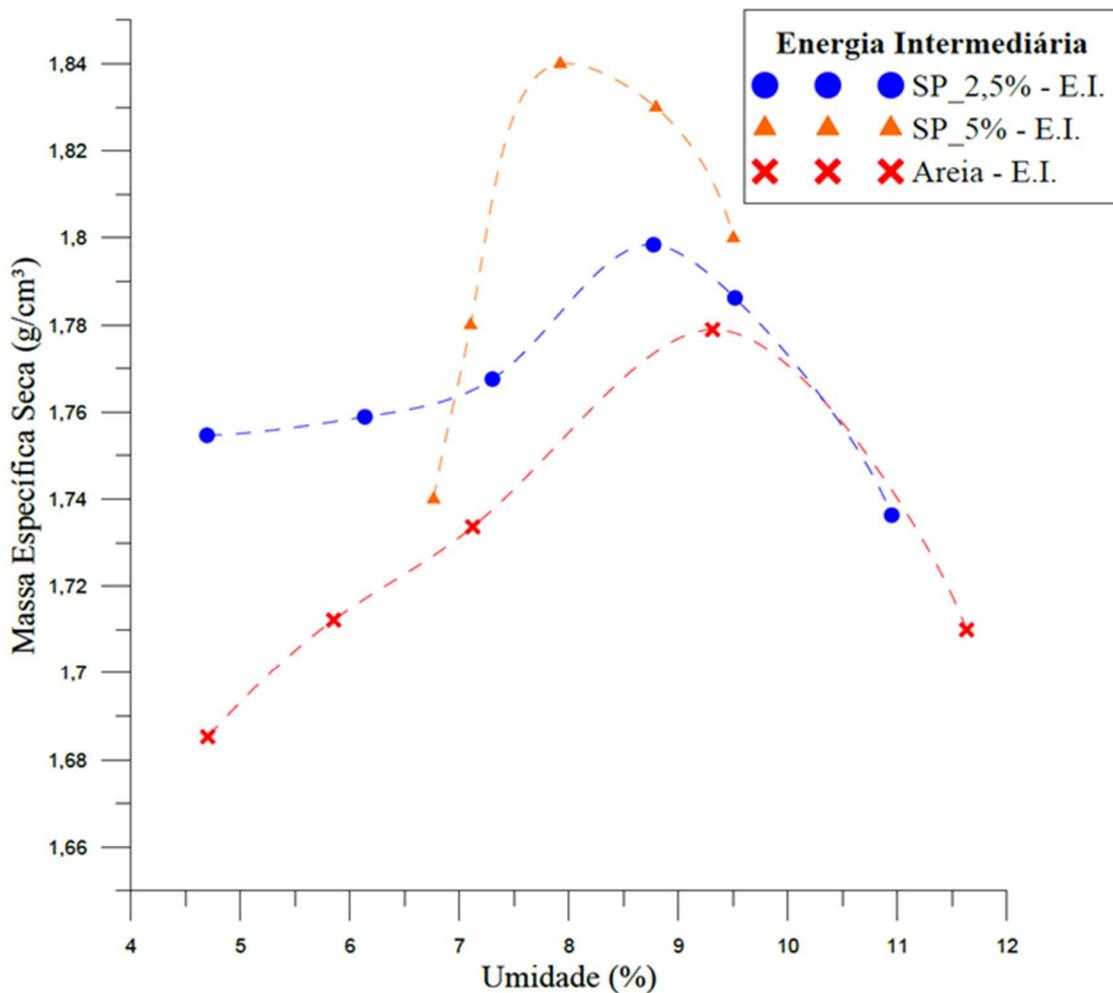


Figura 4.3. Curvas de compactação com energia intermediária, solo e compósitos.

É possível observar que há alteração do comportamento das curvas de acordo com a alteração da energia de compactação aplicada. Percebe-se que há alteração da umidade ótima e massa específica seca máxima.

Analisando as curvas com adição do polímero ressalta-se mudança do formato das curvas. Para ambas energias, a curva com 2,5% tem um comportamento suavizado e aberta quando comparado com as curvas com 5% de polímero. Contudo, para 2,5% observa-se um comportamento menos suavizado na curva com maior energia aplicada.

Já nas curvas de 5%, há um comportamento similar a curvas da literatura usuais de argilas. Essas curvas têm as características de serem mais fechadas e simétricas, e possuindo maiores valores de massa específica seca para menores umidades.

Contudo, para todas as curvas, pode-se afirmar que a diferença de umidade ótima não é tão significativa, tanto para a alteração de energias, quanto para a alteração de adição de

polímero. Dessa maneira, as alterações no eixo y são mais significativas, ou seja, no deslocamento dos pontos no eixo referente à massa específica seca. Para a energia intermediária, as curvas apresentam maiores massas específicas secas máximas, ao se adicionar a solução polimérica isso tornou-se ainda mais evidente.

Apesar da compactação em Proctor para solos com alta porcentagem de material arenoso não ser usual, buscou-se realizar para um melhor comparativo. A compactação do solo se deu como especificado em norma com adição de água a cada ponto. Observa-se o aumento da massa específica máxima com aumento da energia, mas não se percebe alterações significativas da umidade ótima.

No quesito umidade o uso do polímero se torna interessante. Primeiramente, por já existir uma redução da quantidade de água utilizada, por se tratar de adição de uma solução (água + polímero). O segundo ponto é a própria alteração da energia, em que já se observa uma redução da umidade ótima ao aumentar a energia aplicada. Somando isso à adição do polímero há uma maior umectação dos grãos e união deles, diminuindo a umidade e aumentando a massa específica, de acordo com o aumento da solução na compactação.

Contudo, o que se torna mais interessante analisar é a alteração tão nítida do formato das curvas de compactação com o acréscimo de polímero. Essa alteração de formato torna-se mais um elemento que corrobora com os resultados que ainda serão apresentados. Pois, em um primeiro momento, verifica-se essa alteração da curva com a adição de polímero verifica-se a mudança da curva (e assim comportamento) de um solo típico arenoso para um solo com comportamento coesivo.

#### **4.2.2. Ensaio de Resistência à Compressão Não Confinada**

Na Tabela 4.1 são representados os valor de resistência à compressão não confinada para os compósitos SP\_2,5% para respectivos dias de cura.

Tabela 4.1. Resultados de RCS para 2,5% de polímero em diferentes tempos de cura.

Valores referentes ao pico	RCS (kPa)	RCS (MPa)
SP_2,5% (1º Dia)	123,42	0,12
SP_2,5% (2º Dia)	642,11	0,64
SP_2,5% (4º Dia)	1208,89	1,21
SP_2,5% (7º Dia)	1221,29	1,21
SP_2,5% (15º Dia)	1238,45	1,24
SP_2,5% (30º Dia)	1291,21	1,29
SP_2,5% (45º Dia)	1452,36	1,45

Não foi possível a execução do ensaio com o solo sem melhoramento. Contudo, nas Tabela 4.1 e Tabela 4.2 mostram-se que para ambas dosagens com um dia de cura houve possibilidade da realização do ensaio para determinação do valor de RCS. Assim, apesar do material ainda úmido, o compósito com um dia de cura já concedia ao substrato um RCS significativo.

Usando RCS da amostra SP\_2,5% (1º dia) como o valor base de comparação para os outros tempos de cura pode-se observar um aumento de 400% para SP\_2,5% (2ºDia) e de 900% para a amostra SP\_2,5 (4º Dia), dos valores de pico. Após o 4º dia de cura o incremento de resistência não foi tão significativo, percebe-se certa estabilização do 4º ao 30º dia de cura. Porém, no 45º dia de cura verifica-se um valor de RCS 12% maior que o valor encontrado com 30º de cura. Entretanto, pode-se afirmar que para 2,5% de polímero há uma estabilização de RCS a partir de 4º dia.

Contudo, apesar de se verificar essa estabilização entre os valores de RCS as curvas possuem formatos diferente ao longo do aumento do tempo de cura. Apesar dos valores de pico a partir do 4º dia de cura não sofrerem tanta alteração até 15º dia de cura, percebe-se uma mudança na rigidez do material. Verifica-se tal aumento de rigidez, pelo gráfico, que a partir do 7º dia de cura, pelas curvas estarem cada vez mais próximas do eixo vertical, resistência à compressão simples. Na Figura 4.4 estão representadas as curvas obtidas para os diferentes tempos de cura.

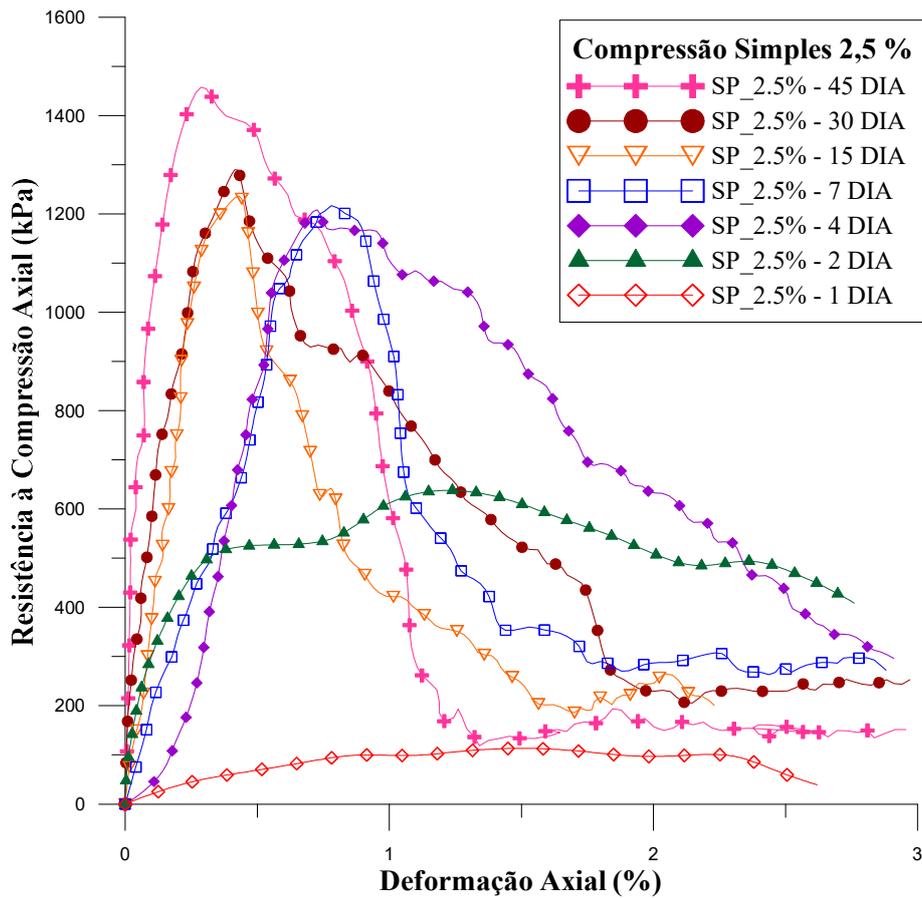


Figura 4.4. Curvas RCS x Def. Axial, de acordo com o tempo de cura e para 2,5% de polímero.

Nas Figura 4.5(a – c) mostram-se os corpos de prova após o ensaio de compressão simples, para as amostras SP\_2,5%, com 1, 2 e 4 dias de curas, respectivamente. Nas Figura 4.6(a – d) mostram-se os corpos de prova após o ensaio de compressão simples, para as amostras SP\_2,5%, com 7, 15, 30 e 4 dias de curas, respectivamente.

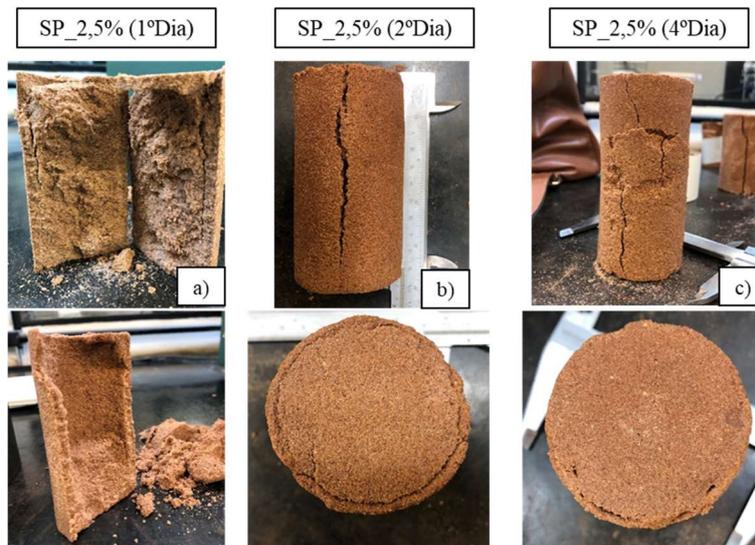


Figura 4.5. (a) SP\_2,5% (1 dia de cura) após ruptura; (b) SP\_2,5% (2 dias de cura) após ruptura; (c) SP\_2,5% (4 dias de cura) após ruptura

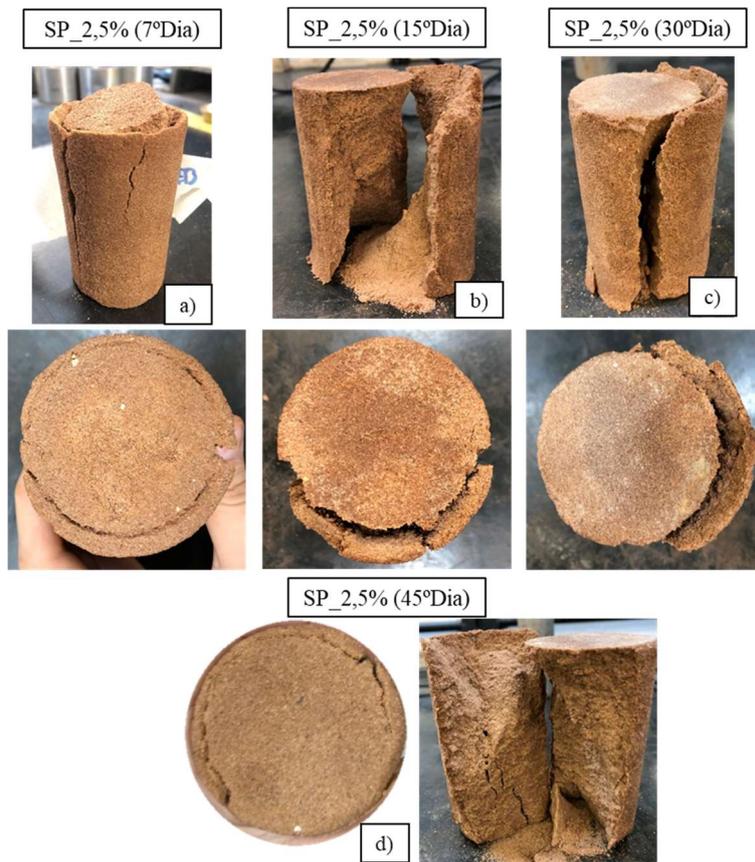


Figura 4.6. (a) SP\_2,5% (7 dias de cura) após ruptura; (b) SP\_2,5% (15 dias de cura) após ruptura; (c) SP\_2,5% (30 dias de cura) após ruptura; (d) SP\_2,5% (45 dias de cura) após ruptura.

Na Tabela 4.2 apresentam-se os valores de resistência à compressão não confinada para os compósitos SP\_5%, para respectivos dias de cura.

Tabela 4.2. Resultados de RCS para 5% de polímero em diferentes tempos de cura.

Valores referentes ao pico	RCS (kPa)	RCS (MPa)
SP_5% (1º Dia)	474,12	0,47
SP_5% (2º Dia)	657,99	0,66
SP_5% (4º Dia)	1621,47	1,62
SP_5% (7º Dia)	2927,07	2,93
SP_5% (15º Dia)	3223,49	3,22
SP_5% (30º Dia)	4176,37	4,18
SP_5% (45º Dia)	4265,13	4,27

Com o aumento da dosagem de solução polimérica para os valores de RCS verifica-se que, para a amostra SP\_5% (1º dia), há um aumento significativo quando comparado com o valor de RCS da amostra SP\_2,5% (1º dia), aproximadamente 290%. Entretanto, para os valores referentes para 2 dias de cura não há uma diferença significativa, apenas 0,02 MPa entre ambos compósitos. Foi observado que até o 2º dia de cura os corpos de provas estão pouco

úmidos no seu interior, e com maior rigidez na parte externa (o mesmo foi observado no ensaio de cisalhamento direto).

As curvas de compressão simples para as amostras de SP\_5% possuem um comportamento similar (Figura 4.7), não se observa um valor de pico expressivo, como para a outra dosagem. Nas Figura 4.8(a – g) apresentam-se os corpos de prova após o ensaio de compressão simples para as amostras SP\_5%.

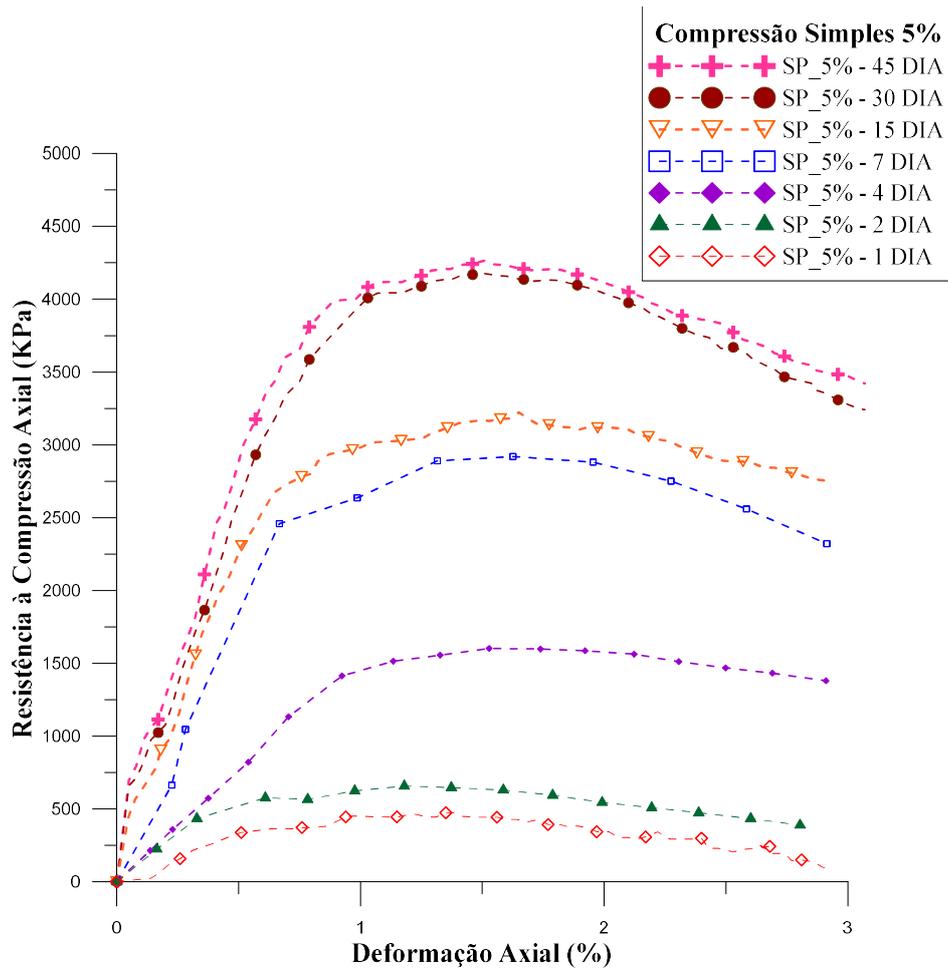


Figura 4.7. Curvas RCS x Def. Axial, de acordo com o tempo de cura e para 5% de polímero.

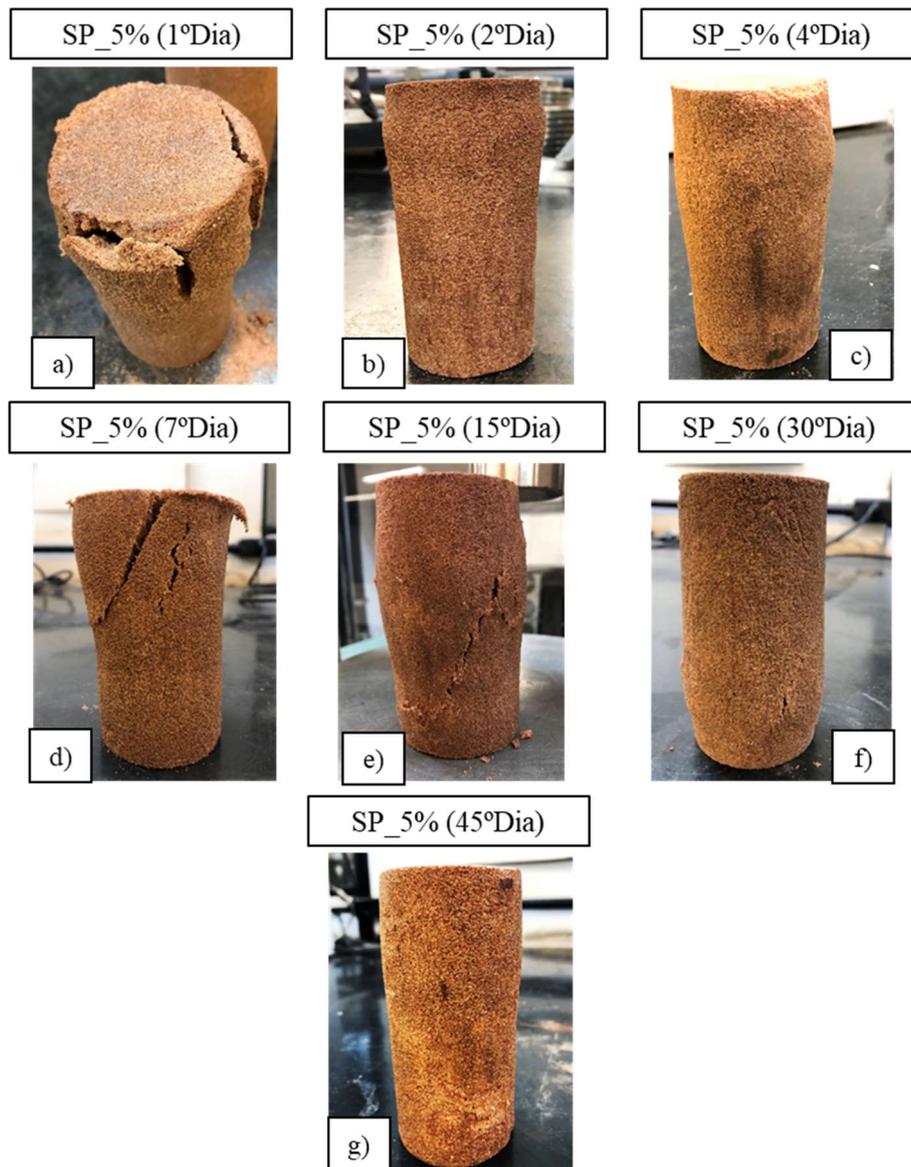


Figura 4.8. (a) SP\_5% (1 dia de cura) após ruptura; (b) SP\_5% (2 dias de cura) após ruptura; (c) SP\_5% (4 dias de cura) após ruptura; (d) SP\_5% (7 dias de cura) após ruptura; (e) SP\_5% (15 dias de cura) após ruptura; (f) SP\_5% (30 dias de cura) após ruptura; (g) SP\_5% (45 dias de cura) após ruptura.

Quando se faz a relação RCS x tempo de cura, para ambos compósitos, representada na Figura 4.9, observou-se uma estabilização do valor de RCS a partir do 4º dia de cura para as amostras SP\_2,5% o que não ocorreu para as amostras de SP\_5%. A estabilização do RCS para SP\_5% ocorreu entre o 30º e o 45º dias de cura. Todavia, a amostra SP\_5% (4º Dia) possui o valor de RCS superior ao último dia de cura, para a menor dosagem.

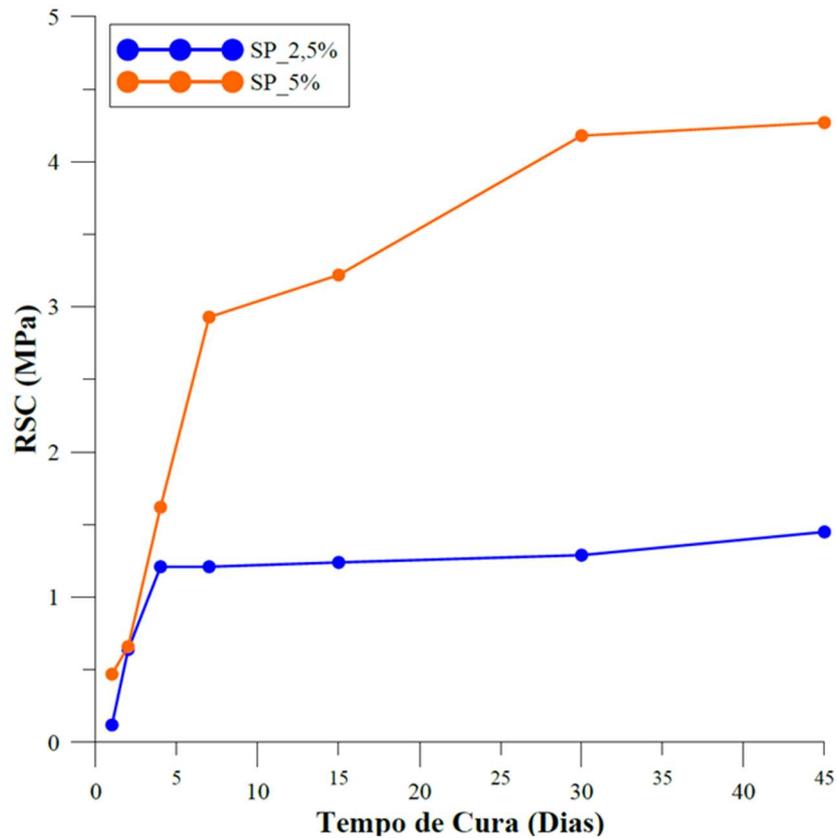


Figura 4.9. Valor RCS por tempo de cura.

Os valores RCS para os compósitos, no 45º dia, para ambas dosagens tiveram um bom comportamento, tendo em vista, o solo que foi utilizado e os valores abordados no item 2.1.2. Utilizando a RCS com 30 dias de cura SP\_5% atingiu um valor consideravelmente alto no âmbito da resistência e SP\_2,5% apesar de, aproximadamente, 3 vezes menor, também apresentou bom valor de resistência. Contudo, de acordo com DNIT (2006) solo-cal para aplicação rodoviária deve ter 3,4 MPa de RCS com 28 dias de cura. Já DNIT (2010) diz que um solo-cimento para aplicação rodoviária como base de revestimento deve ter 2,1 MPa ao 7º dia de cura. SP\_5% atingiu ambos valores para os dias citados.

### 4.2.3. Ensaio de Cisalhamento Direto

Na Figura 4.10 apresentam-se as curvas tensão de cisalhamento por deslocamento horizontal para o solo com adição de água (valor da umidade ótima para energia normal) para aplicação das tensões normais de 50 kPa, 100 kPa, 200 kPa e 400 kPa. Na Figura 4.11 são representadas as curvas tensão de cisalhamento por deslocamento horizontal para cada tempo de cura e para aplicação das tensões normais para 2,5 % de polímero.

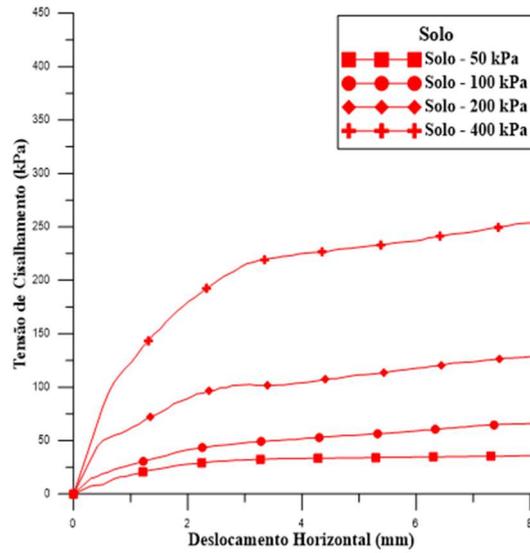
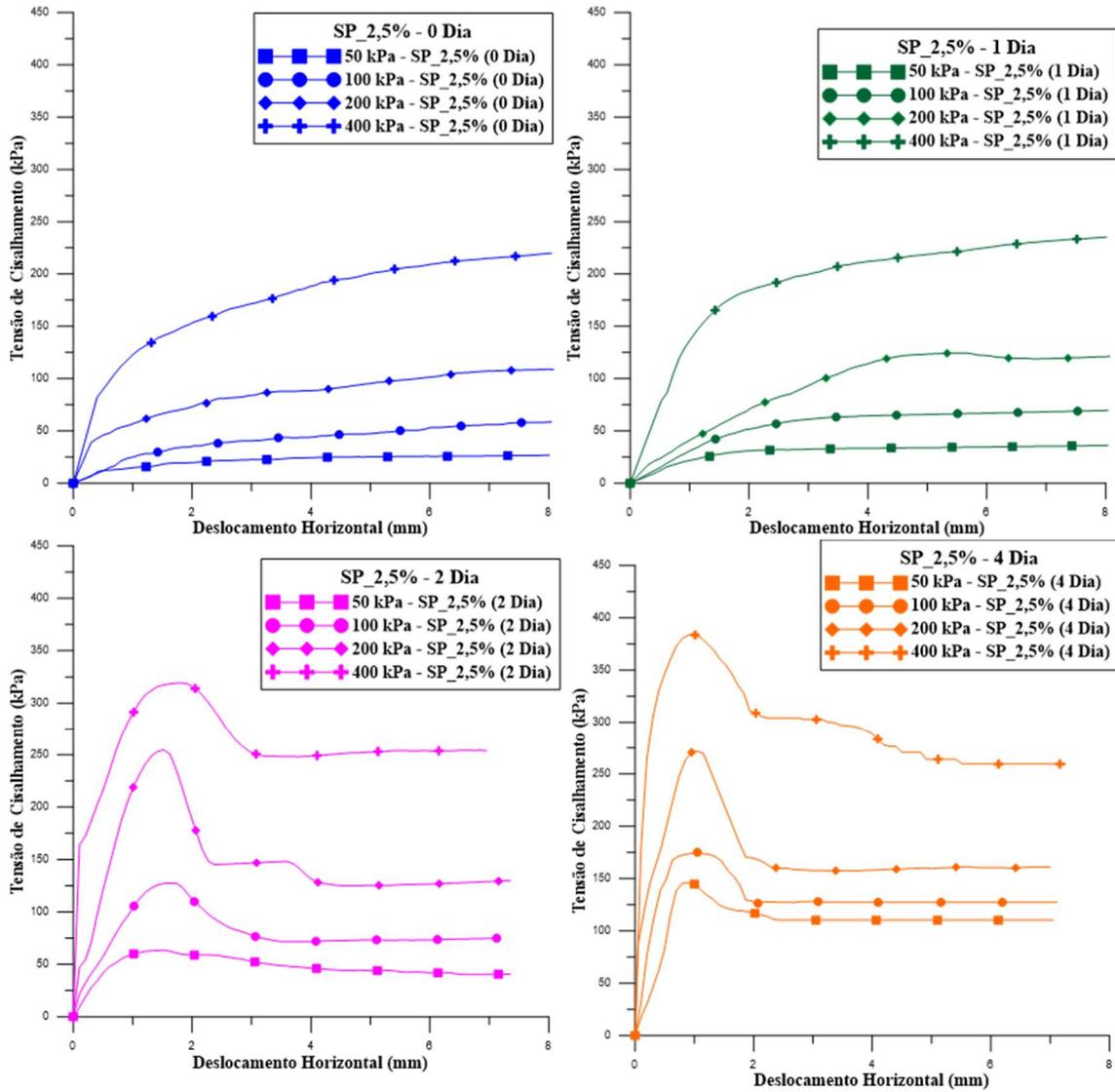


Figura 4.10. Curvas tensão de cisalhamento por deformação horizontal para o solo com adição de água para tensões normais de 50 kPa, 100 kPa, 200 kPa e 400 kPa.



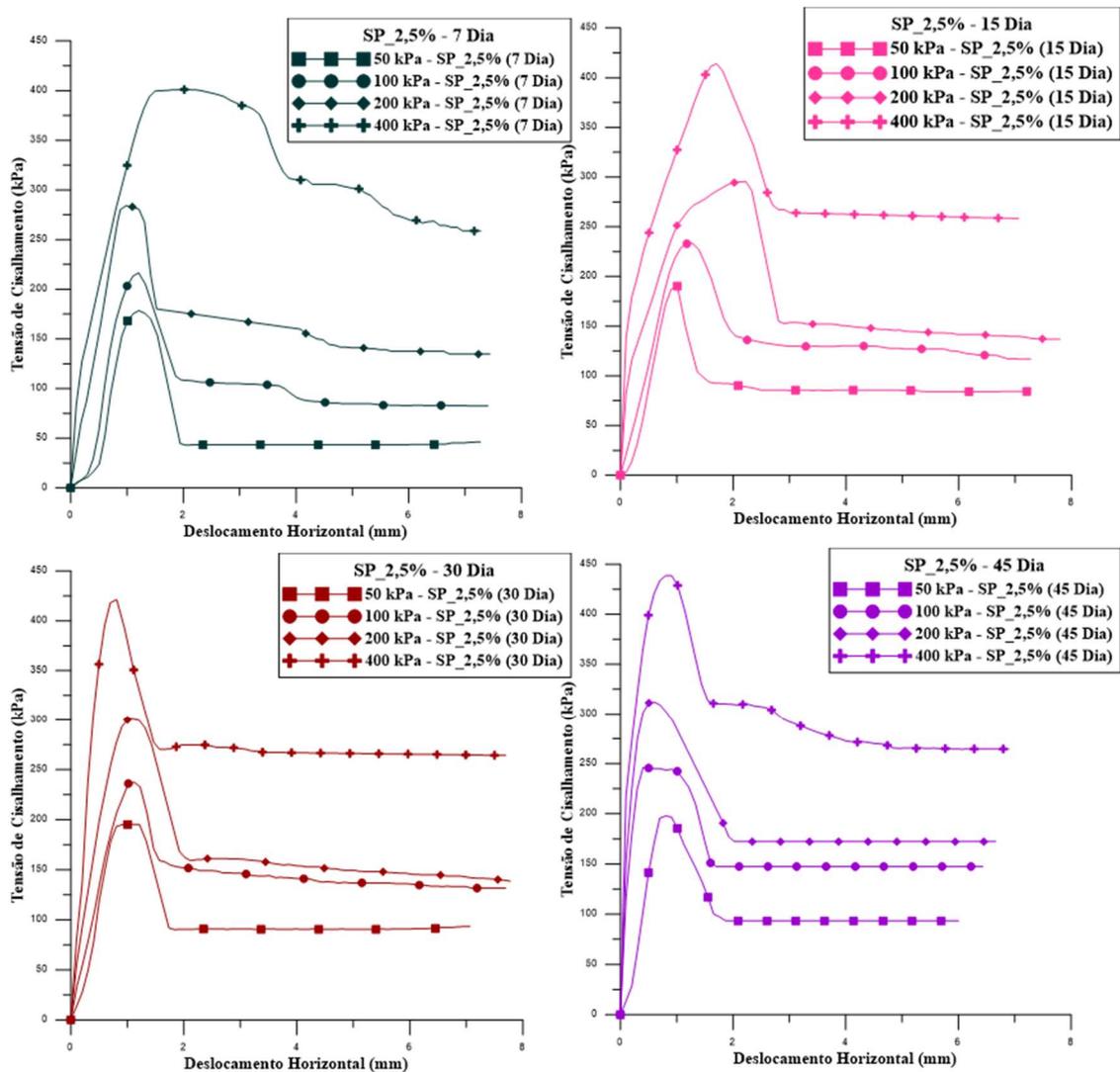


Figura 4.11. Curvas tensão de cisalhamento por deformação horizontal para cada tempo de cura e para aplicação das tensões normais de 50 kPa, 100 kPa, 200 kPa e 400 kPa para 2,5 % de polímero.

Percebe-se a influência do tempo da cura nos compósitos. As curvas de cisalhamento de 0 e 1 dia de cura apresentam um formato similar ao solo. Esse comportamento sendo típico de um solo arenoso, sem se observar um pico evidente com uma curva com comportamento assintótico.

Com o aumento do tempo de cura começa a se observar os picos de resistência, sendo esse pico cada vez mais evidente e acentuado com o aumento do tempo de cura.

Durante a realização do ensaio de cisalhamento direto, quando se adiciona o polímero, há uma redução de ambos parâmetros de resistência: intercepto coesivo e ângulo de atrito. O solo ao se misturar com a solução polimérica possui um comportamento inicialmente pastoso, o que reduz tanto o imbricamento dos grãos quanto a cimentação que levará a redução do intercepto coesivo. Na Figura 4.12 mostra-se um dos corpos de prova após o ensaio.



Figura 4.12. SP\_2,5% sem cura, após ruptura.

Analisando os resultados da amostra SP\_2,5% (1º dia) verifica-se um aumento do intercepto coesivo, por já existir um endurecimento da camada externa do corpo de prova, contudo internamente ainda estava úmido. A cura se dá de fora para dentro, ou seja, maior cura com o contato do corpo de prova com o ar. Por essa razão, associa-se um menor ângulo de atrito quando comparado com o solo puro. Na Figura 4.13 mostra-se um dos corpos de prova após o ensaio.



Figura 4.13. SP\_2,5% 1 dia de cura, interior úmido e capinha seca.

Entretanto, a partir do segundo dia de cura, há o aumento de ambos parâmetros de resistência. E esse fato se relaciona por existir aumento de rigidez do interior dos corpos de

prova após 48 horas. Dessa maneira, a cura começa a avançar para o interior do corpo de prova, a fixação do polímero nos grãos começa a se acentuar, aumentando a cimentação dos grãos. A Figura 4.14 mostra um corpo de prova com dois dias após o ensaio, e é nítida a visualização da secagem na imagem pela alteração de cores. Contudo, se torna possível verificar a presença de grãos soltos no interior do corpo de prova, sendo uma das razões para o aumento do teor de polímero no decorrer da pesquisa.



Figura 4.14. SP\_2,5% 2 dias de cura, após ruptura.

Há um aumento de mais de 200% no valor de intercepto coesivo para a amostra com 4 dias de cura quando comparado com 2 dias de cura, atestando-se que a cura é fundamental para o incremento das características do solo. O ângulo de atrito elevou-se, contudo ainda em valores dentro do encontrado na literatura para solos arenosos. Na Figura 4.15 é possível ver que não há mais partes úmidas internamente do corpo de prova, e a ruptura do corpo de prova.



Figura 4.15. SP\_2,5% 4 dias de dia, após ruptura.

Para os maiores tempos de cura, percebeu-se um incremento do valor do intercepto coesivo e pouca a nenhuma alteração do ângulo de atrito. Dessa maneira, pode-se dizer que apesar de existir um aumento dos valores encontrados, a partir do 7º dia de cura há uma estabilização desta. Na Figura 4.16 é apresentado um corpo de prova após ensaio com 7 dias de cura e a Figura 4.17 mostra-se outro corpo de prova após ensaio com 45 dias de cura. A forma de ruptura e a aparência dos corpos de prova são similares.

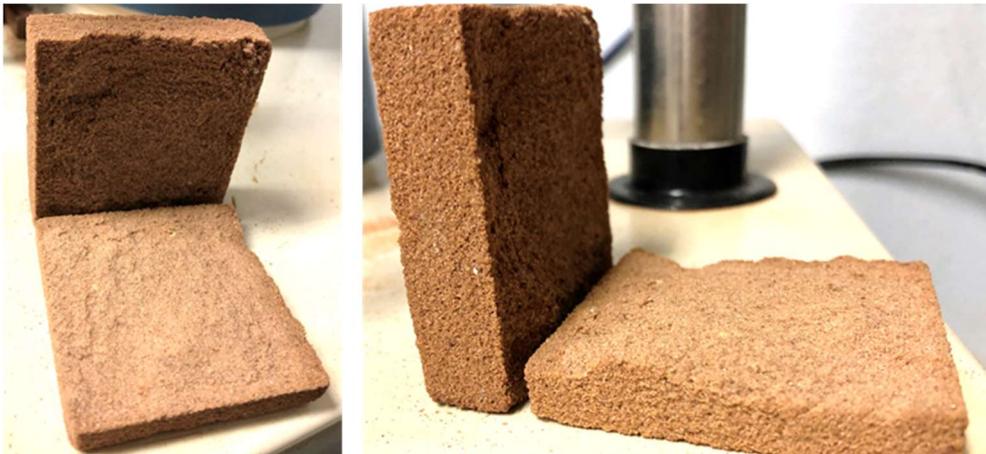


Figura 4.16. SP\_2,5% 7 dias de dia, após ruptura.



Figura 4.17. SP\_2,5% 45 dias de dia, após ruptura.

Com o aumento do tempo de cura percebeu-se menor quantidade de partículas soltas. Na parte externa de todos os corpos de prova, ou seja, na parte com contato direto com o ar percebe-se uma maior rigidez e diferença de coloração comparando-se com a parte interna. Associa-se tal fato pela cura ocorrer de fora para dentro. Acredita-se que o aumento do ângulo de atrito se deu pelo aumento da coesão dos grãos com o tempo de cura, pela pouca variação existente nesse parâmetro.

Na Figura 4.18 mostram-se as envoltórias de ruptura dos compósitos com diferentes tempos de cura para 2,5% de polímero. Enquanto, na Tabela 4.3 são apresentados os valores de ângulo de atrito efetivo e intercepto coesivo de cada tempo de cura.

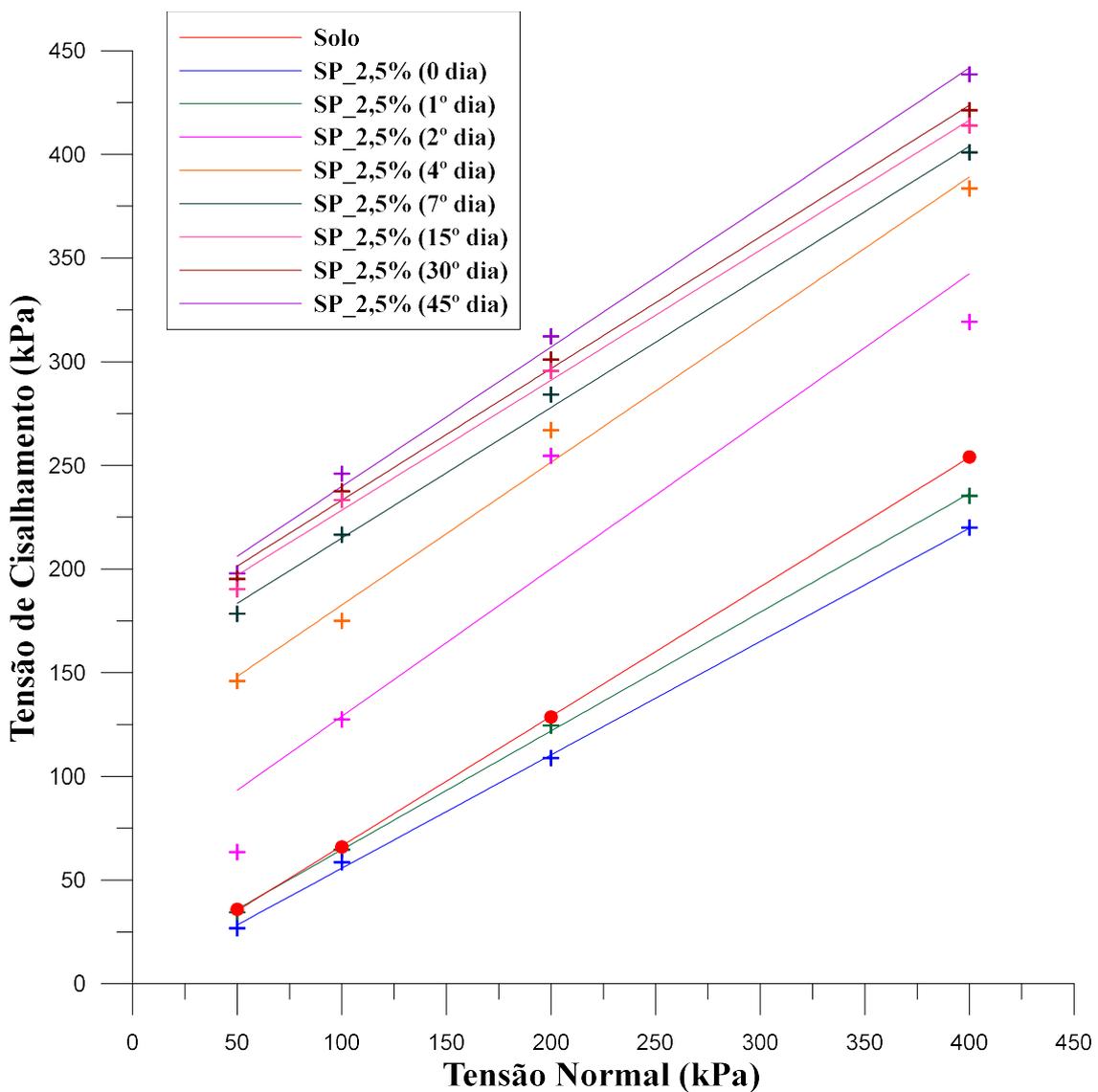


Figura 4.18. Envoltória de Ruptura para SP\_2,5%.

Tabela 4.3. Valores do intercepto coesivo e ângulo de atrito para SP 2,5%.

	$c'$ (kPa)	$\Phi'$ (°)
Solo	4,05	31,9
SP_2,5% (0° Dia)	1,06	28,9
SP_2,5% (1° Dia)	7,37	29,8
SP_2,5% (2° Dia)	57,81	36,2
SP_2,5% (4° Dia)	151,95	34,2
SP_2,5% (7° Dia)	165,70	32,4
SP_2,5% (15° Dia)	167,59	32,6
SP_2,5% (30° Dia)	169,67	32,9
SP_2,5% (45° Dia)	172,53	34,5

Pelo solo utilizado no estudo ter menos que 12% de teor de finos o que rege o comportamento geral do solo é o ângulo de atrito. Dessa maneira, ao se adicionar o polímero espera-se um aumento do intercepto coesivo por conta do aditivo trabalhar na cimentação dos grãos.

Na Figura 4.19 apresentam-se as curvas tensão de cisalhamento por deslocamento horizontal para o solo com adição de água (valor da umidade ótima para energia normal) para aplicação das tensões normais de 50 kPa, 100 kPa, 200 kPa e 400 kPa. Na Figura 4.20 apresentam-se as curvas tensão de cisalhamento por deformação horizontal para cada tempo de cura e para aplicação das tensões normais citadas anteriormente para 5 % de polímero.

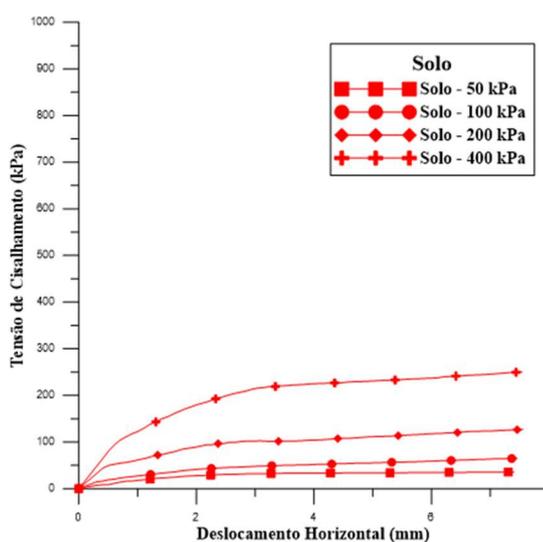
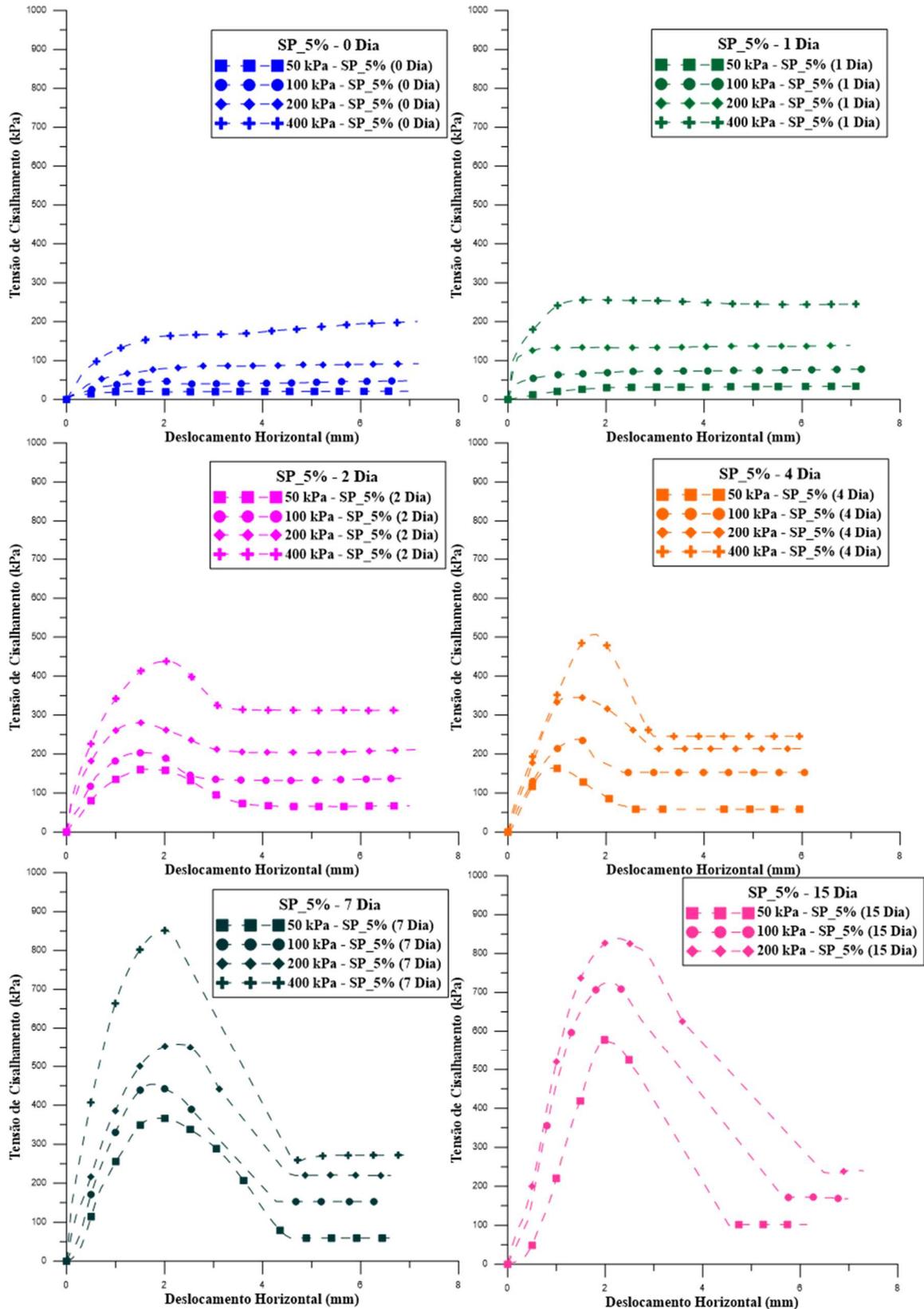


Figura 4.19. Curvas tensão de cisalhamento por deformação horizontal para o solo com adição de água para tensões normais de 50 kPa, 100 kPa, 200 kPa e 400 kPa.



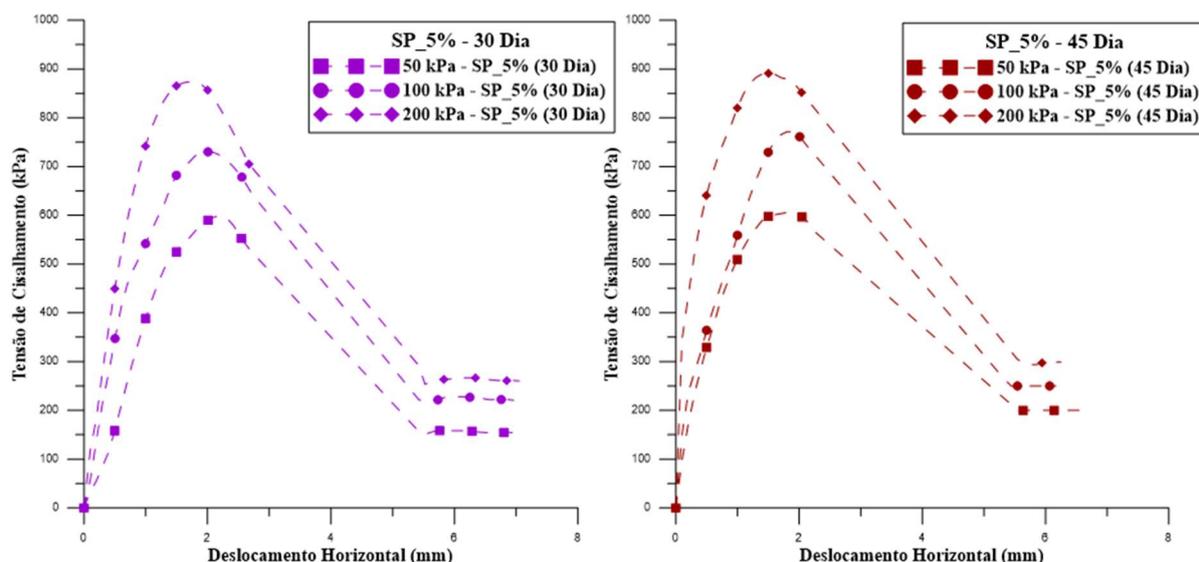


Figura 4.20. Curvas tensão de cisalhamento por deformação horizontal para cada tempo de cura e para aplicação das tensões normais de 50 kPa, 100 kPa, 200 kPa e 400 kPa para 5% de polímero.

Percebe-se o comportamento das curvas equivalente com os compósitos com menor dosagem de polímero. Contudo, o comportamento após atingir o pico a partir da tensão de 400 kPa para 7 dias de cura possui uma queda acentuada, ocorrendo o mesmo para todas as curvas com 15, 30 e 45 dias.

A adição da solução polimérica sem cura, SP\_5% (0 Dia), mostrou um comportamento inferior, nos parâmetros obtidos e menores valores de resistência, tanto quando comparado com o solo quanto com o SP\_2,5% (0 Dia). Como houve acréscimo do polímero na solução observou-se uma maior lubrificação dos grãos, gerando menores valores de ângulo de atrito e ausência de intercepto coesivo. Na Figura 4.21 buscou-se representar a umidade presente no corpo de prova e como o corpo de prova ficou após o ensaio de cisalhamento.



Figura 4.21. SP\_5% sem cura, após ruptura.

Entretanto, já se verifica comportamento superior para ambos parâmetros (intercepto coesivo e ângulo de atrito) já com 1 dia de cura do compósito. Não foi observado para a dosagem com menor quantidade de polímero, em que se observou apenas o aumento do intercepto coesivo. Além disso, pode-se verificar que o corpo de prova com 1 dia de cura, apesar de ainda estar úmido, apresenta uma percepção de coesão entre os grãos (Figura 4.22).

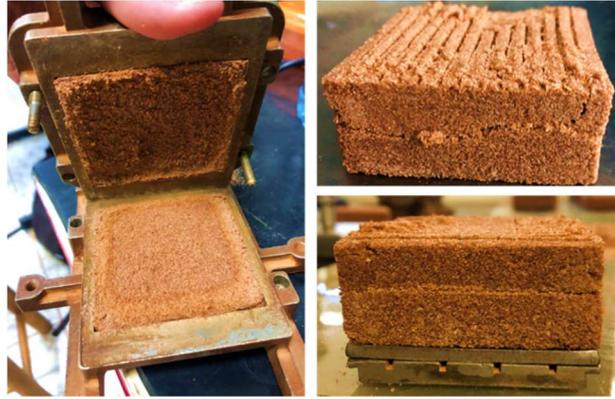


Figura 4.22. SP\_5% com 1 dia de cura, após ruptura.

Com dois dias de cura nota-se o melhoramento do corpo de prova em ambos parâmetros, sendo um aumento de aproximadamente 3000% no intercepto coesivo quando comparado com o solo sem polímero. Percebe-se melhora no comportamento de SP\_5% (2º dia) , apesar de ainda existir pouco de umidade interna (Figura 4.23), tanto dos parâmetros quanto nos valores de resistência, o que só observou-se na dosagem 2,5% a partir do 4º dia de cura. Percebe-se essa umidade pelo centro da amostra estar com coloração diferente das bordas e também pelo desprendimento do interior desta após a realização do ensaio.

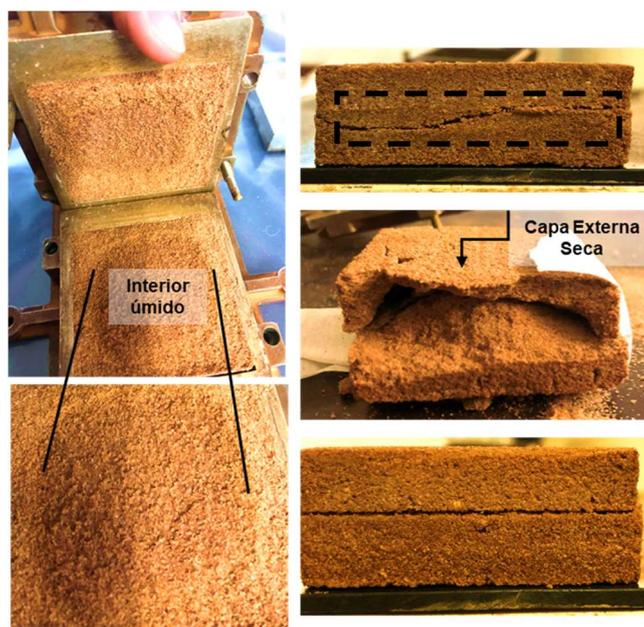


Figura 4.23. SP\_5% com 2 dia de cura, após ruptura, com interior úmido e parte externa seca.

Nas amostras SP\_5% (4º Dia) houve um aumento significativo no ângulo de atrito quando comparado com o solo apenas com água, um incremento equivalente a 40%. Quando se compara o ângulo de atrito com o resultado obtido, para as amostras SP\_2,5% (4º Dia), percebe-se um aumento de aproximadamente 30%. Contudo, o intercepto coesivo de SP\_2,5% (4º Dia) é superior ao valor encontrado para o compósito com maior quantidade de polímero. Acredita-se que com o aumento de polímero na solução há uma cura um pouco mais lenta no interior da amostra. Todavia, percebeu-se um menor desprendimento dos grãos no centro da amostra após o ensaio. Outro ponto a se avaliar é que para os compósitos com menor quantidade de polímero há uma estabilização dos valores a partir do 4º dia de cura e o mesmo não ocorre para as amostras com maior quantidade de polímero.

Com 7 dias de cura observou-se nitidamente o aumento de ambos parâmetros. O valor de intercepto coesivo para esse tempo de cura é praticamente o dobro do valor encontrado para SP\_2,5 (45º dia). Analisando o valor do ângulo de atrito encontrado para o compósito com essa dosagem e a partir do 7º dia de cura, os resultados são semelhantes a intervalos típicos de valores de ângulo de atrito de rochas. Na Tabela 4.4 estão compilados os valores típicos de ângulos de atrito de diversos tipos de rocha.

Tabela 4.4. Valores típicos de Ângulo de atrito de diversos tipos de rocha (Costa, 2012)

<b>Rocha</b>	<b><math>\Phi'</math> (°)</b>
Granito	45-60
Dolerito	55-60
Basalto	50-55
Arenito	35-50
Calcário	35-50
Quartzito	50-60
Mármore	35-50

No 15º dia de cura o valor do intercepto coesivo teve um acréscimo de aproximadamente 70% comparado com o 7º dia de cura para a mesma dosagem e de 12800% quando comparado com o solo. Para os tempos de cura de 15, 30 e 45 dias não foi possível a realização do ensaio com tensão normal aplicada de 400 kPa, pelas limitações do equipamento. Neste caso foram realizados ensaios de cisalhamento apenas com 3 tensões normais (50 kPa, 100kPa e 200kPa). Percebe-se que após o 15º dia de cura não há tanto acréscimo nos valores de intercepto coesivo, nem de ângulo de atrito. Na Figura 4.24 mostra-se a ruptura de um corpo de prova com 15 dias de cura, enquanto na Figura 4.25 mostra-se um corpo de prova ensaiado com 45 dias de cura.



Figura 4.24. SP\_5% com 15 dia de cura, após ruptura.



Figura 4.25. SP\_5% com 45 dia de cura, após ruptura.

Na Figura 4.26 apresentam-se as envoltórias de ruptura dos compósitos com diferentes tempos de cura, para 5% de polímero. Enquanto, Tabela 4.5 são representados os valores de ângulo de atrito efetivo e intercepto coesivo para cada tempo de cura.

O aumento da dosagem de polímero ocorreu para um melhor entendimento do comportamento entre o substrato e o polímero e uma tentativa para redução das partículas soltas no interior do corpo de prova.

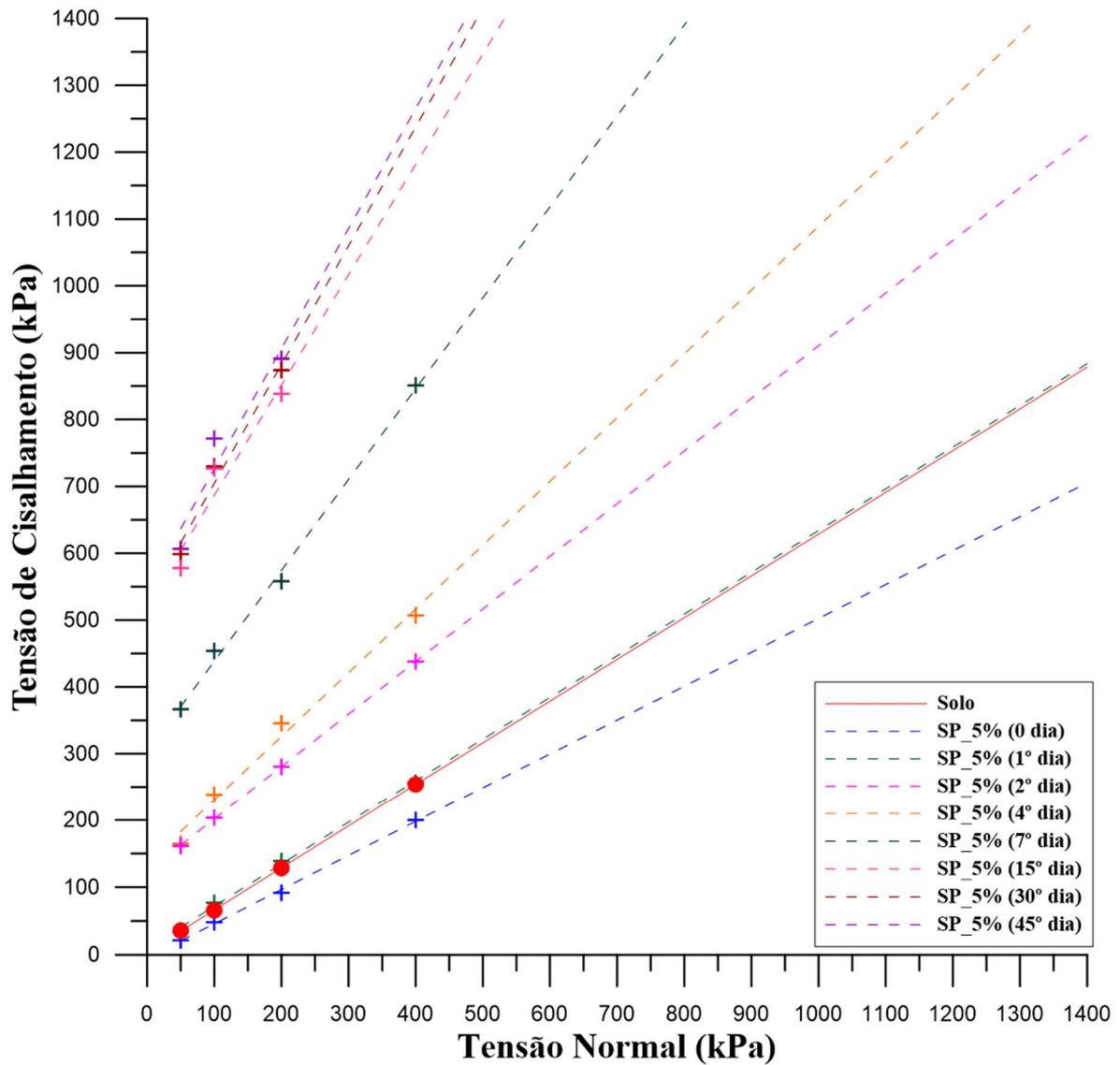


Figura 4.26. Envoltória de Ruptura para SP\_5%.

Tabela 4.5. Valores do intercepto coesivo e ângulo de atrito para SP\_5%.

	$c'$ (kPa)	$\Phi'$ (°)
Solo	4,05	31,9
SP_5% (0° Dia)	0,00	27,0
SP_5% (1° Dia)	9,68	32,5
SP_5% (2° Dia)	123,12	38,3
SP_5% (4° Dia)	134,96	44,4
SP_5% (7° Dia)	302,48	54,2
SP_5% (15° Dia)	521,86	60,1
SP_5% (30° Dia)	526,72	61,4
SP_5% (45° Dia)	546,72	62,2

Na Figura 4.27 apresentam-se as curvas de tensão x deslocamento horizontal para ambos compósitos com 45 dias de cura e para o solo.

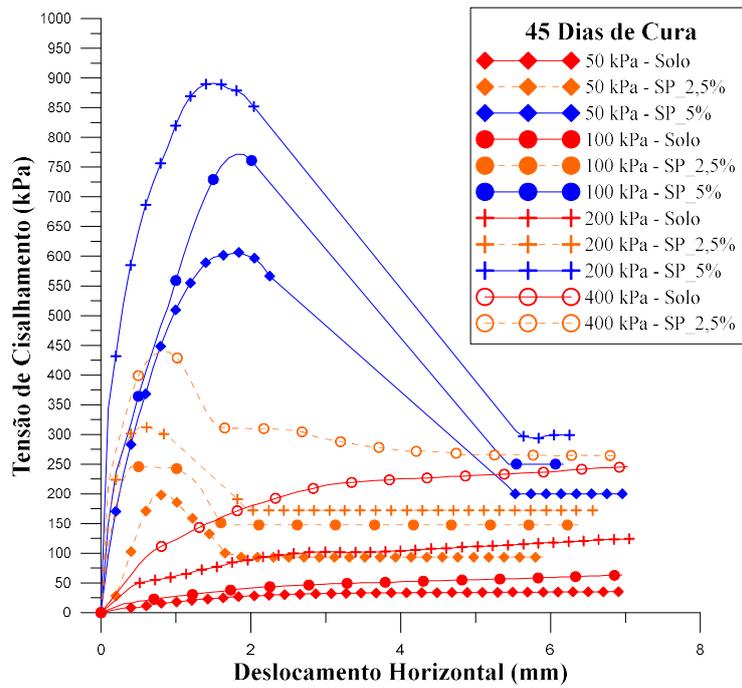


Figura 4.27. Curvas de tensão x deslocamento horizontal dos compósitos com 45 dias de cura e solo

Há nítido aumento da rigidez, dos valores de pico e dos valores da tensão residual com o acréscimo de polímero. Verifica-se que SP\_5% são mais resistentes ao cisalhamento que SP\_2,5% e o solo sem melhoramento. Ou seja, é vantajoso a adição da solução polimérica e quando maior a quantidade de polímero maior a resistência cisalhante do solo para todas as tensões confinantes estudadas.

Na Figura 4.28 estão representadas todas as curvas para tensão confinante de 50 kPa e 200 kPa para o compósito SP\_2,5%. Enquanto, na Figura 4.29 estão representadas todas as curvas para tensão confinante de 50 kPa e 200 kPa para o compósito SP\_5%.

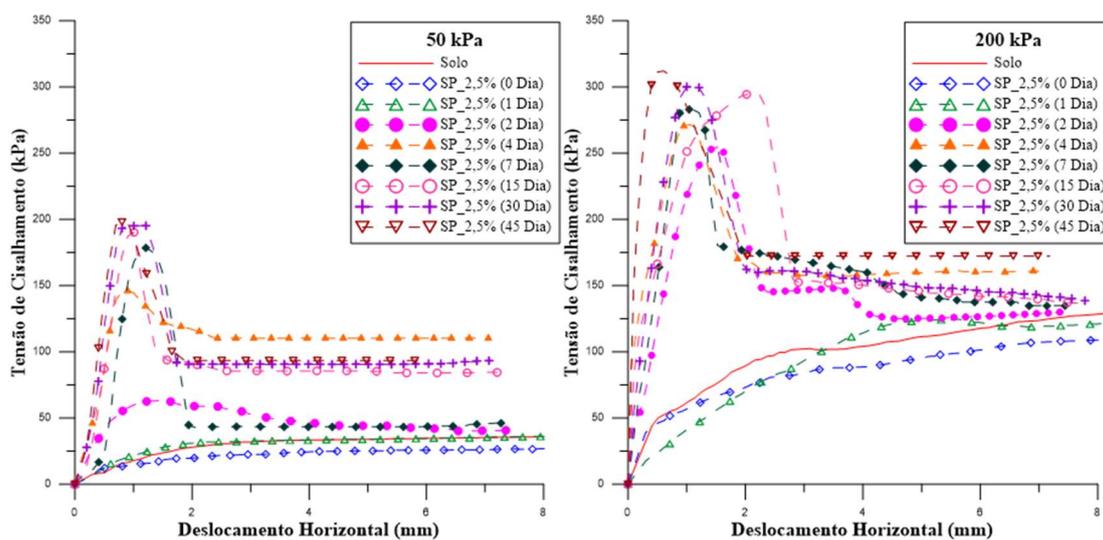


Figura 4.28. Curvas de tensão x deslocamento horizontal 50 kPa e 200 kPa para SP\_2,5% e solo.

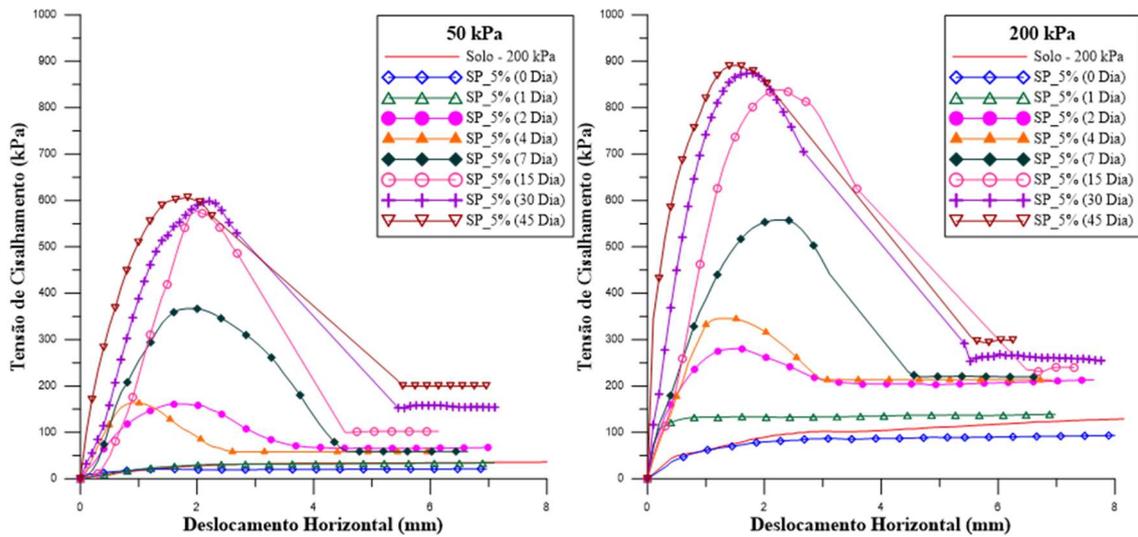


Figura 4.29. Curvas de tensão x deslocamento horizontal 50 kPa e 200 kPa para SP\_5% e solo.

Para ambos compósitos, com o aumento da tensão confinante, há aumento da tensão cisalhante. Contudo, o aumento da tensão de confinamento gera curvas com pico mais acentuado, alterando, levemente o comportamento da curva. Após a ruptura, para as curvas com 200 kPa, os valores das tensões residuais ficam mais próximos do valor do solo, o que é menos nítido para os valores de 50 kPa.

Na Figura 4.30 é apresentada a relação entre Intercepto Coesivo e Ângulo de atrito dos compósitos e o tempo de cura referente.

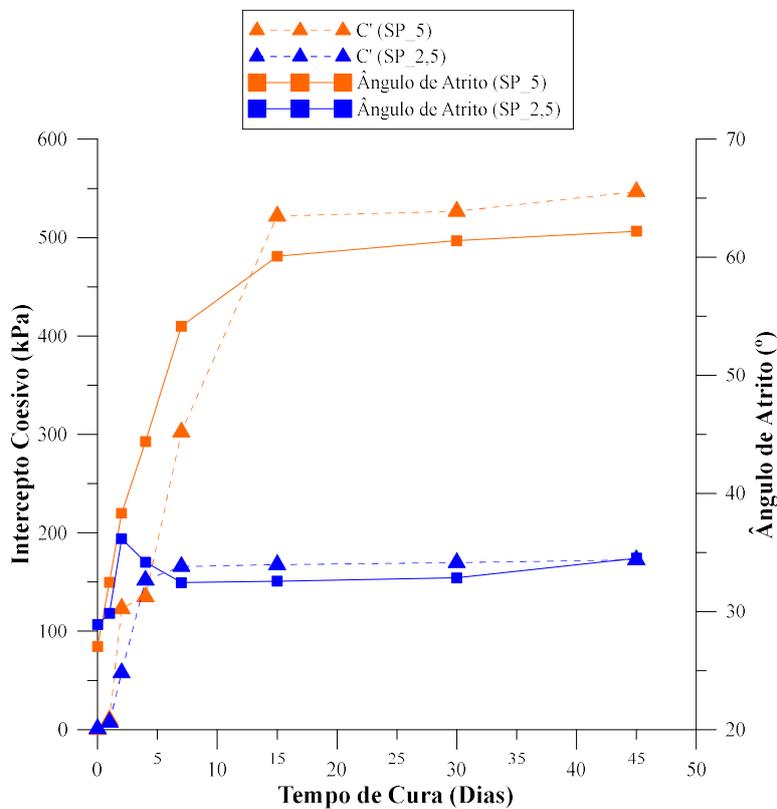


Figura 4.30. Relação ângulo de atrito e intercepto coesivo por tempo de cura para os compósitos.

Percebe-se que no ângulo de atrito os valores para SP\_2,5% há um aumento no 4º dia e depois uma diminuição e no 7º dia. Acredita-se que apesar de verificar esse aumento, não é um aumento verdadeiramente dito, percebe-se uma estabilização do valor do ângulo de atrito para as dosagens SP\_2,5%. Analisando os valores do intercepto coesivo há aumento significativo até o 4º dia de cura e estabilização no 7º dia.

Já o comportamento do ângulo de atrito para SP\_5% percebe-se, um aumento significativo até o 15º dia de cura e estabilização nos dias seguintes. Analisando os valores do intercepto coesivo o comportamento desse parâmetro segue a tendência encontrada para o ângulo de atrito, a estabilização do valor a partir do 15º dia.

#### 4.2.4. Ensaio Triaxial Cíclico - Módulo de Resiliência

Serão apresentados os valores de módulo de resiliência obtidos pelo ensaio indicados para solo, realizado para o solo e compósitos, e os módulos de resiliências obtidos para misturas asfálticas para os compósitos aplicados como revestimento.

##### 4.2.4.1. Módulo de Resiliência – Indicado Para Solos

Os resultados obtidos no ensaio de triaxial cíclico, para solo e compósitos nos diferentes dias de cura, estão apresentados nas Figura 4.31 e Figura 4.32. Na Tabela 4.6 mostram-se as faixas de valores de MR.

Tabela 4.6. Valores de MR do Solo, SP\_2,5% e SP\_5% para diferentes tempos de cura.

Material	MR (MPa)
Solo	104 - 233
SP_2,5% (7º Dia)	315 - 470
SP_2,5% (15º Dia)	238 - 363
SP_2,5% (30º Dia)	155 - 366
SP_2,5% (45º Dia)	200 - 295
SP_5% (7º Dia)	436 - 676
SP_5% (15º Dia)	319 - 600
SP_5% (30º Dia)	200 - 468
SP_5% (45º Dia)	144 - 330

Percebe-se que há uma redução dos valores de MR com o aumento dos dias de cura, ocorrendo para ambos compósitos. O módulo de resiliência está associado à máxima energia,

por unidade de volume, que um material sofre sem sofrer deformações plásticas. Medina e Mota (2015) definem que a deformação plástica de um sistema particulado com poros não saturados resulta em escorregamento no contato dos grãos e acomodações irreversíveis de pequenas partículas nos poros das maiores.

Sabe-se que para o cálculo do módulo de resiliência utiliza-se apenas a parcela de deformação elástica do material ou deformação resiliente. Acredita-se que com o envelhecimento do material há o aumento da parcela plástica da deformação, assim reduzindo o módulo de resiliência com o aumento dos dias de cura que é regido pela parcela elástica.

Todavia, apesar de observar uma redução dos valores de MR para maiores tempos de cura, o valor com 45 dias (maior tempo ensaiado), para ambas dosagens, continua superior ao solo não melhorado. Nota-se uma diferença de comportamento do mesmo compósito, ora submetido a tensões estáticas (cisalhamento direto e compressão simples que a maior tempo de cura resultou em melhor resposta) ora submetido a tensões cíclicas, em que a resposta no mesmo material, é diferente.

O material modificado é um solo arenoso, sendo o modelo dependente da tensão confinante pertinente a análise. As constantes de regressão para o modelo citado são encontradas na Tabela 4.7 e o coeficiente de determinação ( $R^2$ ) de cada ajuste ao modelo.

Tabela 4.7. Constantes de regressão e  $R^2$  para o modelo dependente de  $\sigma_3$ .

	K1	K2	R <sup>2</sup>
Solo	462,69	0,377	0,92
SP_2,5% (7° Dia)	476,40	0,076	0,22
SP_2,5% (15° Dia)	358,41	0,075	0,29
SP_2,5% (30° Dia)	322,01	0,083	0,06
SP_2,5% (45° Dia)	324,17	0,1065	0,59
SP_5% (7° Dia)	716,13	0,090	0,25
SP_5% (15° Dia)	682,45	0,1232	0,33
SP_5% (30° Dia)	467,91	0,1593	0,25
SP_5% (45° Dia)	341,04	0,0845	0,09

Deve-se ressaltar que os modelos foram feitos em cima de solos puros, arenosos, argilosos e não para um novo material que foi criado, por sair destes padrões. Dessa forma, estuda-se em qual modelo ele se encaixa melhor, mas, ressalta-se, que, muitas vezes, não é o modelo adequado, pelo comportamento distinto que o novo material possui.

Na Figura 4.31 é exposto o ajuste dos resultados do módulo de resiliência com a tensão confinante para o solo e compósitos SP\_2,5% para diferentes dias de cura. Enquanto na Figura

4.32 é mostrado o ajuste dos resultados do módulo de resiliência com a tensão confinante, para o solo e compósitos SP\_5%, para diferentes dias de cura.

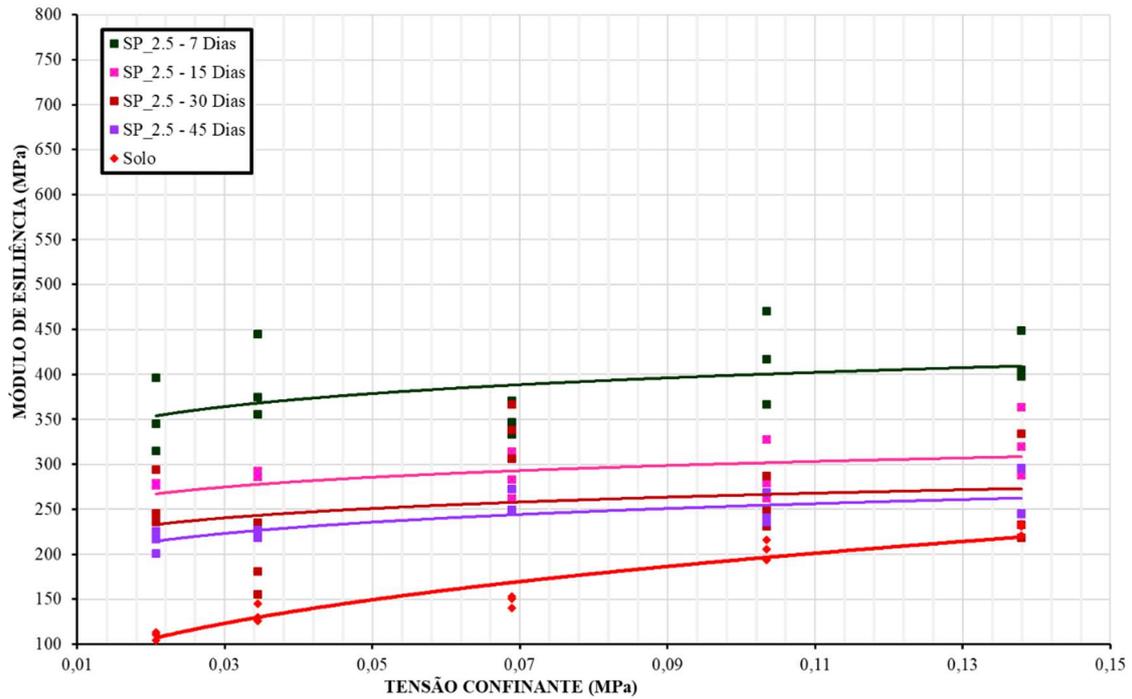


Figura 4.31. Relação Módulo de Resiliência x  $\sigma_3$ , para Solo e SP\_2,5% com diferentes tempos de cura.

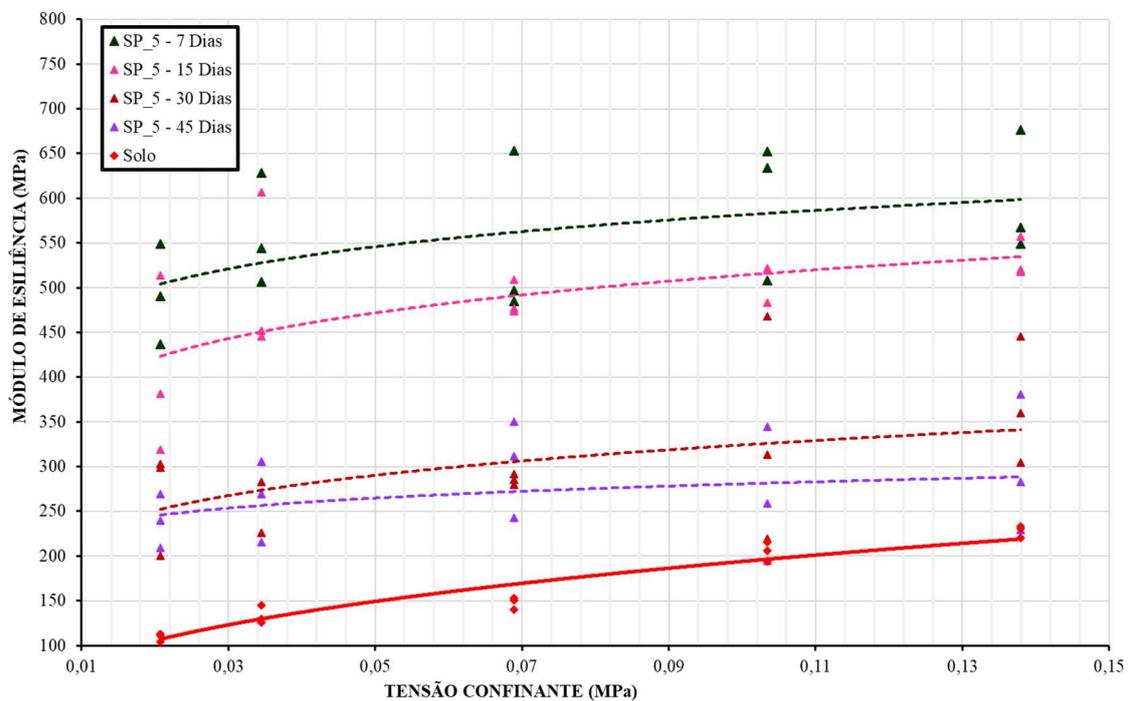


Figura 4.32. Relação Módulo de Resiliência x  $\sigma_3$ , para Solo e SP\_5% com diferentes tempos de cura.

Percebe-se que o solo sem melhoramento possuiu um bom ajuste ao modelo de tensão confinante. Em contrapartida, os compósitos não possuíram bom ajuste com esse modelo, sendo

com maior congruência de valores o SP\_2,5% (45° Dia), apesar de ainda ser um valor baixo. Era esperado um melhor ajuste para os compósitos, acredita-se que por existir uma alteração do comportamento do material, aumento da cimentação entre os grãos, tanto para maiores dosagens e maiores tempos de cura, outros modelos foram testados para melhor entendimento do comportamento dos compósitos. Deve-se ressaltar que os modelos foram feitos em cima de solos puros, arenosos, argilosos e não para um novo material que foi criado, por sair destes padrões. Dessa forma, estuda-se em qual modelo ele se encaixa melhor, mas, ressalta-se, que, muitas vezes, não é o modelo adequado, pelo comportamento distinto que o novo material tem.

O modelo de tensão desvio foi testado para o ajuste dos resultados. As constantes de regressão para o modelo citado são encontradas na Tabela 4.8 e o coeficiente de determinação ( $R^2$ ) de cada ajuste ao modelo.

Tabela 4.8. Constantes de regressão e  $R^2$  para o modelo dependente de  $\sigma_d$ .

	<b>K1</b>	<b>K2</b>	<b>R<sup>2</sup></b>
Solo	324,09	0,2940	0,54
SP_2,5% (7° Dia)	387,14	0,0039	0,00
SP_2,5% (15° Dia)	372,87	0,1047	0,53
SP_2,5% (30° Dia)	357,46	0,1403	0,18
SP_2,5% (45° Dia)	313,17	0,1099	0,61
SP_5% (7° Dia)	584,21	0,0219	0,01
SP_5% (15° Dia)	642,28	0,1137	0,29
SP_5% (30° Dia)	435,60	0,1564	0,25
SP_5% (45° Dia)	476,38	0,2361	0,70

Na Figura 4.33 apresenta-se o ajuste dos resultados do módulo de resiliência com a tensão desvio para o solo e compósitos SP\_2,5% para diferentes dias de cura. Enquanto na Figura 4.34 é indicado o ajuste dos resultados do módulo de resiliência com a tensão desvio para o solo e compósitos SP\_5% para diferentes dias de cura.

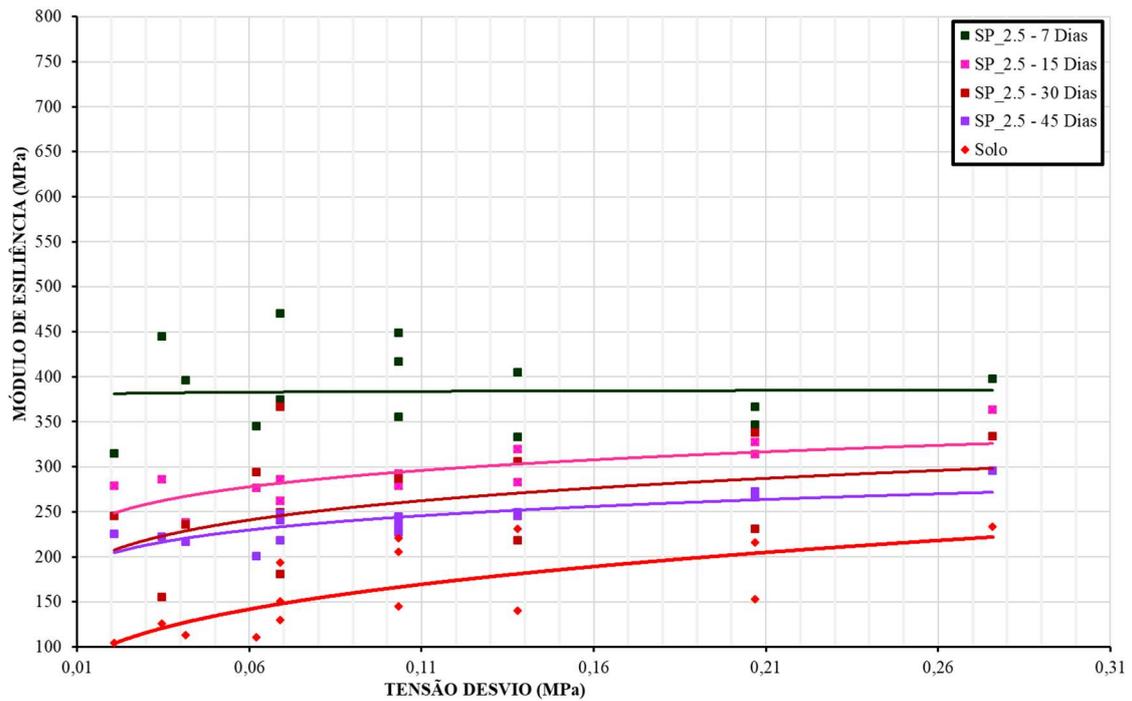


Figura 4.33. Relação Módulo de Resiliência x  $\sigma_d$ , para Solo e SP\_2,5% com diferentes tempos de cura.

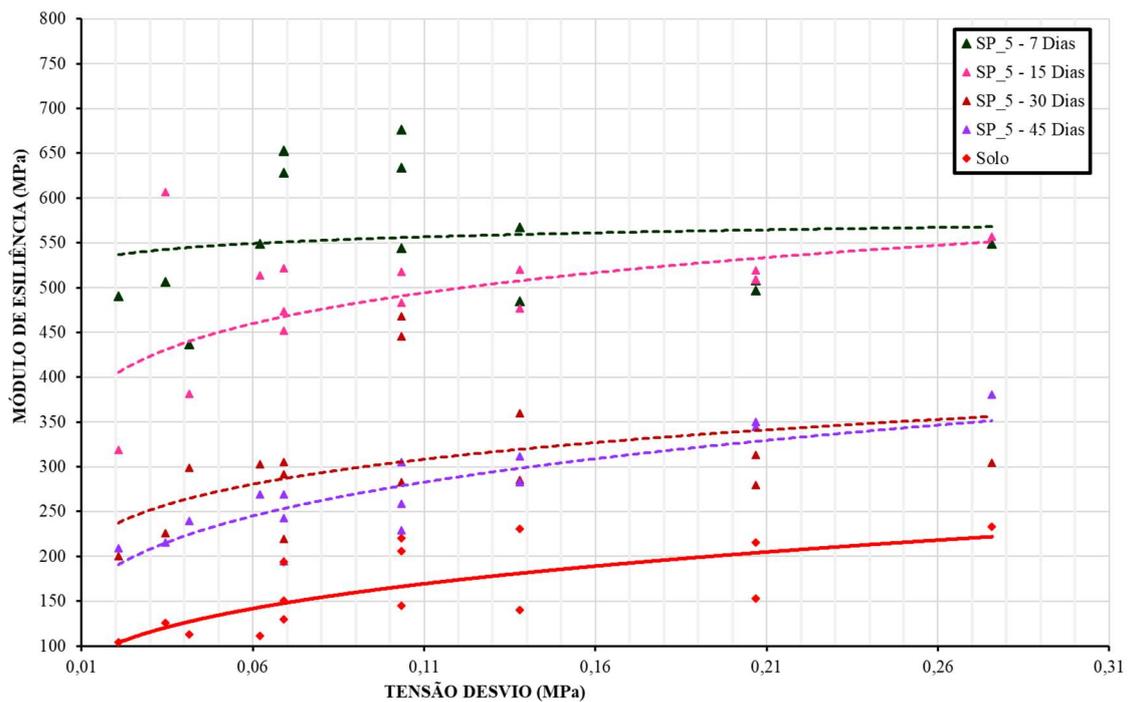


Figura 4.34. Relação Módulo de Resiliência x  $\sigma_d$ , para Solo e SP\_5% com diferentes tempos de cura.

Percebe-se que o solo sem melhoramento não possuiu um bom ajuste ao modelo de tensão desvio, como esperado, por ser um modelo para solos finos. Os compósitos continuam sem um bom ajuste com esse modelo, sendo com maior congruência dos valores o compósito SP\_5% (45° Dia). Pôde-se verificar que, para ambas dosagens com 45 dias de cura, o valor de

ajuste dos resultados com esse modelo foi melhor do que o modelo de tensão cisalhante, mostrando que com 45 dias de cura os compósitos possuem mais influência de  $\sigma_d$ . Para avaliar o comportamento, principalmente dos compósitos, buscou ajuste dos dados ao Modelo Composto. Na Tabela 4.9 está representada as constantes de regressão para o modelo citado e o coeficiente de determinação ( $R^2$ ) de cada ajuste ao modelo.

Tabela 4.9. Constantes de regressão e  $R^2$  para o modelo composto.

	K1	K2	K3	R <sup>2</sup>
Solo	503,51	0,37	0,02	0,96
SP_2,5% (7º Dia)	458,14	0,17	-0,13	0,70
SP_2,5% (15º Dia)	383,70	-0,0009	0,12	0,75
SP_2,5% (30º Dia)	347,32	-0,041	0,17	0,43
SP_2,5% (45º Dia)	337,90	0,049	0,083	0,84
SP_5% (7º Dia)	693,76	0,17	-0,11	0,67
SP_5% (15º Dia)	666,67	0,08	0,037	0,55
SP_5% (30º Dia)	503,60	0,17	0,0086	0,51
SP_5% (45º Dia)	421,01	-0,17	0,38	0,96

Na Figura 4.35 é exposto o ajuste dos resultados considerando o MR,  $\sigma_d$  e  $\sigma_3$  para o solo. Enquanto nas Figura 4.36 (a – d) apresentam-se o ajuste ao modelo para os compósitos SP\_2,5% para diferentes dias de cura. Por fim, nas Figura 4.37 (a – d) apresentam-se o ajuste ao modelo para os compósitos SP\_5%, para diferentes dias de cura.

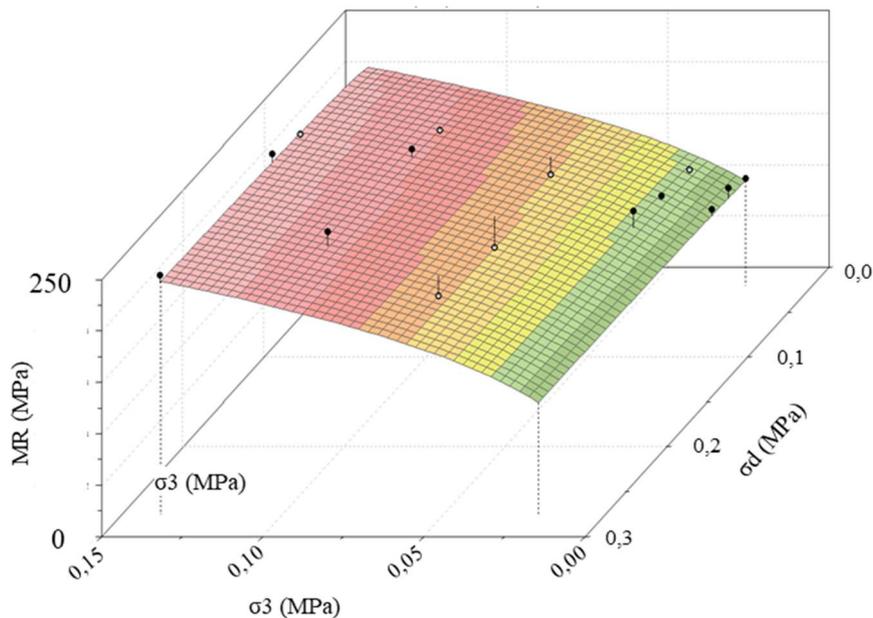


Figura 4.35. Modelo Composto do Solo, representado em MPa.

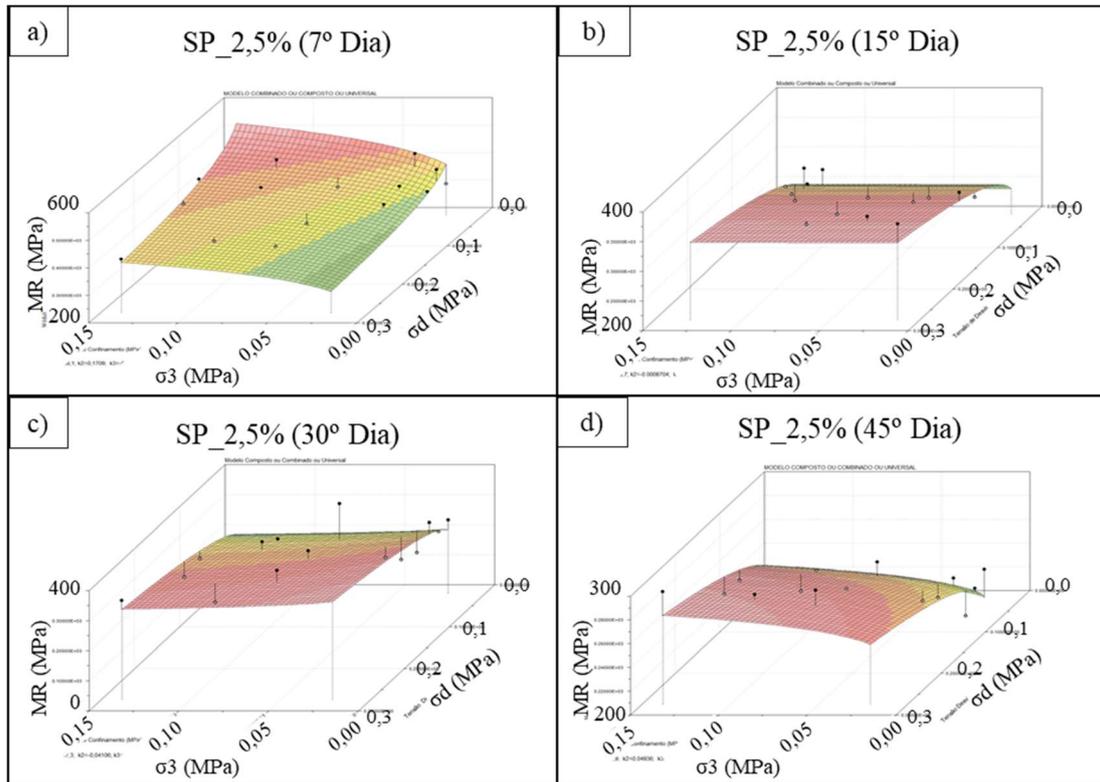


Figura 4.36. (a) Modelo Composto SP\_2,5% com 7 dias de cura; (b) Modelo Composto SP\_2,5% com 15 dias de cura; (c) Modelo Composto SP\_2,5% com 30 dias de cura; (d) Modelo Composto SP\_2,5% com 45 dias de cura.

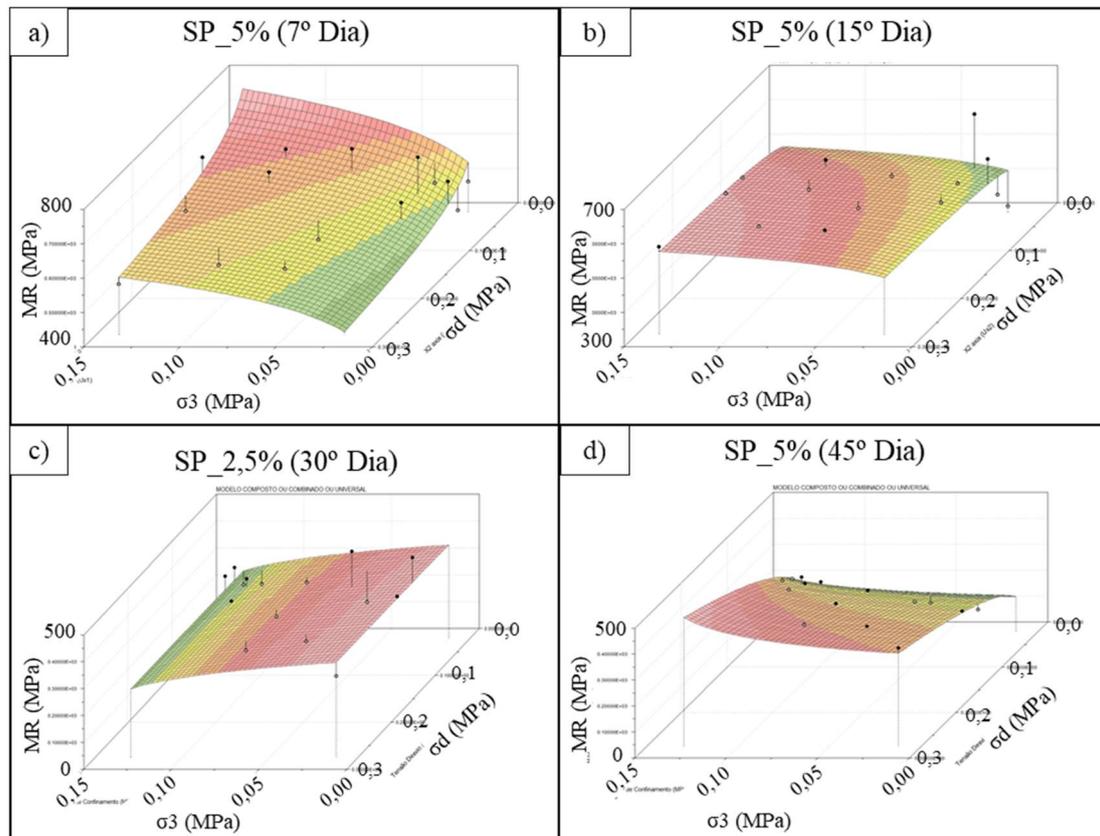


Figura 4.37. (a) Modelo Composto SP\_5% com 7 dias de cura; (b) Modelo Composto SP\_5% com 15 dias de cura; (c) Modelo Composto SP\_5% com 30 dias de cura; (d) Modelo Composto SP\_5% com 45 dias de cura.

Percebe-se que o solo sem melhoramento possui um bom ajuste ao modelo composto. Todavia, o objetivo principal era o ajuste dos resultados encontrados na realização do ensaio de triaxial cíclico para os compósitos e, pelo coeficiente de determinação ( $R^2$ ), pode-se observar isso para ambas dosagens e dias de cura. Avaliando as curvas percebe-se que há mudança significativa de acordo com a idade do compósito.

Medina e Motta (2015) deixam claro que não há um modelo inerente ao solo, por existirem diversas possibilidades de ajustes estatísticos com certo conjunto de dados. Venson (2015) diz que apesar de observar valores baixos de  $R^2$  com alguns modelos, deve-se considerar que o módulo de resiliência é afetado por outras questões que não são levadas em conta nos modelos, como a tensão volumétrica e granulometria do material, e no caso estudado, o tempo de cura.

Apesar da redução existente com o aumento do tempo de cura, todos compósitos e tempos de cura ficaram com valores de MR superiores ao solo sem melhoramento. Contudo, os resultados de 5% ficaram melhores, com valores mais altos, e corrobora com os resultados dos ensaios estáticos.

#### 4.2.4.2. Módulo de Resiliência –Indicado Para Misturas Asfálticas

Pela possibilidade de utilização dos compósitos na camada superior de estradas não pavimentadas, realizou-se o ensaio adaptando para obtenção do MR como uma mistura asfáltica. Além disso, aplicou-se três níveis de tensão para melhorar a comparação com outros ensaios (Tabela 4.10).

Tabela 4.10. MR adaptado de misturas asfálticas dos compósitos para três níveis de tensão.

F (N)	700	1000	3000
MR SP_2,5% (MPa)	2044	2160	2575
MR SP_5% (MPa)	2861	3178	3789

Pinto (1991) apresenta valores típicos de módulo de resiliência para CBUQ (concreto betuminoso usinado a quente – mistura densa com granulometria bem distribuída). O valor de CBUQ com ligante CAP 20 possui um valor de 3590 MPa de MR e um CBUQ com CAP 50-60, chega a 4000 MPa, mostrando valores próximos à mistura SP\_5%. Já Mourão (2003) em seu trabalho apresenta valor típico de mistura SMA (*Stone Matrix Asphalt* – mistura aberta com

agregados graúdos e matriz com fibras de celulose) que atingiu 2095 MPa. Logo, pode-se concluir que o compósito solo-polímero atende as especificações para ser usado em pavimentação tanto como uma base rígida, quanto como camada de revestimento, pela sua alta rigidez.

#### 4.2.5. Determinação da Resistência à Tração por Compressão Diametral

A realização desse ensaio, adaptado do feito com mistura asfálticas, se deu pela proposta de utilizar o compósito em estradas não pavimentadas e pelos altos valores de compressão simples e resistência a compressão não confinada. Na Tabela 4.11 estão reunidos os valores da resistência à tração por compressão diametral dos compósitos (SP\_2,5% e SP\_5%).

Tabela 4.11. Resultados do valor da resistência à tração por compressão diametral dos compósitos.

Compósito	RT (MPa)
SP_2,5%	0,43
SP_5%	1,29

O compósito SP\_5%, pela maior quantidade de polímero existente possui maior rigidez, o que levou ao material a ter maior resistência. A existência da resistência à tração por compressão diametral é associada à adição da solução polimérica, uma vez que o solo sem melhoramento não possui comportamento que responda a esse tipo de resistência.

Ao dobrar a quantidade de polímero na amostra observa-se incremento linear da resistência, contudo observa-se que RT do compósito SP\_5% é três vezes maior que o compósito SP\_2,5%. Assim, o acréscimo de polímero acarretou um ganho de resistência do compósito em uma relação de 2/3.

#### 4.2.6. Ensaio *Hamburg Wheel-Track* – Simulador de Tráfego Laboratorial

O ensaio de *Hamburg Wheel-Track*, considerado também um simulador de tráfego laboratorial, foi adaptado para a avaliação do desgaste do compósito, com o objetivo de se obter a afundamento máximo que os compósitos sofreriam após 20 mil ciclos de passagens de roda, caso o compósito fosse aplicado como camada de revestimento. Na Figura 4.38 relaciona-se o número de ciclos com a deformação máxima encontrada de ambos compósitos.

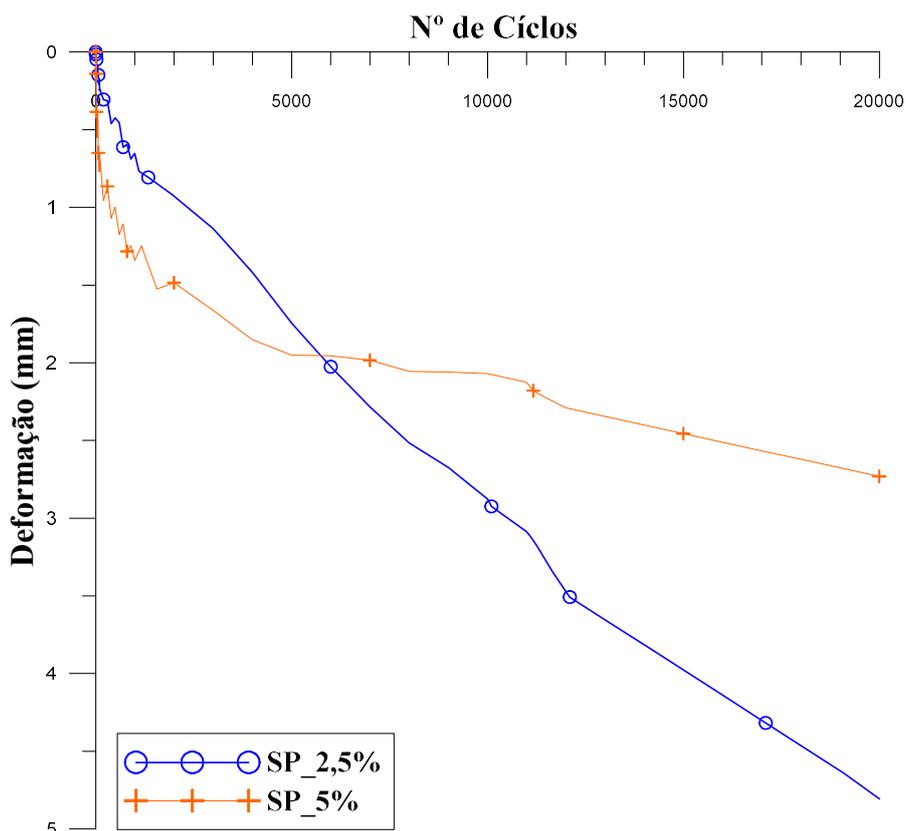


Figura 4.38. Relação entre Nº de ciclos e deformação para ambos compósitos.

Primeiramente, ambos compósitos resistiram muito bem com a passagem dos ciclos, afirma-se isso pelo baixo valor da deformação total existente. A parte inicial do gráfico, de 0 a 1.000 ciclos, chama-se parte de consolidação da amostra. Nessa parte, com a passagem das rodas sobre a amostra, há acomodação final dos grãos de solo.

O valor de afundamento total da amostra SP\_5% foi de 2,73 mm e para o compósito SP\_2,5% foi de 4,8 mm. Ou seja, ao dobrar o conteúdo de polímero na amostra observou-se uma redução do afundamento total de aproximadamente 40%. Conforme exposto, os resultados mostram que o compósito 5% pode ser usado direto como camada de revestimento.

#### 4.2.7. Ensaio de Dano por Umidade Induzida

A determinação do dano por umidade induzida mostrou-se um ensaio fundamental para entendimento do comportamento do compósito com situações de alteração de temperatura e submersão, principalmente por se tratar de estabilização química polimérica. Na Tabela 4.12 são reunidos os valores da resistência à tração por compressão diametral dos compósitos (SP\_2,5% e SP\_5%) com (RTc) e sem dano induzido (RT) e por fim a relação entre os valores (RRT).

Tabela 4.12. Resultados da determinação por umidade induzida para SP\_2,5% e SP\_5%.

Compósito	RTc (MPa)	RT (MPa)	RRT (%)
SP_2,5%	0,07	0,21	32,06
SP_5%	0,16	0,52	30,53

Percebe-se que os corpos de prova que foram induzidos a danos intensos de temperatura e umidade tiveram perda da capacidade de carga por volta de 30%, para ambas misturas. Sendo um comportamento esperado por realizar alterações consideráveis no ambiente. As elevações e diluições de temperatura foram de certa forma desprovidas quando comparados com as alterações ambientais que existem no Brasil e na região do solo estudado.

#### 4.2.8. Ensaio de Expansão

Na Tabela 4.13 são compilados os dados obtidos pelo ensaio de expansão com o solo arenoso e com ambas amostras (SP\_2,5% e SP\_5%), realizando o ensaio submerso e sem submersão e sem tempo de cura.

Tabela 4.13. Resultados ensaio de expansão para solo e compósitos.

Compósito	Expansão
Areia	-0,017%
SP_2,5% - SUB	0,017%
SP_5% - SUB	0,004%
SP_2,5% - Não - SUB	-0,262%
SP_5% - Não - SUB	-0,262%

Os valores negativos representam materiais que sofreram contração e os positivos aqueles que sofreram expansão. Todos os valores são considerados praticamente desprezíveis. O solo arenoso contraiu, apesar de um valor irrisório, sendo condizente com o comportamento esperado para este tipo de solo. As amostras do compósito que foram submersas tiveram um comportamento de expansão, valores também mínimos.

Resolveu-se analisar a expansão sem ser na condição imersa dos compósitos para entendimento do que ocorreria. Buscou-se o entendimento se o polímero se expandia nos vazios da amostra, pois, assim, poderia estar estabilizando um solo, sem expansão, e o polímero inchar nos vazios e gerar expansão. Observou-se, para ambos, a contração do material, o polímero aglutina e cimenta os grãos, preenchendo os vazios, mas sem expandir dentro da amostra.

### 4.3. Caracterização Hidráulica

Nos itens 4.3.1, 4.3.2 e 4.3.3 serão apresentados os resultados da determinação do coeficiente de permeabilidade, da absorção de água e sucção total, respectivamente, e as análises referentes.

#### 4.3.1. Determinação do Coeficiente de Permeabilidade

O coeficiente de permeabilidade é um parâmetro interessante para se analisar, principalmente no quesito do melhoramento e estabilização de solos. Quando busca-se estabilizar um solo diversos parâmetros devem ser estudados, e a permeabilidade é um deles. Na Tabela 4.14 são expostos os valores do coeficiente de permeabilidade do solo e dos compósitos SP\_2,5% e SP\_5%.

Tabela 4.14. Coeficiente de permeabilidade do solo e dos compósitos SP\_2,5% e SP\_5%.

Material	Permeabilidade (cm/s)
Solo	$5 \cdot 10^{-3}$
SP_2,5%	$2 \cdot 10^{-4}$
SP_5%	$2 \cdot 10^{-4}$

Observa-se que há uma redução significativa quando se incorpora polímero ao solo. O comportamento do solo estava com valor típico de solos arenoso fino, com alta permeabilidade. Adicionando o polímero há menor permeabilidade por redução dos vazios entre grãos, chegando próximo de comportamento de um solo com baixa permeabilidade.

#### 4.3.2. Determinação da Absorção de Água

A determinação da absorção de água foi realizada de acordo com a norma para solo-cimento. A realização desse ensaio foi com o intuito de avaliar a redução dos vazios entre os compósitos. Na Tabela 4.15 mostram-se os resultados para SP\_2,5% e SP\_5%.

Tabela 4.15. Valor de absorção dos compósitos SP\_2,5% e SP\_5%.

Compósito	Absorção (%)
SP_2,5%	16,8
SP_5%	11,7

Há uma redução da porcentagem de água retida da amostra SP\_5% quando comparada com a amostra de menor dosagem de polímero. Isso corrobora com resultado do coeficiente de permeabilidade em que a diferença das amostras é praticamente nula, apesar de SP\_5% possuir menor permeabilidade que a SP\_2,5%. Esse resultado corrobora com os resultados da expansão.

### **4.3.3. Determinação da Sucção Total**

A determinação da Sucção Total foi realizada para se descartar que o ganho de resistência esteja associado apenas ao aumento da sucção com o tempo de cura. No dia 0, ou seja, sem cura do compósito, a mistura com 2,5% de solução polimérica resultou em um valor de sucção de 91,70 MPa, e o compósito com 5,0% possuiu um valor de 90,39 MPa. O dia 0 para o solo arenoso adicionado com água resultou em um valor de 89,78 MPa.

Observou-se uma estabilização dos valores de sucção total, tanto que ao 30º dia o compósito SP\_2,5% resultou em um valor de 97,40 MPa e o compósito SP\_5% possuiu um valor de 94,15 MPa. O solo arenoso com adição de água foi mantido fechado para conservação da umidade e no mesmo ambiente dos compósitos, contudo, a medição final do solo ocorreu no 4º dia de cura, até a evaporação praticamente total da água do solo, a última leitura possível obteve um valor de 97,16 MPa.

Os valores de sucção medidos não sofreram incremento com a adição do polímero, pois esses se mantem, aproximadamente, constantes no solo com água e nos compósitos. Assim, pode-se afirmar que o polímero age fisicamente na união dos grãos como agente cimentante. A cura ao ar leva ao acréscimo da resistência pela umidade estar caindo e, assim, a sucção subindo. Contudo, por meio de desse ensaio, provou-se que o que está atuando no aumento de resistência é a adição do polímero, já que não há alteração do valor de sucção com o aumento do tempo de cura

## **4.4. Caracterização Químico-Ambiental-Mineralógica**

As caracterizações químico-ambiental-mineralógica foram realizadas por meio do ensaio de DRX, espectrometria de fluorescência de Raios-X, análise elementar CHN e a análise do lixiviado.

#### 4.4.1. Difração de Raio – X (DRX)

O ensaio de DRX foi realizado para analisar se a adição do polímero resultaria em alguma alteração geológica do solo. Na Figura 4.39 é apresentado o DRX do solo puro.

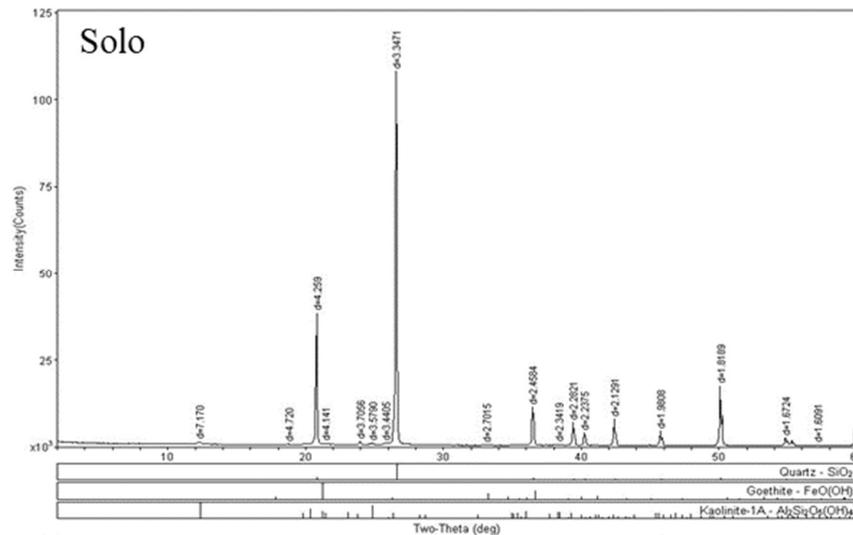


Figura 4.39. DRX do Solo.

O solo estudado é arenoso, pelos ensaios de caracterização realizados, e o DRX comprova ao apresentar grande quantidade de quartzo (SiO<sub>2</sub>) na composição mineralógica do solo. Outro mineral encontrado foi a goethita (FeO(OH)), que é comumente encontrada associado ao quartzo, pelas alterações de sulfetos. Outro material encontrado é a caulinita (Al<sub>2</sub>Si<sub>2</sub>O<sub>5</sub>(OH)<sub>4</sub>), que é um argilo-mineral formado por intemperismo.

Nas Figuras Figura 4.40 e Figura 4.41 são apresentadas as análises do composto seco para SP\_2,5% e SP\_5%, respectivamente.

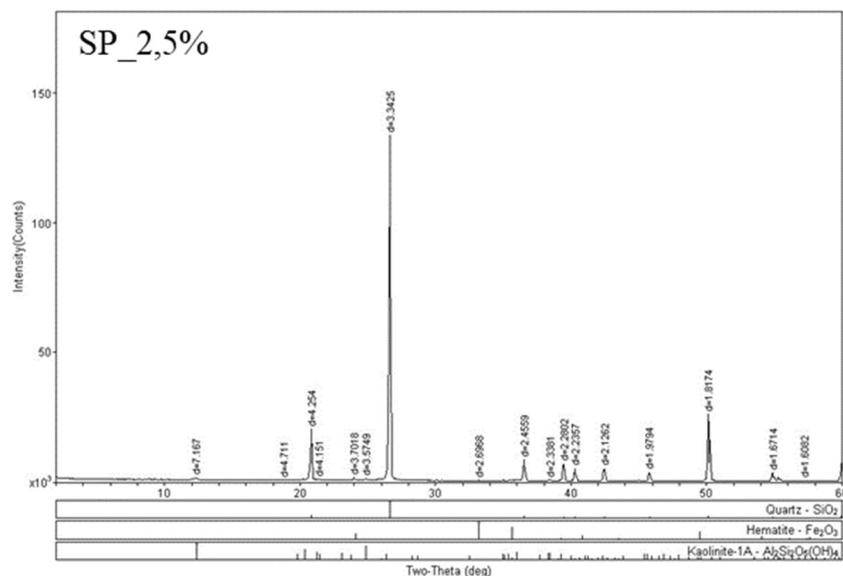


Figura 4.40. DRX do composto SP\_2,5%.

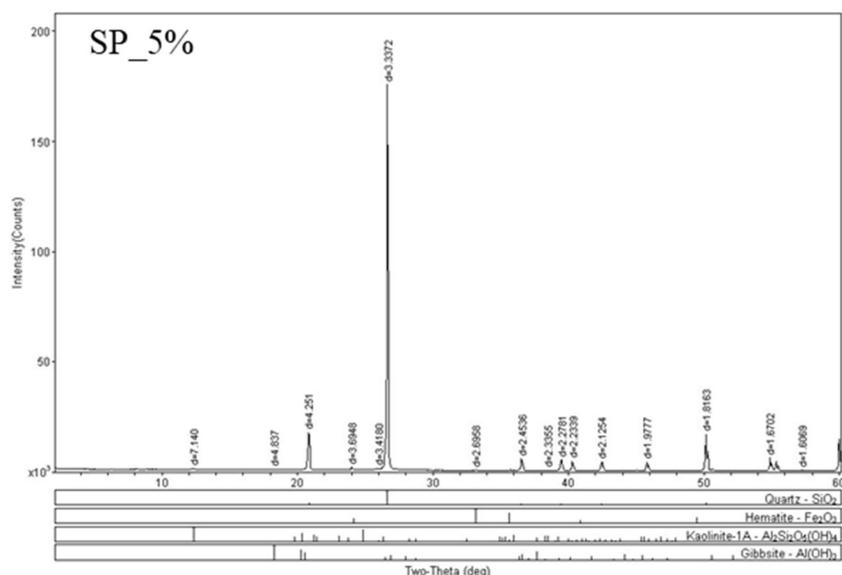


Figura 4.41. DRX do compósito SP\_5%.

O compósito SP\_2,5% apresentou quartzo e caulinita na sua constituição, contudo apareceu uma estrutura mineralógica que se assimila à Hematita (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). A hematita é encontrada como um mineral primário dos três tipos de rocha. Mas não houve tempo geológico ou ações para uma alteração química do mineral encontrado. O equipamento busca similaridades das partículas com as características dos minerais. A hematita é conhecida pela sua fina textura e como agente cimentante para formação de agregados do solo. Acredita-se que a hematita encontrada é na verdade a presença do polímero na matriz do solo, em formato nodular e como agente cimentante dos grãos, que possui propriedades semelhantes à hematita.

Na análise da amostra SP\_5% percebe-se a presença da hematita, assim como no compósito anterior, caulinita e quartzo, como no solo. Contudo, aparece nessa análise uma pequena quantidade de gibbsita (Al(OH)<sub>3</sub>) e ela está associada à fração argila do solo, é um material com carga positiva e possui baixa dureza. Como o solo não possui fração de argila, esse é o compósito com maior quantidade de polímero e pelas características do mineral gibbsita, pressupõe que o material identificado é devido ao aumento da quantidade de polímero ao solo.

Nas Figura 4.42(a – b) mostram-se o mapa dos elementos mais encontrados e a união desses elementos no solo. Na Figura 4.43 apresenta-se o EDS do solo por elementos químicos principais do solo.

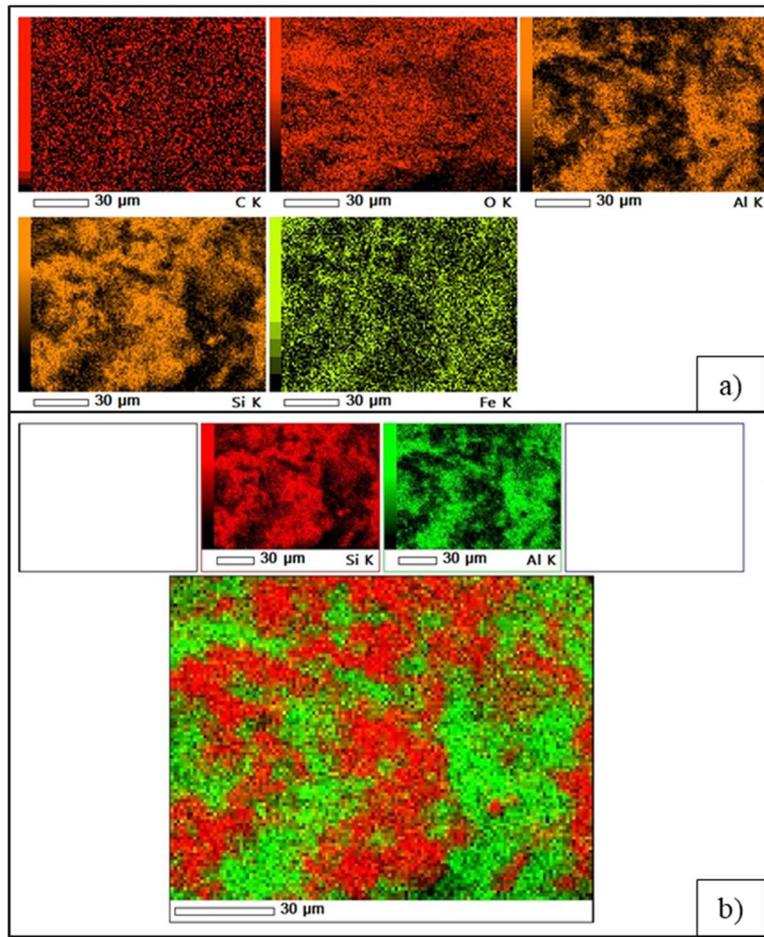


Figura 4.42. Mapa dos elementos encontrados no Solo (a) Elementos principais; (b) União desses elementos.

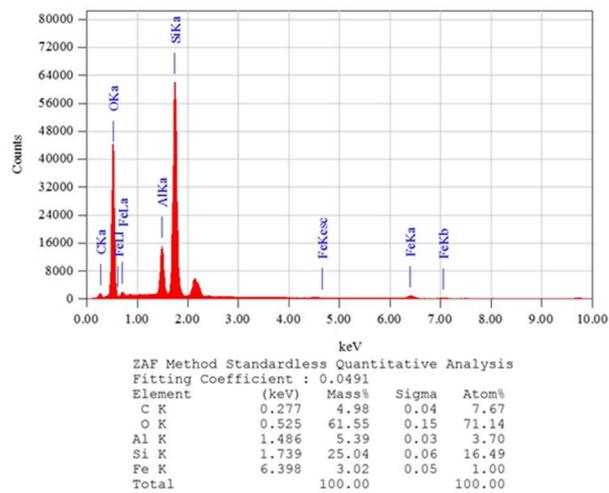


Figura 4.43. EDS do Solo.

Nas Figura 4.44(a – b) mostram-se o mapa dos elementos mais encontrados e a união desses elementos no compósito SP\_2,5%. Na Figura 4.45 apresentam-se o EDS do compósito por elementos químicos principais do compósito SP\_2,5.

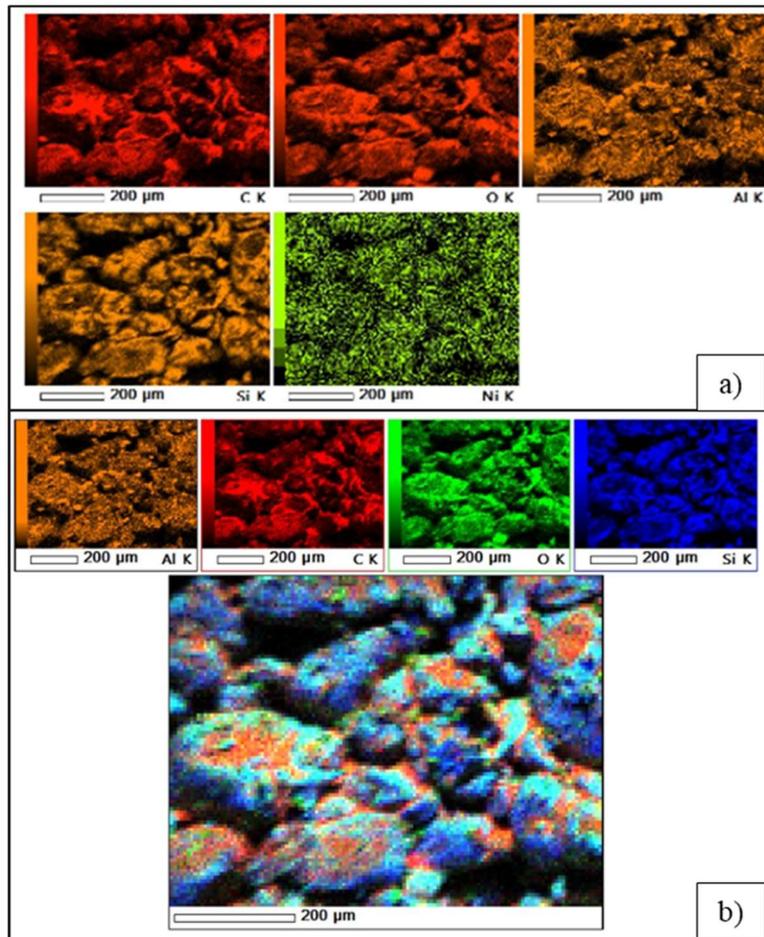


Figura 4.44. Mapa dos elementos encontrados no SP\_2,5% (a) Elementos principais; (b) União desses elementos.

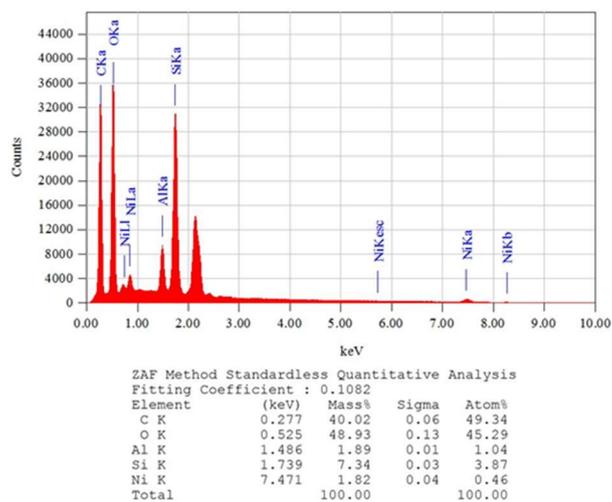


Figura 4.45. EDS do compósito SP\_2,5%.

Nas Figura 4.46(a – b) mostram o mapa dos elementos mais encontrados e a união desses elementos no compósito SP\_5%. Na Figura 4.47 apresentam-se o EDS do compósito por elementos químicos principais do compósito SP\_5%.

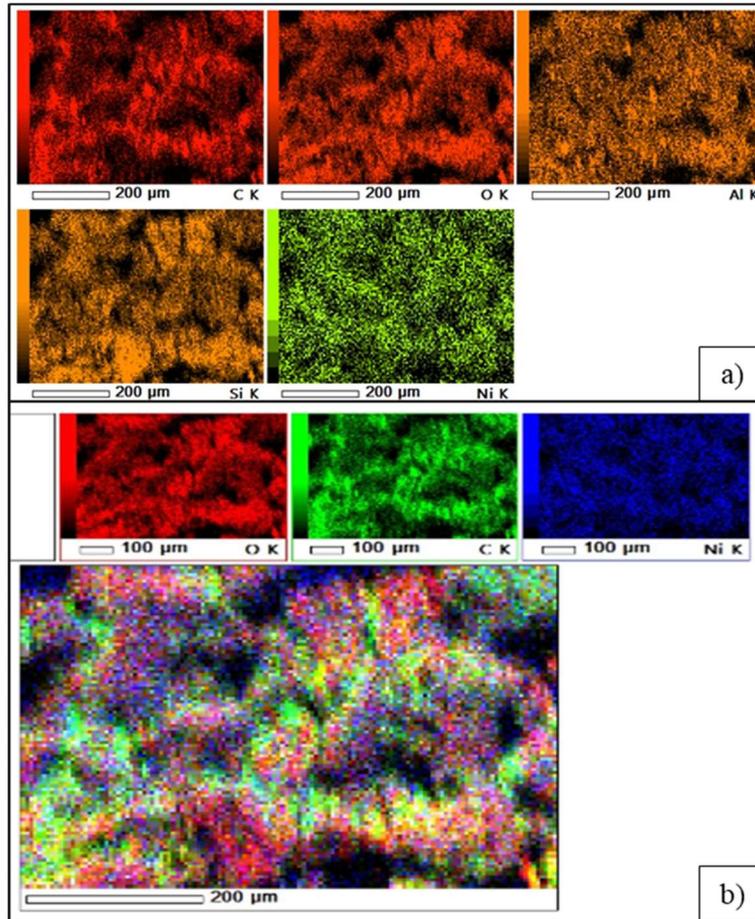


Figura 4.46. Mapa dos elementos encontrados no SP\_5% (a) Elementos principais; (b) União desses elementos.

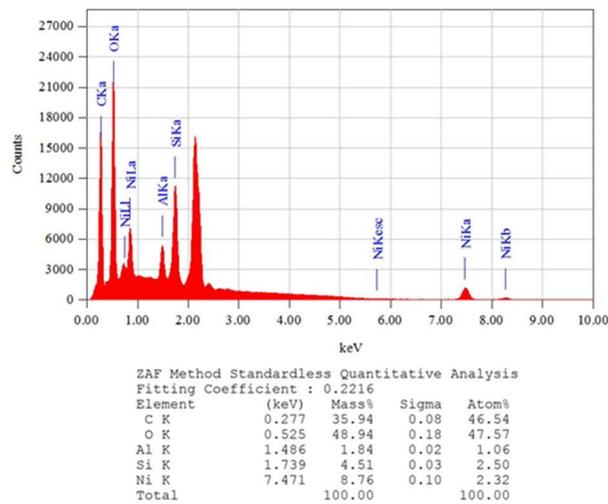


Figura 4.47. EDS do compósito SP\_5%.

O ensaio de EDS e os mapas de elementos foram feitos para confirmar o que foi encontrado pelo ensaio de DRX. A grande diferença é que o DRX realizado encontra elementos químicos na forma de minerais, para classificá-los geologicamente, enquanto o EDS faz

varredura de elementos químicos constituintes na amostra. Assim, conclui-se que apesar da interpretação dos dados, há os mesmos elementos químicos.

#### 4.4.2. Espectrometria de Florescência de Raios X (XRF/EDX)

Na Figura 4.48 mostra-se o estudo de alguns possíveis elementos químicos constituintes do polímero e nas Figura 4.49(a – b) apresem-se as análises de alguns possíveis elementos químicos constituintes das amostras SP\_2,5% e SP\_5%, respectivamente.

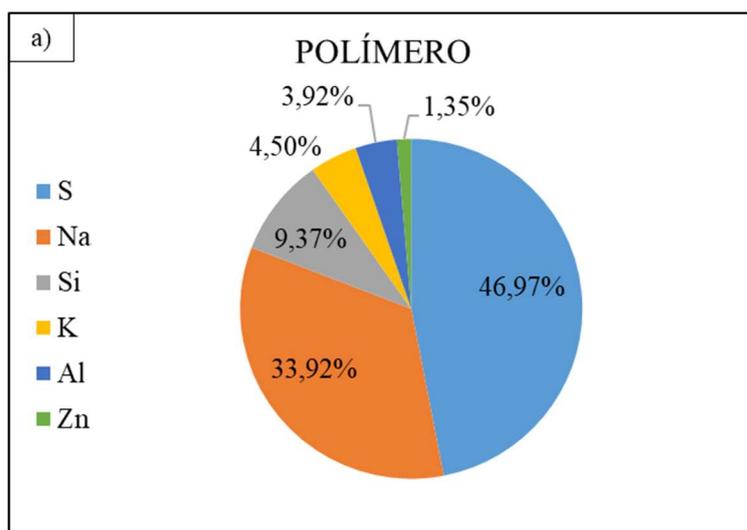


Figura 4.48. Resultados da Espectrometria de Florescência de Raio-X do Polímero;

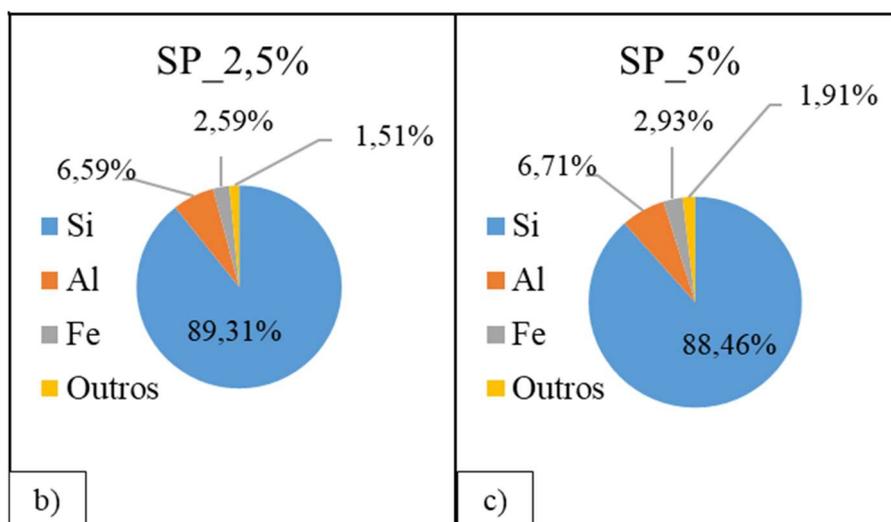


Figura 4.49. Resultados da Espectrometria de Florescência de Raio-X (b) SP\_2,5%; (c) SP\_5%.

No polímero utilizado percebe-se uma gama de elementos químicos, contudo esses elementos nos polímeros normalmente advêm dos processos de polimerização, e são considerados traços na amostragem total. Nos resultados apresentados no item 4.3.1, apenas

identificou-se alumínio e silício, que também são elementos comuns do solo. Nas amostras SP\_2,5% e SP\_5% os elementos identificados foram os mesmos, e com porcentagens muito próximas. Pode-se dizer que não há uma alteração elementar, ou seja, química, na ação do polímero com o solo estudado. O que reforça, que a estabilização é uma estabilização química por usar um elemento químico no melhoramento, mas a ação do polímero nesse tipo de solo é física.

#### 4.4.3. Análise Elementar CHN

A análise elementar CHN é realizada com materiais líquidos para identificação desses três elementos, que são básicos em diversos materiais, mas principalmente em elementos poliméricos. Na Figura 4.50 está representado um gráfico que identifica grande quantidade de carbono na amostra e praticamente o restante de hidrogênio. Ambos elementos são essenciais das cadeias carbônicas e as cadeias carbônicas são a base de qualquer polímero. Logo, o elemento analisado, em sua constituição é formado por tais elementos, o que, mostra que o material em contato com a natureza não gerará influências negativas. Os elementos que foram identificados na espectrometria não estão presentes na cadeia polimérica em si, mas advindos dos processos para a formação desse polímero.

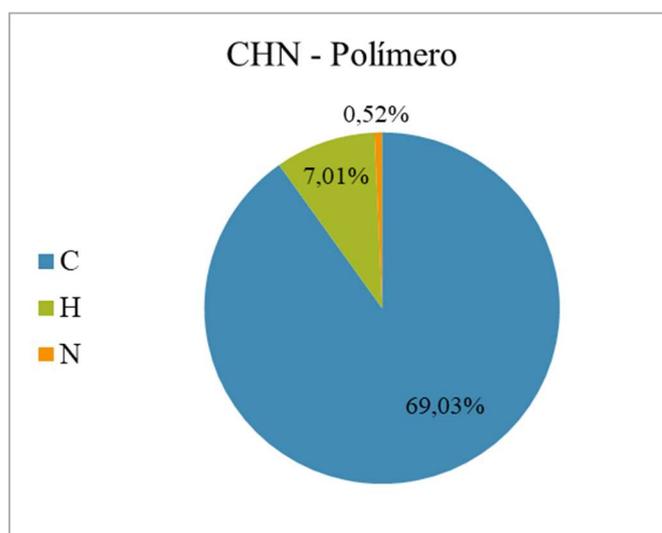


Figura 4.50. CHN do polímero.

#### 4.4.4. Análise do Lixiviado

Na Tabela 4.16 compila-se os resultados de elementos que, caso existam em excesso no lixiviado, podem ser perigosos para contaminação da flora, fauna e de humanos, bem como os elementos que foram identificados nas outras análises realizadas. Qualquer contaminação que possa ocorrer será por meio de processos de infiltração. A água ao entrar em contato com o compósito o infiltrará e carreará a possível contaminação. Tal processo pode ser chamado de lixiviação. Essa água foi recolhida e analisada quimicamente.

Tabela 4.16. Resultado das análises do Lixiviado dos compósitos SP\_2,5% e SP\_5%.

Análises	SP_2,5%	SP_5%
pH	8,8	9,0
Nitrogênio Total (mg.L <sup>-1</sup> )	2,39	3,09
Ferro (mg.L <sup>-1</sup> )	<0,1004	<0,1004
Manganês (mg.L <sup>-1</sup> )	<0,1004	<0,1004
Cobre (mg.L <sup>-1</sup> )	<0,1000	0,1091
Alumínio (mg.L <sup>-1</sup> )	0,6110	0,6660

Avaliando os dados do lixiviado à luz da resolução CONAMA 420 a qual, no anexo II, determina valores máximos permitidos e orientadores para solo e para águas subterrâneas, os valores máximos permitidos (VMP) de cobre dissolvido em águas subterrâneas é 2 mg/L e ambas amostras ficaram com valores inferiores. Outro elemento descrito na norma é o alumínio sendo seu VMP de 3,5 mg/L, os valores dos dois compósitos estiveram inferiores ao estabelecido em norma. O último elemento citado na resolução é o manganês e o VMP é de 0,4 mg/L existindo coerência com o valor encontrado para ambos compósitos. Deve-se pontuar que o VMP do manganês está ligado a risco à saúde humana no seu consumo, não à contaminação direta dos elementos naturais.

Tratando o lixiviado como um efluente de uma fonte poluidora utiliza-se a resolução CONAMA 430 na seção II no artigo 16º em que há a determinação das condições e padrões de lançamento de efluentes de qualquer fonte poluidora diretamente no corpo receptor. Assim, ao se analisar todos elementos de ambos lixiviados pode-se, de acordo com a resolução, ter condição de lançamento direto corpo hídrico.

A NBR 10.004 (ABNT, 2004) estabelece normativas de resíduos sólidos. No anexo F estabelece os valores máximos de concentração obtido em ensaios de lixiviado. O VMP de todos elementos encontrados ficou de acordo com os limites descritos na norma.

O solo estudado, que passou pelo processo de estabilização, advém da região do Jalapão que é uma área de preservação ambiental. Destarte, o uso do polímero não causará problemas ambientais pela sua aplicação na região, tanto para aplicações em aterros e taludes, quanto para aplicação como base ou revestimento em camadas de pavimentos.

## 4.5. Caracterização Microestrutural

Nos itens 4.5.1 e 4.5.2 apresentam-se as imagens obtidas pela microscopia ótica e MEV e as respectivas análises

### 4.5.1. Microscopia Ótica

Nas Figura 4.51(a – f) mostram-se imagens obtidas por microscopia ótica do solo no seu estado natural e das partes externas e internas de ambos compósitos.

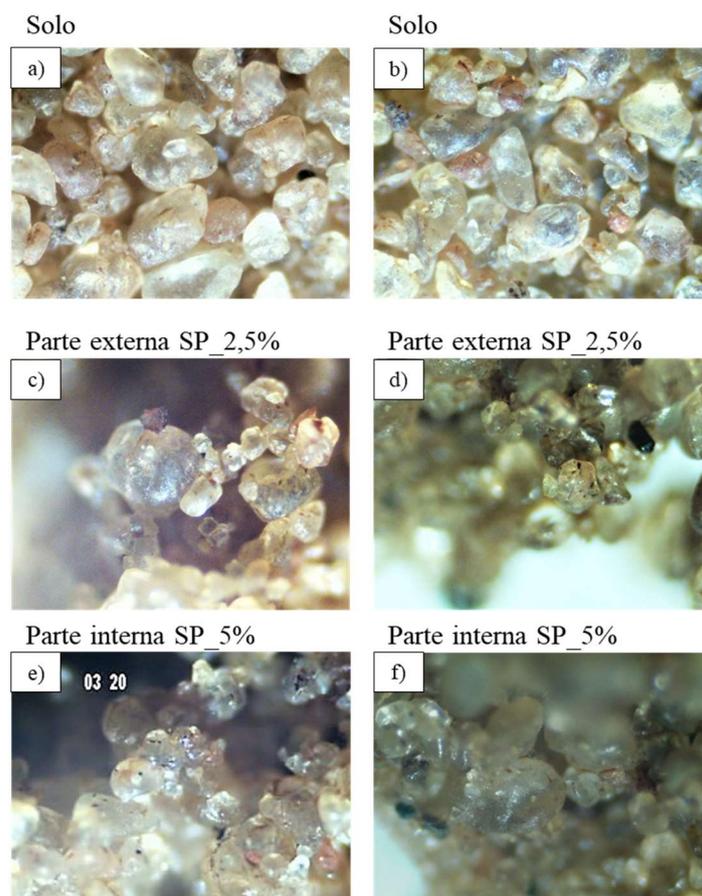


Figura 4.51. Imagens obtidas por microscopia ótica (a) Solo; (b) Solo; (c) Parte externa do SP\_2,5% com 15 dias de cura; (d) Parte externa SP\_5% com 15 dias de cura; (e) Parte interna do SP\_2,5% com 15 dias de cura; (f) Parte interna SP\_5% com 15 dias de cura.

A imagem do solo em seu estado natural mostra estruturas claras e com bordas bem definidas, grãos de diversos tamanhos com predominância de grãos arredondados e angulares.

Pelas imagens obtidas pelo microscópio ótico já se percebe a união dos grãos de solo ao se adicionar o polímero, também é possível ver que a um aspecto mais reluzente nos grãos, similar a uma cola ou película que envolva os grãos.

Na parte que representa a capa externa do compósito vê-se os grãos mais unidos e com menor quantidade de vazios que na parte interna, isso para ambas dosagens. SP\_5% aparenta ter maior união dos grãos que SP\_2,5%.

#### 4.5.2. Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

Nas Figura 4.52(a – d) apresentam-se as imagens obtidas pela microscopia de varredura eletrônica do solo estudado.

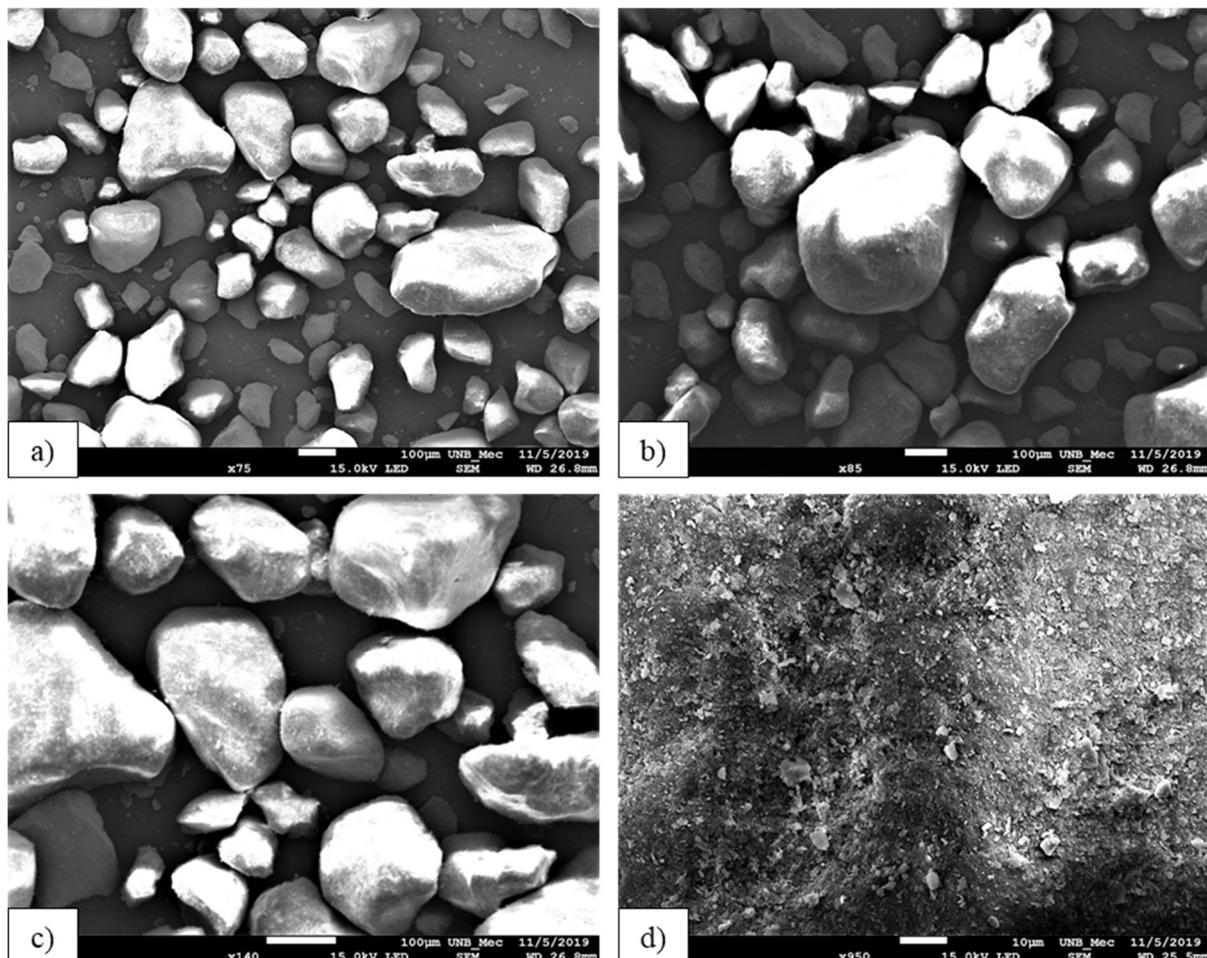


Figura 4.52. Imagens obtidas por MEV (a) Solo com aumento de 75 vezes; (b) Solo com aumento de 85 vezes; (c) Solo com aumento de 140 vezes; (d) Solo com aumento de 950 vezes;

Pode-se observar pelas Figura 4.52(a – c) que os grãos são soltos, pouco angulares e com diversos tamanhos, mas com uma predominância de grãos menores. Não se observa algum elemento que una os grãos, os menores ficam perto dos maiores, como se ocupassem esses espaços. A Figura 4.52(d) está com um aumento de 950x sobre a superfície de um grão, conseguimos visualizar certa irregularidade na superfície, não se observa vazios entre os grãos.

Já nas Figuras Figura 4.53 – Figura 4.56 são mostradas as imagens obtidas pela microscopia de varredura eletrônica do compósito SP\_2,5 %.

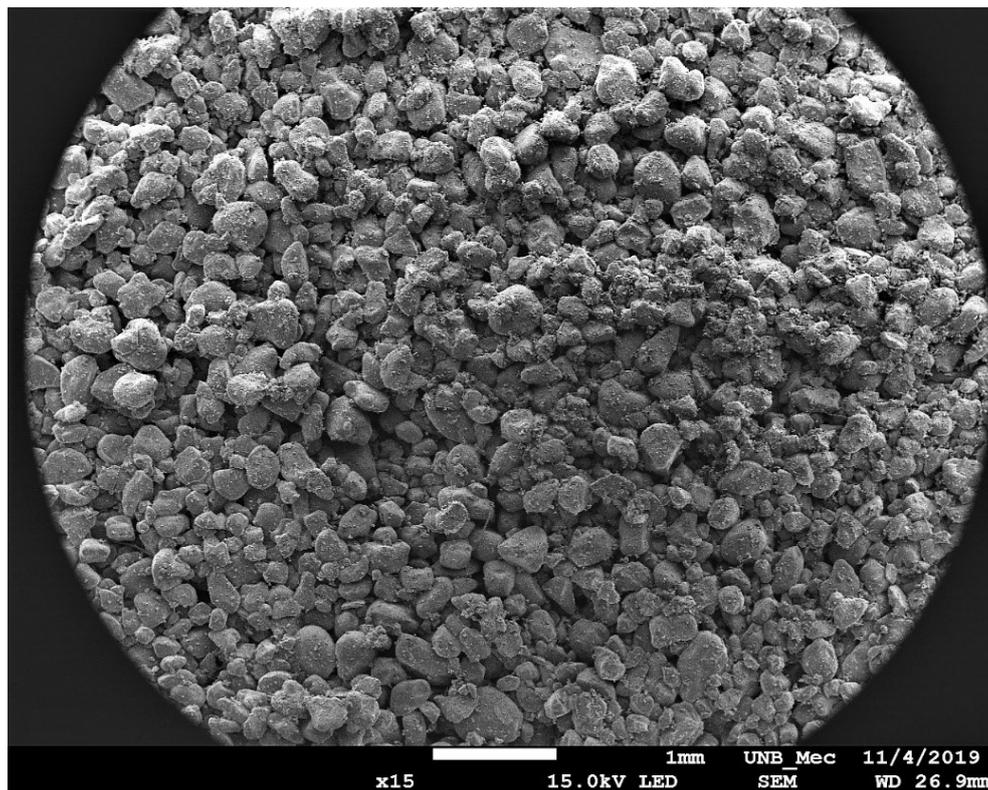


Figura 4.53. MEV do compósito SP\_2,5% com aumento de 15 vezes.

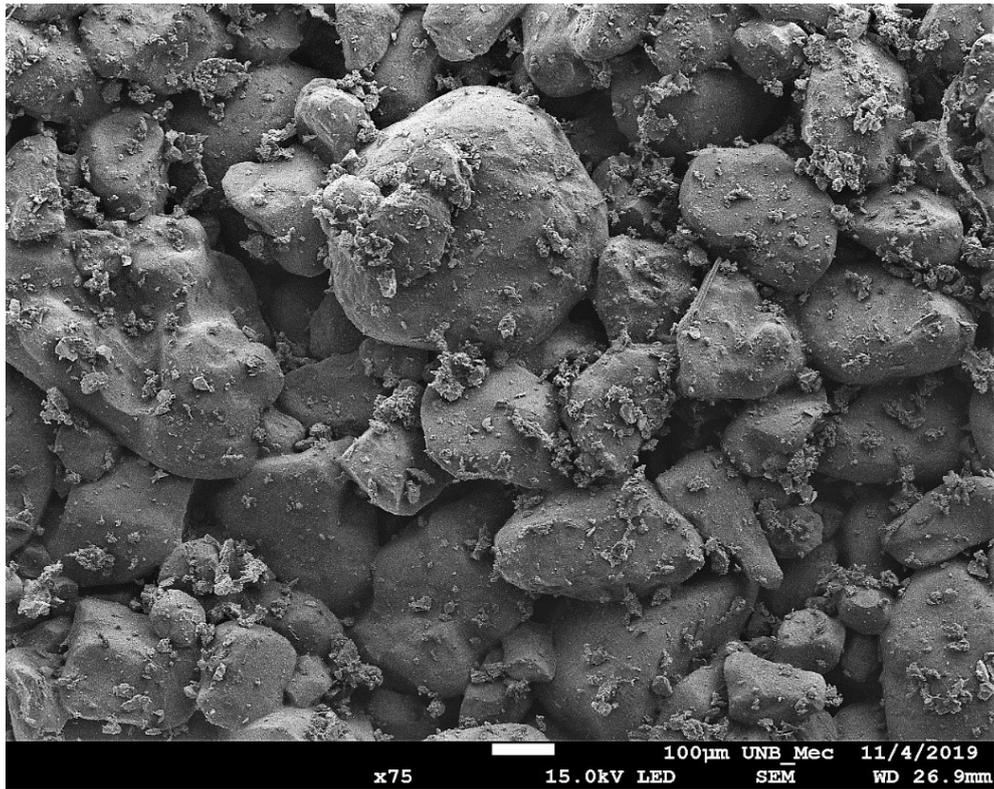


Figura 4.54. MEV do compósito SP\_2,5% com aumento de 75 vezes.

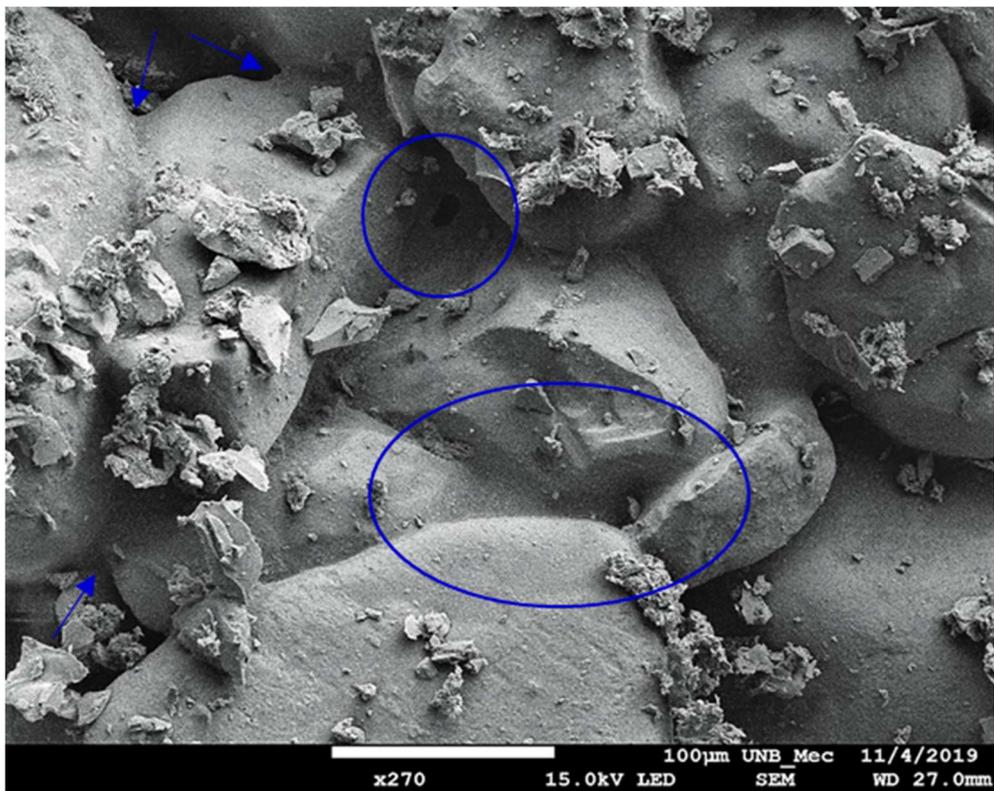


Figura 4.55. MEV do compósito SP\_2,5% com aumento de 270 vezes. Verifica-se união dos grãos de solo (em azul).

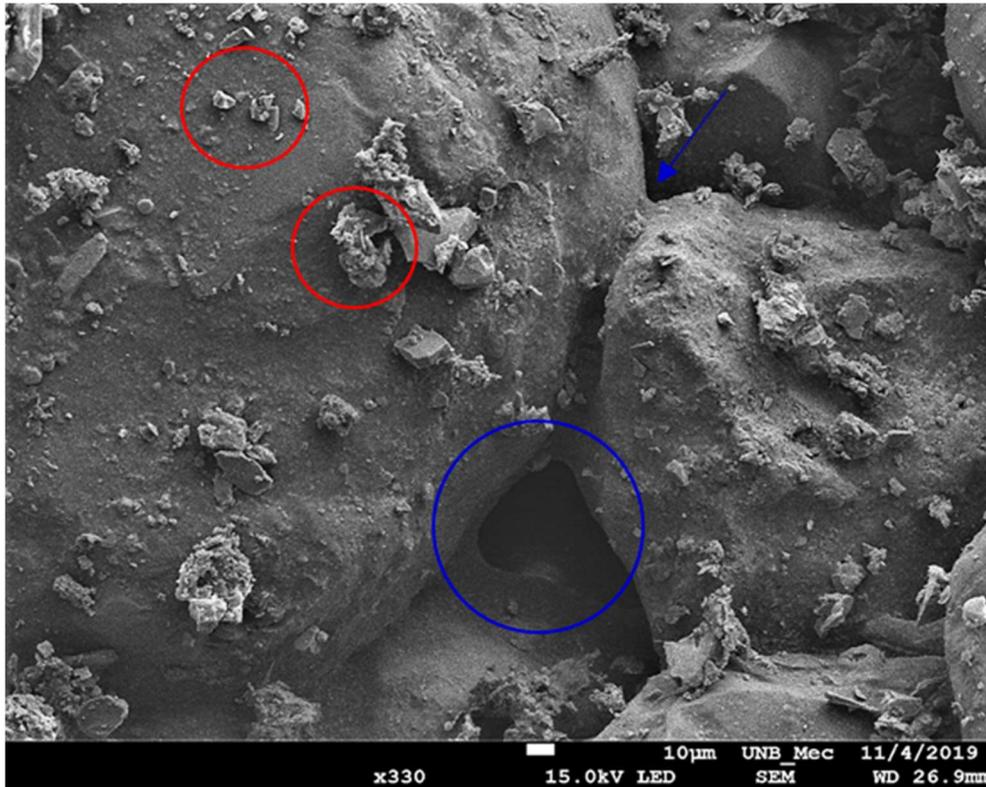


Figura 4.56. MEV do compósito SP\_2,5% com aumento de 330 vezes. Verifica-se união dos grãos de solo (em azul) e polímero nas superfícies dos grãos (em vermelho).

Pela Figura 4.53 é possível observar, com aumento de 15 vezes, que os grãos de solo aparentam estar mais unidos. Consegue-se, nesse tipo de imagem, ver com profundidade. Observa-se que há união entre partículas em toda a superfície. Na Figura 4.54, com 75 vezes de aumento, percebe-se melhor essa união das partículas.

Na Figura 4.55, com 270 vezes de aumento, em azul se ressaltam as uniões entre as partículas do substrato. Em certos grãos não vemos os limites do grão, o que se vê é uma união entre as partículas. Também, onde há indicativo das setas azuis, percebe-se um menisco que une as partículas e em certos momentos esses meniscos se unem e deixam pequenos vazios. Acredita-se que essas uniões e meniscos advêm do acréscimo do polímero.

Na Figura 4.56, com aumento de 330 vezes, é ressaltado em vermelho partículas sobre os grãos, como já exposto, elas são os polímeros. As setas azuis ressaltam os meniscos que unem os grãos, enquanto o círculo azul destaca uma estrutura que advém do polímero e, com o tempo de cura, fica externa aos grãos unindo e causando a cimentação entre partículas.

Nas Figuras Figura 4.57 – Figura 4.60 são apresentadas as imagens obtidas pela microscopia de varredura eletrônica do compósito SP\_5%.

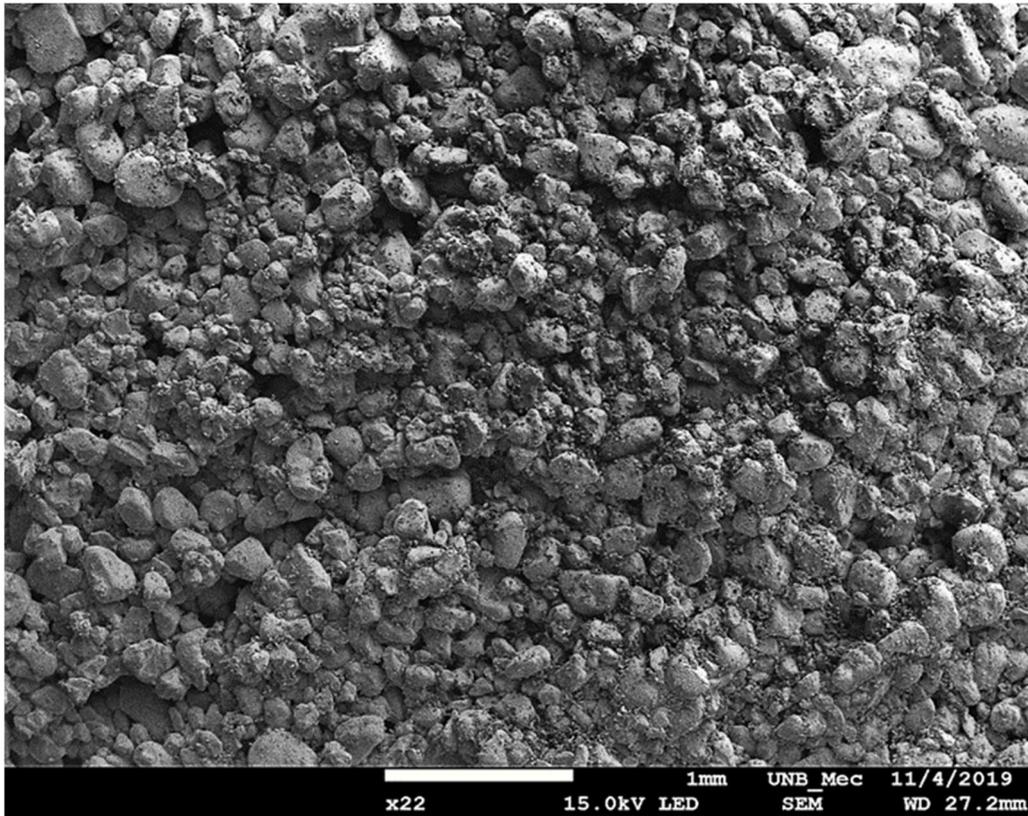


Figura 4.57. MEV do compósito SP\_5% com aumento de 22 vezes.

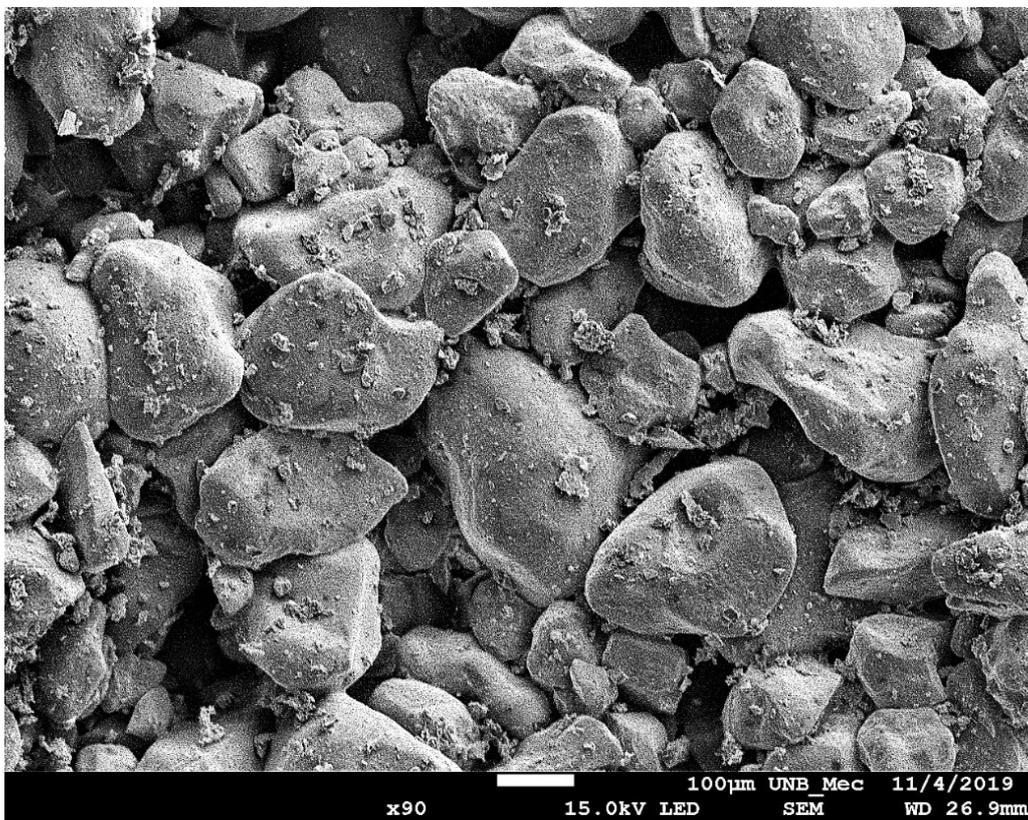


Figura 4.58. MEV do compósito SP\_5% com aumento de 90 vezes.

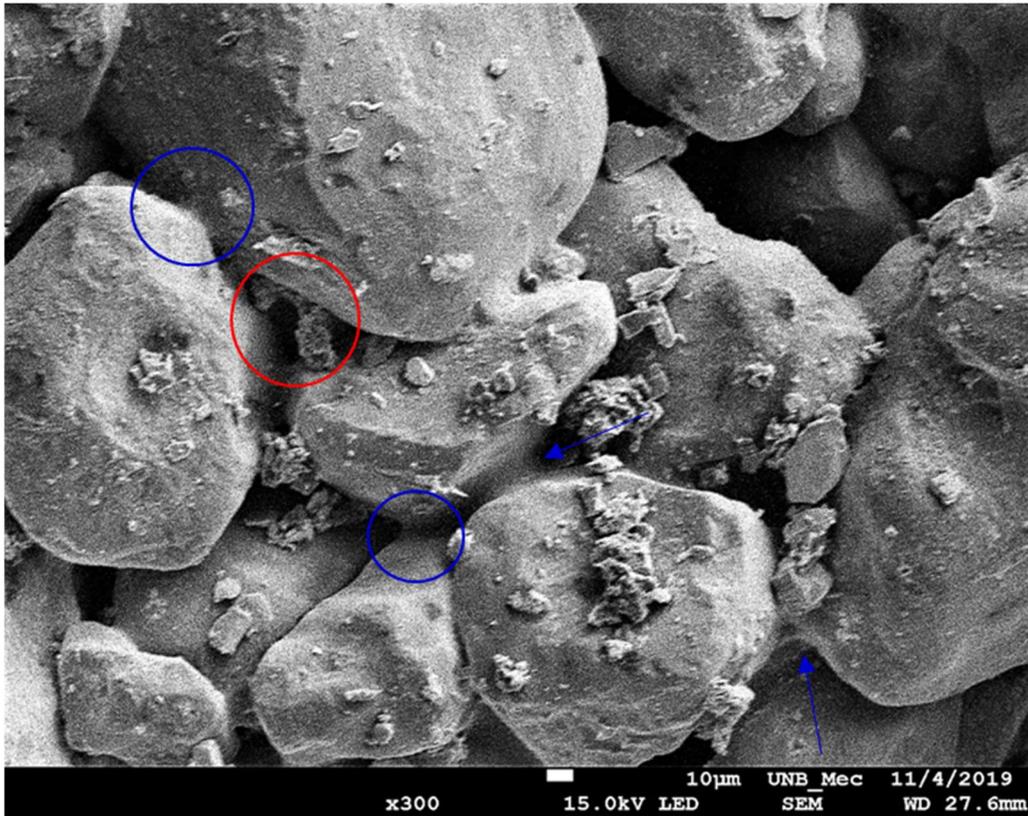


Figura 4.59. MEV do compósito SP\_5% com aumento de 300 vezes. Verifica-se união dos grãos de solo (em azul) e polímero nas superfícies dos grãos (em vermelho).

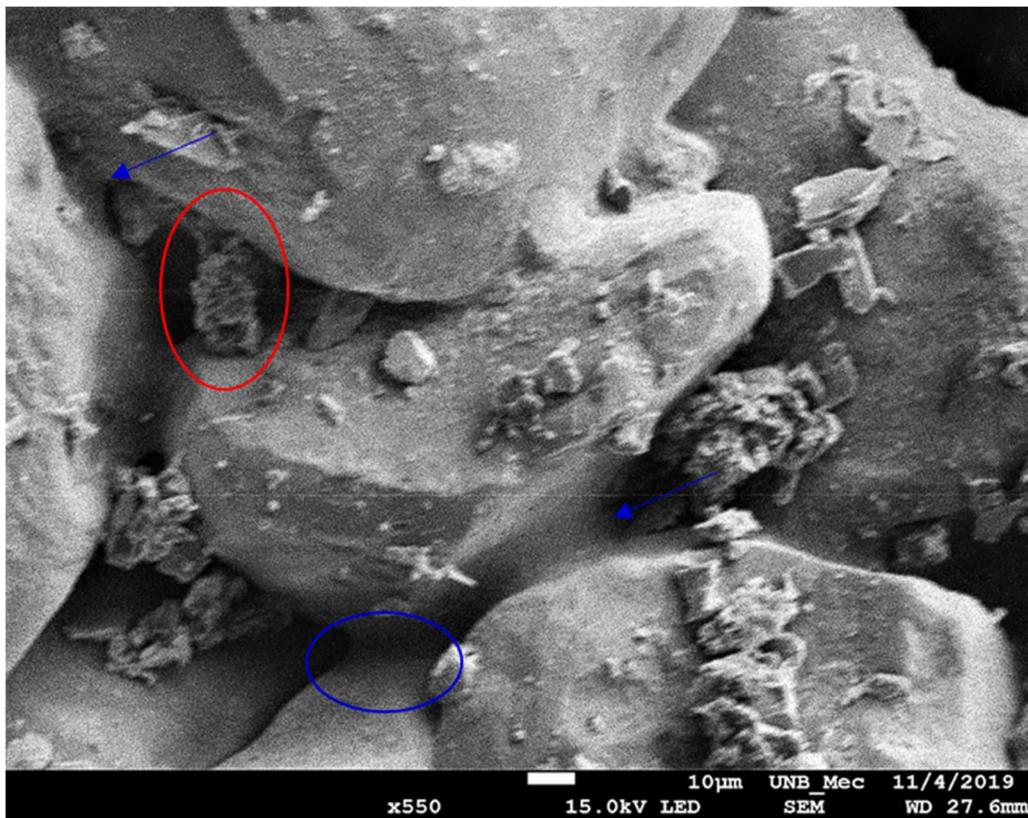


Figura 4.60. MEV do compósito SP\_5% com aumento de 550 vezes. Verifica-se união dos grãos de solo (em azul) e polímero nas superfícies dos grãos (em vermelho).

Pela Figura 4.57 é possível observar, com aumento de 22 vezes, que os grãos de solo aparentam estar ainda mais unidos e percebe-se camadas de grãos cimentadas em toda superfície. A Figura 4.58, com 90 vezes de aumento, é possível ver uma maior união das partículas e o mesmo material sobre as partículas de solo.

Na Figura 4.59, com 300 vezes de aumento, em azul SE ressalta as uniões entre as partículas do substrato. Como na Figura 4.56, observa-se meniscos que unem as partículas e em alguns grãos não se percebe os limites, mas o menisco parece que está mais fino e mais côncavo que SP\_2,5%. Destacado em vermelho um material que, além de aparecer na parte superior dos grãos, começa a aparecer entre os grãos. Acredita-se que por esse aparecimento entres os grãos de solo e agindo como um elemento cimentante, foi identificado, no DRX para o compósito SP\_5%, a gibbsita e a hematita. A hematita também aparece no compósito SP\_2,5%.

Na Figura 4.60, com aumento de 550 vezes, percebe-se um afinamento dos meniscos e aumento do côncavo que formam, associa-se a essa alteração pelo aumento da quantidade de polímero no compósito, o que justifica a cimentação e o aumento do intercepto coesivo observado nos resultados.

#### **4.6. Considerações Finais sobre Resultados Obtidos**

A pesquisa realizada uniu análises mecânicas (estáticas e dinâmicas), ambientais, químicas e microestruturais de um compósito solo+polímero com duas dosagens e para diferentes tempos de cura. O solo estudado passou por processo de melhoramento, e os compósitos formados visam a aplicação geotécnica (taludes, aterros e pavimentação).

A aplicação de polímero como estabilizante químico, ao invés dos materiais tradicionalmente utilizados, mostrou bons resultados nas diferentes análises, as quais atestam a aplicação desse produto como agente de estabilização.

O solo advém de uma área de proteção ambiental, e por essa razão, qualquer obra de infraestrutura possui a legislação ambiental como barreira para implantação do empreendimento. A utilização desse material, polímero, nas dosagens estudadas, mostra-se tecnicamente viável e ambientalmente amigável.

Essa solução polimérica adquiriu bons resultados para aplicação como camada de revestimento em estradas vicinais, não pavimentadas, da região. Ou seja, mostrou-se ser de uso adequado para aplicação em rodovias vicinais como substituto de misturas asfálticas. Além dos

bons valores de resistência (e baixo desgaste superficial) não se verificou elementos nocivos ao ambiente no material lixiviado. Consequentemente, como o compósito é um material de menor agressividade ao meio ambiente, ressalta-se que aplicação desse material como estabilizante não leva à impermeabilização das áreas de acesso, estradas, o que permite a manutenção ambiental e sua aplicação incorre em um menor dano à biodiversidade local.

Há melhora na resistência ao cisalhamento dos compósitos quando comparados com o solo sem melhoramento. Assim, a aplicação da solução polimérica em taludes e aterros mostra-se interessante, os compósitos tiveram aumento do intercepto coesivo e ângulo de atrito, desde o segundo dia de cura.

Os resultados encontrados corroboraram com o exposto em literatura, para compósitos solo-polímero, e com normas e legislações que utilizam cal ou cimento como agentes estabilizantes, assim mostrando o polímero como uma solução para estabilização de solo.

# CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

## 5.1. Conclusões

A partir dos resultados expostos e analisados chegou-se as seguintes conclusões:

- O solo estudado advém de uma área de proteção ambiental a qual não se permite grandes obras de pavimentação e taludes, o que dificulta os acessos na região. O solo é arenoso, tipo A-3 pela classificação HRB, não plástico (NP) e SP pela classificação SUCS. Por essas características e pela análise microestrutural, é possível afirmar que é um solo sem elementos cimentantes naturais, conferindo comportamento de solo granular;
- No geral a adição de polímero ao solo estudado foi positiva, para todas as aplicações estudadas. A adição da solução polimérica no solo, em duas dosagens 2,5% e 5%, conferiu ganho de cimentação e coesão ao substrato;
- Pelos resultados de compactação verificou-se uma alteração do comportamento das curvas com a inserção do polímero, em ambas dosagens, além de um aumento da massa específica seca, mas pouca redução da umidade ótima. Contudo, por se trabalhar com solução polimérica há redução da quantidade de água total adicionada;
- Pela análise dos resultados de cisalhamento direto nos compósitos, para ambas dosagens estudadas, o aumento do tempo de cura ocasiona a melhora dos parâmetros de resistência, tanto do intercepto coesivo quanto do ângulo de atrito;
- As curvas dos ensaios de compressão simples para o compósito com 2,5% de polímero tiveram um pico de resistência nítido e um bom comportamento pós-pico, não percebendo tanta queda e com esses valores superiores ao solo sem melhorado, para todos tempos de cura estudados. Já nas curvas solo-polímero com 5% o comportamento no pós-pico foi melhor, não se verificando um pico nítido. Os valores de resistência obtidos para solo-polímero se aproximaram de valores para solos melhorados com cimento ou cal reportados na literatura;
- Os valores de módulo de resiliência para aplicação dos compósitos como base de pavimentos para ambas dosagens estudadas mostraram-se reduzir com o aumento do

tempo de cura, mesmo assim os valores de módulo resiliente se apresentaram superiores quando comparados com o solo sem o aditivo;

- Avaliou-se os compósitos com relação ao módulo de resiliência indicado para misturas asfálticas, mostrando bom comportamento e bons resultados, assim os compósitos estudados podem ser utilizados como camada de revestimento em vias não pavimentadas. Em que valores encontrados são compatíveis com CBUQ;
- Verificou-se uma redução da permeabilidade para ambos compósitos, quando comparado ao solo arenoso puro, pelo fato de a solução polimérica ocupar os espaços vazios entre os grãos. Não houve expansão nos compósitos estudados;
- Descartou-se o ganho de resistência dos compósitos por ação de um possível aumento da sucção para maiores dias de cura, pois a sucção ficou praticamente constante ao longo de 30 dias de ensaio nos compósitos, e estes apresentaram valores de sucção próximos ao solo arenoso sem o aditivo;
- Pelas análises químicas, ambientais e mineralógicas, conclui-se que a adição do polímero com o solo não levou a uma alteração química dos elementos presentes no solo, mas houve reações químicas no processo de cura do material. A ação do polímero ocasiona o aumento de rigidez do compósito pelo contato ao ar, sendo está uma reação química comum de qualquer tipo de cola, por exemplo, onde o oxigênio é o elemento catalisador para o endurecimento do material;
- No contexto ambiental, pela análise do lixiviado não houve valores de elementos químicos em excesso que possam contaminar lençóis freáticos, fauna, flora e população.
- Pela caracterização microestrutural é visível a ação do polímero como agente cimentante dos grãos, formando uma película nos grãos e os unindo. Com o aumento do tempo de cura, nos ensaios mecânicos, essa união dos grãos levou à melhora dos valores de resistência dos compósitos;
- Os compósitos tiveram bom comportamento para os ensaios estáticos e cíclicos. Nos ensaios cíclicos houve redução ao invés de aumento com o passar do tempo de cura, o que ocorreu nos ensaios estáticos, porém os resultados, apesar disso são superiores ao solo sem melhoramento;
- Pelas análises e estudos realizados na pesquisa, pode-se concluir que há viabilidade técnica para aplicação da solução polimérica, para ambas dosagens, em obras geotécnicas (como pavimentação, taludes e aterros). Em geral o teor de 5% possuiu

melhores resultados, contudo para aplicação em aterros e taludes o teor de 2,5% resulta em bons resultados. A dosagem de 5% é recomendada para obras de pavimentação;

- A área do solo estudado é uma área de preservação, para a aplicação do compósito como camada de revestimento em uma estrada vicinal, aconselha-se o uso do teor de 5%. Apesar de ser o dobro da taxa usual, os resultados dos estudos dinâmicos foram superiores e o valor da deformação permanente corrobora para essa afirmação, e o interior dos corpos de prova com 5% estava todo seco, rígido, o que não ocorreu no 2,5%, em que parte do solo estava solto.

## **5.2. Sugestões para Trabalhos Futuros**

São listadas as sugestões para próximos trabalhos nesta mesma linha de pesquisa:

- Avaliação de novas dosagens de polímero, mais intermediárias dentre as estudadas para esse tipo de solo e para estudo em outros tipos de solo também;
- Estudar o comportamento do polímero em outros materiais, como rejeitos de mineração;
- Estudo de parâmetros de dosagem dos compósitos para diferentes tipos de solos e teores de polímero;
- Analisar o desgaste do material após maiores tempos de cura e com inundação das placas ensaiadas;
- Avaliar em pista experimental o comportamento real dos compósitos em campo;
- Estudar o comportamento de compósitos solo-polímero à luz da mecânica das fraturas;
- Realizar o dimensionamento de um pavimento a partir de parâmetros obtidos dos compósitos solo-polímero, bem como uma possível modelagem numérica destes;
- Avaliar o comportamento solo-polímero em ensaios em verdadeira grandeza, como por exemplo ensaios de placa com aplicação de cargas estáticas e cíclicas.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

---

AASHTO, American Association of State Highway Transportation Officials (1999). T 307-99-UL: Standard method of test for determining the resilient modulus of soils and aggregate materials.

AASHTO, American Association of State Highway Transportation Officials (2019). T 324-19-Standard Method of Test for Hamburg Wheel-Track Testing of Compacted Asphalt Mixtures.

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas (1992). NBR 12770: Solo coesivo – Determinação da resistência à compressão não confinada – Método de ensaio.

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas (1995). NBR 13292: Solo – Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos granulares à carga constante – Método de ensaio.

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas (2000). NBR 14545: Solo – Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos argilosos à carga variável.

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas (2012). NBR 13555: Solo-Cimento – Determinação da absorção de água – Método de Ensaio.

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas (2016). NBR 6457: Amostras de Solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização.

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas (2016). NBR 6459: Solo – Determinação do limite de liquidez.

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas (2016). NBR 7180: Solo – Determinação do limite de plasticidade.

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas (2016). NBR 7182: Solo – Ensaio de Compactação.

AL-KHANBASHI, A. & EL-GAMAL, M. (2003). Modification of sandy soil using water-borne polymer. *Journal of Applied Polymer Science*, 88(10): 2484–2491.

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, Minas Gerais, Brasil, 7p.

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 (2011). D7369-11: Standard Test Method for Determining the Resilient Modulus of Bituminous Mixtures by Indirect Tension Test.

ASTM, American Society for Testing and Materials (2012). D1557-12e1: Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Modified Effort.

ASTM, American Society for Testing and Materials (2014). D5550: Standard test method for specific gravity of soil solids by gas pycnometer.

ASTM, American Society for Testing and Materials (2016). D6836: Standard Test Methods for Determination of the Soil Water Characteristic Curve for Desorption Using Hanging Column, Pressure Extractor, Chilled Mirror Hygrometer, or Centrifuge.

BAGHINI, M.S., ISMAIL A., NASERALAVI S.S. & FIROOZI A.A. Performance Evaluation of Road Base Stabilized with Styrene-Butadiene Copolymer Latex and Portland Cement. Elsevier, Construction and Building Materials, 2016. 16p.

BALBO, J. T. (2002). Pavimentação – Materiais, suas propriedades e Técnicas Construtivas. Editora USP.

BARRETO, T. M. (2019). Influência da adição de copolímero de butadieno e estireno modificado no comportamento de uma areia. Dissertação de Mestrado, v. XXX, n. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, RJ, 100p

BARRETO, T. M., REPSOLD, L. L. & CASAGRANDE, M. D. T. (2018). Melhoria de solos arenosos com polímeros, 19º Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, Salvador, Bahia, Brasil. 11p

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, v. XIX, n. Programa de Pós-Graduação da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de Brasília, DF, 196 p.

BRAZETTI, R. (1996). Aditivos Orgânicos para Estabilização de Solos. Origem e pesquisas. In: 7a Reunião de Pavimentação Urbana., 1996, São José dos Campos/SP. 7a Reunião de Pavimentação Urbana.

BRITO, L.C. & PARANHOS, H. S. (2017). Estabilização de Solos. Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento. Edição 06. Ano 02, Vol. 01. pp 425-438, Setembro de 2017. ISSN:2448-0959

CANEVAROLO JR., S. V. (2006). Ciência dos polímeros: um texto básico para tecnólogos e engenheiros. Artliber Editora, SP. p. 21-30, p. 42-46, p.120-121.

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.

CARVALHO, L.M.C. & CASAGRANDE, M.D.T. 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, 2019

CASAGRANDE, M. D. T. (2005). Comportamento de solos reforçados com fibras submetidos a grandes deformações. Tese de Doutorado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 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. Geotechnique, 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*. v. 23, n. 4, p. 432-440.

COSTA, W. D. (2012). *Geologia de Barragens*. Oficina de Textos, SP. Cap. 4. p. 57-96.

DNER, Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (1994). 228: Solos – Compactação em equipamento miniatura – Método de ensaio.

DNIT, Departamento Nacional de Infraestrutura e Transportes (2006). *Manual de Pavimentação*. 3.ed. – Rio de Janeiro, 2006. 274p (IPR. Publ., 719).

DNIT, Departamento Nacional de Infraestrutura e Transportes (2010). 143: Pavimentação – Base de solo-cimento – Especificação de Serviço.

DNIT, Departamento Nacional de Infraestrutura e Transportes (2016). 172: Solo – Determinação do Índice de Suporte Califórnia utilizando amostras não trabalhadas.

DNIT, Departamento Nacional de Infraestrutura e Transportes (2018). 134: Pavimentação – Solos – Determinação do módulo de resiliência – Método de ensaio.

DNIT, Departamento Nacional de Infraestrutura e Transportes (2018). 135: Pavimentação Asfáltica – Mistura Asfáltica – Determinação do módulo de resiliência – Método de ensaio.

DNIT, Departamento Nacional de Infraestrutura e Transportes (2018). 136: Pavimentação Asfáltica – Mistura Asfáltica – Determinação da resistência à tração por compressão diametral – Método de ensaio

DNIT, Departamento Nacional de Infraestrutura e Transportes (2018). 180: Mistura Asfáltica – Determinação do dano por umidade induzida.

FORDE, M. (2009) Bitumen properties and test methods. ICE manual of construction materials: volume I/II: fundamentals and theory, concrete, asphalts in road construction, masonry. ICE publishing, Londres. Cap. 23. p. 263-272.

GARCIA, N. F., VALDES, J. R. & CORTES, D. D. (2015). Strength characteristics of polymer-bonded sands. *Géotechnique Letters*, 5(3), 212–216.

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, Brasília, DF, 185 p.

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.

HOLLAWAY, L. (2009). Polymer composites in construction: a brief history. *Engineering and Computational Mechanics* 162(3):107-118

ICMBio, Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade. (2013). *Atlas do Corredor Ecológico da Região do Jalapão*. Governo Brasileiro, Brasil. 2 ed. 87 p.. Disponível em: [http://www.icmbio.gov.br/projetojalapao/images/stories/atlas/AtlasJica\\_2013\\_COMPLETO.pdf](http://www.icmbio.gov.br/projetojalapao/images/stories/atlas/AtlasJica_2013_COMPLETO.pdf). Acessado em: 10 jan. 2020.

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, EUA.
- LAM, C. & JEFFERIS, S. A. (2018) Introduction to polymers and polymers fluids. Polymer support fluids in civil engineering. ICE publishing, Londres. Cap. 3. p. 29-53. ISBN: 978-0-7277-5786-9
- LAMBE, T. W. (1952). Summary of the Conference on Soil Stabilization. Proceedings on Conf. on Soil Stabilization. Massachusetts, EUA.
- 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) 11 2
- 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*, v. 36, p. 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. 3° Pan-American Conference on Geosynthetics, Miami, Florida, 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*, Volume 2 Issue 61 Pages 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, Gestão das Unidades de Conservação do Tocantins, Governo do Estado de Tocantins. 14p. Disponível em: [\[http://gesto.to.gov.br/site\\_media/upload/gestao/documentos/Marinho\\_et\\_al\\_Degradacao\\_a\\_m\\_biental\\_causada\\_pelo\\_desenvolvimento\\_turistico\\_na\\_cachoeira\\_do\\_formiga\\_Jalapao.pdf\]](http://gesto.to.gov.br/site_media/upload/gestao/documentos/Marinho_et_al_Degradacao_a_m_biental_causada_pelo_desenvolvimento_turistico_na_cachoeira_do_formiga_Jalapao.pdf). Acessado em: 10 de jan. 2020.
- MEDINA, J. & MOTTA, L. M. G. (2004). Apostila de estabilização de solos. Escola de Engenharia, UFRJ, Rio de Janeiro-RJ: UFRJ.
- MEDINA, J. & MOTTA, L. M. G. (2015). *Mecânica dos Pavimentos*. 3 ed. Rio de Janeiro – RJ. Editora Interciência, 2015. 638p.
- MILLARD, Ray. (1993). *Roads Bulding in tropics – State of arts review nº9*. Londres.
- MURRAY, G.E. (1952). Soil Stabilization by chemical means. Proceedings on Conf. ou 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. (No. TRH 13). Pretória, África do Sul. Committee of State Road Authorities, 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, Minas Gerais, Brasil. 7 p.
- PALMEIRA, E. M. (2018). Introdução aos polímeros. Geossintéticos em geotecnia e meio ambiente. *Oficina de Textos*, SP. Cap. 2. p. 17-25.
- 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, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, RJ, 103 p.
- PINTO, C. S. (2006). Curso Básico de Mecânica dos Solos. *Oficina de Textos*, São Paulo, SP, 367 p.
- PINTO, S. (1991). Estudo do comportamento à fadiga de misturas betuminosas e aplicação na avaliação estrutural de pavimentos. Tese de Doutorado. Coordenação dos Programas de Pós-Graduação de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, RJ, 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.
- REZENDE, L. R. de (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, 372p.
- REZENDE, L. R. de, 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. doi:10.1080/14680629.2015.1055334
- ROQUE, P. F. B. (2017). Uso de materiais alternativos para melhoria de solos em pavimentação. Tese de Doutorado, Publicação nº G.DM 131/17, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 141 p.
- 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, 2010. Gramado. *Anais Eletrônicos: 8ª Palestra (PA08)*, 2010.
- SANTOS, M., LIMA, D., BUENO, B. (1995). Estabilização dos solos com cal e betume. In: 6º Reunião de pavimentação urbana, pp.74 – 97, Santos – São Paulo, Abril, 1995.
- SEPLAN (2003). Plano de Manejo da APA do Jalapão. Governo do Estado de Tocantins. Palmas – TO. 209p.
- 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, Lisboa. 10 p.
- SILVEIRA, M. V, CALHEIROS, A. V. & CASAGRANDE, M. D. T. (2018). Applicability of 'ASCE.

- 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*, v. 35, n. 4, p. 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*, v. 41, p. 361-368.
- SPERLIND, L. H. (2006) *Introduction to Physical Polymer Science*, 4th edn. Wiley, New York, NY, USA. Cap. 1. p. 1-26, Cap. 2. p. 29-67.
- TINGLE, J. et al. (2007). Stabilization mechanisms of nontraditional additives. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, n. 1989, p. 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, 4 p.
- USDT, United States Department of Transportation (2014-DRAFT). *Advisory Circular. Standards for Specifying Construction of Airports*. AC No. 150/5370-10G.
- VARGAS, M. (1977). *Introdução à Mecânica dos Solos*. MCgraw-Hill do Brasil. São Paulo, SP. 509p.
- VILLIBOR, D. F. (1982). *Estabilização Granulométrica ou Mecânica*. GRÁFICA EESC – USP, São Carlos, SP.
- VIZCARRA, G. O. C., CASAGRANDE, M. D. T. & da MOTTA, L. M. G. (2014). Applicability of municipal solid waste incineration ash on base layers of pavements. *Journal of Materials in Civil Engineering*. ASCE.
- WILLIS, E. A. & CARPENTER, C.A. (1939). Studies of Water Retentive Chemicals as Admixtures with No. Nonplastic Road-Building Materials, *PUBLICS ROADS*, Vol. 20, 9.
- WOODRING, P. W. (1952) Requirements and Experience in Expeditious Military Soil Solidification. Proceedings of the Conference on Soil Stabilization. Massachusetts, EUA.
- 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.
- YEO, Y. S., JITSANGIAM, P. & NIKRAZ, H. (2011). Mix Design of Cementitious Basecourse. *International Conference on Advances in Geotechnical Engineering (ICAGE 2011)*, Nov 7-9 2011. Pp 379-385. Perth, W.A.: Curtin University, Department of Civil Engineering.
- 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.