



Thiago Manes Barreto

**Influência da Adição de Copolímero de Butadieno e
Estireno Modificado no Comportamento Mecânico de uma
Areia**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação
em Engenharia Civil da PUC-Rio como requisito parcial
para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil.

Orientadora: Prof^a. Raquel Quadros Velloso
Coorientadora: Prof^a. Michéle Dal Toé Casagrande

Rio de Janeiro
Fevereiro de 2019

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da autora, dos orientadores e da universidade.

Thiago Manes Barreto

Graduou-se em Engenharia Civil pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), em novembro de 2016. Ingressou no mestrado na Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro em agosto de 2016, desenvolvendo dissertação na linha de pesquisa de Geotecnia Experimental aplicada ao melhoramento de solos arenosos.

Ficha Catalográfica

Barreto, Thiago Manes

Influência da Adição de Copolímero de Butadieno e Estireno Modificado no Comportamento Mecânico de uma Areia/ Thiago Manes Barreto; orientadora: Raquel Quadros Velloso; coorientadora: Michéle Dal Toé Casagrande – Rio de Janeiro: PUC, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, 2019.

v., 100 f.: il. ; 29,7 cm

Dissertação (mestrado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, 2019.

Inclui referências bibliográficas.

1. Geotecnia – Teses. 2. Engenharia Civil – Teses. 3. Solo Melhorado;. 4. Polímero de Butadieno e Estireno;. 5. Comportamento Mecânico;. 6. Análise Geotécnica.. I Velloso, Raquel Quadros. II Casagrande, Michele Dal Toé. III Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental. IV Título.

CDD:

À memória de minha avó, Didi, e de minha bisavó, Maria Angélica Galvão Sampaio, exemplos de pessoa. Aos meus avós, Bel e Tita, Henrique, aos meus pais, Luiz e Sandra, à minha irmã Luiza e à minha namorada Luise.

Agradecimentos

À Deus, por me dar forças em todos os momentos, desde o início da minha vida, estando ao meu lado em todos os momentos de dificuldade, me segurando e me ajudando a seguir em frente.

Aos meus pais e a minha irmã, que foram fundamentais no meu processo de formação, como pessoa e como engenheiro civil. Investiram na minha educação, mesmo nos momentos de mais dificuldade, me proporcionando um ensino de qualidade, necessário para chegar onde estou.

Aos meus avós, Bel e Tita, Henrique e Didi pelo carinho e pela ajuda na minha formação, serei eternamente grato. Além de estarem sempre presentes, mesmo nos momentos mais conturbados da minha jornada, ao longo desses vinte e seis anos.

A minha namorada Luise, pelo apoio durante todo esse mestrado, e por todo o tempo que estamos juntos, eu só tenho a agradecer. Com a sua parceria, pude chegar onde eu cheguei hoje, divido os meus méritos contigo.

Aos meus colegas de turma, tanto da turma de 2016.1 como a turma de 2017.1. Aos meus parceiros, Guilherme e Vinícius, que me acompanharam todos os dias ao longo desses dois anos, e que com certeza, continuarão me acompanhando ao longo da minha jornada.

A minha orientadora Raquel Velloso e a minha co-orientadora Michele Dal Toé, que desde o início do mestrado esteve sempre ao meu lado, me ajudando diante de todas as dificuldades que por ventura apareceram em meu caminho.

Aos funcionários do Laboratório de Geotecnia e Meio Ambiente da PUC-Rio, o meu agradecimento, de coração, a todos.

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

Resumo

Barreto, Thiago Manes; Velloso, Raquel Quadros (Orientadora). **Influência da Adição de Copolímero de Butadieno e Estireno Modificado no Comportamento Mecânico de uma Areia**. Rio de Janeiro, 2018. 100p. Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

O estudo avalia o comportamento mecânico de uma areia reforçada com polímero, em comparação à areia pura. Foram realizados ensaios cisalhamento direto em amostras de areia pura e desta com a adição do copolímero de butadieno e estireno modificado (XSBR). O copolímero de butadieno e estireno é um elastômero composto de aproximadamente 75% de butadieno e 25% de estireno, presente em solução aquosa, sendo muito utilizada na indústria automobilística, para a produção de pneus. Pode ser produzido a partir dos processos de polimerização em emulsão ou polimerização em solução. A escolha destes materiais está relacionada às suas propriedades serem compatíveis as exigências para melhoramento de solos em obras geotécnicas. As amostras de areia com polímero apresentavam 50% de densidade relativa, 10% de umidade, nas proporções em volume água-polímero de 1:1, 1:2 e 1:4, sem tempo de cura, ou com tempos de cura de 24, 48, 72, 96, 576, 720 e 1080 horas. Foram constatadas melhorias nos parâmetros de resistência das amostras de areia com adição de polímero, em comparação aos parâmetros da areia pura, mostrando que a melhoria de solos com polímero é satisfatória para a aplicação em obras geotécnicas, como por exemplo: aterros sobre solos moles, solos de fundações superficiais e para a estabilidade de taludes.

Palavras-chave

Ensaio Cisalhamento Direto; Copolímero de Butadieno e Estireno (XSBR); Polímeros; Solos Arenosos.

Abstract

Barreto, Thiago Manes; Velloso, Raquel Quadros (Advisor). **Influence of Addition of Butadiene Copolymer and Modified Styrene on the Mechanical Behavior of a Sand**. Rio de Janeiro, 2018. 100p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

The study evaluates the mechanical behavior of a sand reinforced with polymer compared to pure sand. Direct-cut tests were carried out on pure sand samples and with the addition of modified styrene butadiene-styrene (XSBR) copolymer. The copolymer of butadiene and styrene is an elastomer composed of approximately 75% butadiene and 25% styrene, purchased in aqueous solution, being widely used in the automotive industry for the production of tires. It may be produced from the emulsion polymerization or solution polymerization processes. The choice of these materials is related to their properties being compatible the requirements for soil improvement in geotechnical works. Polymer sand samples had 50% relative density, 10% moisture, in water-polymer volume ratios of 1:1, 1:2 and 1:4, without curing time, or with times of cure 24, 48, 72, 96, 576, 720 and 1080 hours. Improvements in the resistance parameters of the sand samples with polymer addition were verified in comparison to the pure sand parameters, showing that the improvement of soils with polymers is satisfactory for the application in geotechnical works, such as: landfills on soft soils, soils of shallow foundations and for slope stability.

Keywords

Direct Shear Test; Styrene-butadiene Polymer (XSBR); Polymer; Sandy Soils.

Sumário

1 Introdução	14
1.1. Relevância e Justificativa da Pesquisa	14
1.2. Objetivos	16
1.3. Estrutura do trabalho	17
2 Revisão Bibliográfica	18
2.1. Considerações Iniciais	18
2.2. Estabilização de Solos	19
2.2.1. Estabilização Mecânica	21
2.2.2. Estabilização Física	22
2.2.3. Estabilização Química	23
2.3. Melhoramento de Solos	28
2.3.1. Solo-Polímeros	28
2.3.2. Solo-Enzimas	32
2.3.3. Solo-Cinza Volantes	34
2.3.4. Solo-Escória de Cobre	35
2.3.5. Solo-Resíduo Sólido Urbano	37
2.4. Polímeros	38
2.4.1. Copolímero de Butadieno e Estireno (XSBR)	39
3 Programa Experimental	44
3.1. Considerações Iniciais	44
3.2. Materiais utilizados	45
3.2.1. Solo	45
3.2.2. Polímero	46
3.2.3. Água	47
3.2.4. Misturas Solo-Polímero	47
3.3. Métodos e Procedimentos de Ensaio	49
3.3.1. Ensaio de Caracterização Física do Solo	49
3.3.2. Método de Caracterização Química do Solo	49
3.3.3. Processo de Caracterização Mineralógica do Solo	50
3.3.4. Ensaio de Cisalhamento Direto	51
3.3.5. Ensaio de Permeabilidade	53
3.3.6. Análise Química dos Materiais	56
3.3.7. Microscopia Eletrônica de Varredura – MEV	57
4 Resultados e Discussões	58
4.1. Considerações Iniciais	58
4.2. Caracterização Física do Solo	58
4.3. Caracterização Química do Solo	59
4.4. Caracterização Mineralógica do Solo	60
4.5. Ensaio Mecânicos	61
4.5.1. Ensaio de Cisalhamento Direto	61
4.6. Permeabilidade	81

4.6.1. Análise Química dos Materiais	82
4.7. Análise Microscópica	85
4.8. Comparação Polímero XSBR x Polímero GRT	88
5 Conclusão	89
5.1. Conclusões Gerais	89
5.2. Sugestões para Futuros Trabalhos	90
6 Referências bibliográficas	92

Lista de Figuras

Figura 2.1 – Nano polímeros GRT – Formação das Cadeias Poliméricas	30
Figura 2.2 – Partícula Mineral com as partículas do polímero GRT.....	30
Figura 2.3 – Curvas Tensão-Deformação (Artigo GRT).....	31
Figura 2.4 – Comparação da Tensão x Deformação das misturas (Artigo GRT) .	31
Figura 2.5 - Estrutura Química do Polímero de Butadieno e Estireno (Ahmed, 2013).....	39
Figura 2.6 - Borracha de Butadieno e Estireno	40
Figura 2.7 - Esquema integral das reações presentes no processo típico de polimerização em emulsão (Thickett e Gilbert, 2007 apud Marinangelo, 2010).....	41
Figura 3.1 – Localização da Jazida – Itaboraí/RJ	45
Figura 3.2 – Amostra de Solo	45
Figura 3.3 – Solução Polimérica Aquosa – Butadieno e Estireno (XSBR).....	46
Figura 3.4 – (a) Dosador de Água Destilada; (b) Tanque do Destilador de Água	47
Figura 3.5 – (a) Preparação das Amostras; (b) Corpo de Prova (CP) quadrado....	48
Figura 3.6 – Aparelho Rainy EDX 720, Shimadzu (Shimadzu Corp.)	49
Figura 3.7 - Lupa Binocular, Leica (Leica Microsystems).....	50
Figura 3.8 – Equipamento do Ensaio de Cisalhamento Direto (Romanel, 2015) .	51
Figura 3.9 - Itens que compõem o equipamento de CD (Repsold, 2018)	52
Figura 3.10 – Permeâmetro: (I) Material Coletado; (II) Válvula de retirada do material; (III) Saída do fluido do topo da amostra; (IV) Medidor de Variação de Volume; (V) Painel de Pressão; (VI) Câmara do Permeâmetro; (VII) Amostra; (VIII) Transdutor de pressão	53
Figura 3.11 – Amostra no Pedestal com Pedra Porosa e Papel Filtro	54
Figura 3.12 – Amostra no Pedestal envolta com a Membrana.....	54
Figura 3.13 – Saída do Percolado do Topo da Amostra.....	55
Figura 4.1 – Curva Granulométrica do Solo.....	59
Figura 4.2 – Aspecto macroscópico da amostra de solo: (a) fração retida na peneira nº40 e (b) fração de areia passante na peneira de nº40 e retida na peneira de nº200 (Silveira, 2018)	60
Figura 4.3 – Gráfico Tensão Cisalhante vs Deslocamento Horizontal – Areia Pura	61
Figura 4.4 – Envoltória de Ruptura – Areia Pura	62
Figura 4.5 – Gráfico Tensão Cisalhante vs Deslocamento Horizontal – Areia/XSBR (1:1 e 24h)	63
Figura 4.6 – Envoltória de Ruptura –Areia/XSBR (1:1 e 24h)	63
Figura 4.7 – Gráfico Tensão Cisalhante vs Deslocamento Horizontal – Areia/XSBR (1:1 e 72h)	64
Figura 4.8 – Envoltória de Ruptura – Areia/XSBR (1:1 e 72h)	65
Figura 4.9 – Gráfico Tensão Cisalhante vs Deslocamento Horizontal – Areia/XSBR (1:2 e 72h)	66
Figura 4.10 – Envoltória de Ruptura – Areia/XSBR (1:2 e 72h)	66

Figura 4.11 – Gráfico Tensão Cisalhante vs Deslocamento Horizontal – Areia/XSBR (1:2 e 96h)	67
Figura 4.12 – Envoltória de Ruptura – Areia/XSBR (1:2 e 96h)	68
Figura 4.13 – Gráfico Tensão Cisalhante vs Deslocamento Horizontal – Areia/XSBR (1:4 e 48h)	69
Figura 4.14 – Envoltória de Ruptura – Areia/XSBR (1:4 e 48h)	69
Figura 4.15 – Gráfico Tensão Cisalhante vs Deslocamento Horizontal – Areia/XSBR (1:4 e 72h)	70
Figura 4.16 – Envoltória de Ruptura - Areia/XSBR (1:4 e 72h)	71
Figura 4.17 – Gráfico Tensão Cisalhante vs Deslocamento Horizontal – Areia/XSBR (1:4 e 96h)	72
Figura 4.18 – Envoltória de Ruptura – Areia/XSBR (1:4 e 96h)	72
Figura 4.19 – Gráfico Tensão Cisalhante vs Deslocamento Horizontal – Areia/XSBR (1:4 e 120h)	73
Figura 4.20 – Envoltória de Ruptura – Areia/XSBR (1:4 e 120h)	74
Figura 4.21 – Gráfico Tensão Cisalhante vs Deslocamento Horizontal – Areia/XSBR (1:4 e 576h)	75
Figura 4.22 - Envoltória de Ruptura – Areia/XSBR (1:4 e 576h)	75
Figura 4.23 – Gráfico Tensão Cisalhante vs Deslocamento Horizontal – Areia/XSBR (1:4 e 720h)	76
Figura 4.24 – Envoltória de Ruptura – Areia/XSBR (1:4 e 720h)	77
Figura 4.25 – Gráfico Tensão Cisalhante vs Deslocamento Horizontal – Areia/XSBR (1:4 e 792h)	78
Figura 4.26 – Envoltória de Ruptura – Areia/XSBR (1:4 e 792h)	78
Figura 4.27 – Gráfico Tensão Cisalhante vs Deslocamento Horizontal – Areia Pura x Areia/XSBR (1:4 – 720 e 792h)	79
Figura 4.28 – Espectroscopia no Infravermelho – Areia Pura	83
Figura 4.29 – Espectroscopia no Infravermelho – Areia/Polímero	84
Figura 4.30 – Amostra para a Análise do MEV	85
Figura 4.31 – Análise MEV – Solo/Água/Polímero – 24d.....	85
Figura 4.32 – Análise MEV – Solo/Água/Polímero – 24d.....	86
Figura 4.33 – Análise MEV – Solo/Água/Polímero – 24d.....	86
Figura 4.34 - Análise MEV – Solo/Água/Polímero – 30d	87
Figura 4.35 – Análise MEV – Solo/Água/Polímero – 30d.....	87

Lista de Tabelas

Tabela 4.1 – Índices Físicos da Areia de Itaboraí.....	58
Tabela 4.2 – Composição Química da Areia de Itaboraí.....	59
Tabela 4.3 – Parâmetros de Resistência – Areia Pura	62
Tabela 4.4 – Parâmetros de Resistência – Areia/XSBR (1:1 e 24h)	64
Tabela 4.5 – Parâmetros de Resistência – Areia/XSBR (1:1 e 72h)	65
Tabela 4.6 – Parâmetros de Resistência – Areia/XSBR (1:2 e 72h)	67
Tabela 4.7 – Parâmetros de Resistência – Areia/XSBR (1:2 e 96h)	68
Tabela 4.8 – Parâmetros de Resistência – Areia/XSBR (1:4 e 48h)	70
Tabela 4.9 – Parâmetros de Resistência – Areia/XSBR (1:4 e 72h)	71
Tabela 4.10 - Parâmetros de Resistência – Areia/XSBR (1:4 e 96h)	73
Tabela 4.11 – Parâmetros de Resistência – Areia/XSBR (1:4 e 120h)	74
Tabela 4.12 – Parâmetros de Resistência – Areia/XSBR (1:4 e 576h)	76
Tabela 4.13 – Parâmetros de Resistência – Areia/XSBR (1:4 e 720h)	77
Tabela 4.14 – Parâmetros de Resistência – Areia/XSBR (1:4 e 792h)	79
Tabela 4.15 – Tabela Resumo – Parâmetros de Resistência	80
Tabela 4.16 – Ensaio de Permeabilidade da Areia Pura.....	81
Tabela 4.17 – Ensaio de Permeabilidade da Mistura Solo/Polímero	81
Tabela 4.18 – Espectrometria de Fluorescência de Raios X (FRX)	82

Lista de Abreviaturas

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CD	Cisalhamento Direto
CP	Corpo de Prova
CS	Compressão Simples
CTB	Cement-Treated Base
DEQM	Departamento de Engenharia Química e de Materiais
DR	Densidade Relativa
FRX	Espectrometria de Fluorescência de Raios X
GRT	Global Road Technology
IP	Índice de Plasticidade
ISC	Índice de Suporte Califórnia
IV	Espectroscopia de Infravermelho
LME	Laboratório de Microscopia Eletrônica
LGMA	Laboratório de Geotecnia e Meio Ambiente
LL	Limite de Liquidez
LP	Limite de Plasticidade
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
PF	Fibra de Polipropileno
PH	Potencial Hidrogeniônico
PU	Polímero de Poliuretano
RSU	Resíduos Sólidos Urbanos
XSBR	Copolímero de Butadieno e Estireno

“A persistência é o caminho do êxito.”

Charles Chaplin

1

Introdução

1.1. Relevância e Justificativa da Pesquisa

O desenvolvimento do ramo da engenharia civil no Brasil foi impulsionado pela abundância de mão de obra e pela variedade das matérias primas utilizadas nos empreendimentos. Em especial nas obras geotécnicas, o Brasil se apresenta como um país com uma grande diversidade de formações rochosas, e de geomorfologias diversas, dada a sua extensão territorial.

Em muitos casos, destacando-se obras de médio a grande porte em topografias irregulares, verifica-se a necessidade de grandes movimentações de terra. Nos locais de corte, o nivelamento e o preenchimento pode ser feito a partir de um material de boa qualidade, de propriedades conhecidas. Esse material é obtido a partir de locais específicos, conhecidos como jazidas.

Devido ao crescimento acelerado do país, segundo Guacelli (2010), a exploração prolongada das areias naturais de extração, utilizadas na construção civil em larga escala, tem resultado no esgotamento das jazidas próximas aos grandes centros urbanos.

Diante do esgotamento das jazidas nos locais próximos aos centros urbanos, diversos estudos estão sendo conduzidos, com o objetivo de melhorar o desempenho do material utilizado, reduzindo o montante de material a ser utilizado.

Sabendo que o solo é o elemento comum a todas as obras de engenharia, e que um maciço pode apresentar grandes variações de uma região a outra, na presente pesquisa apresenta-se o modelo que consiste na adição de polímero líquido (Copolímero de Butadieno e Estireno) nos solos arenosos de baixa coesão, visando a estabilização de solos utilizados em aterros, e concomitantemente o melhorando do mesmo, com um aumento dos parâmetros de resistência do solo, ou seja, da coesão e do ângulo de atrito do material.

Em Vargas (1977), estabilização de solos é designado como um processo que confere ao mesmo uma maior resistência estável às cargas, desgaste ou erosão, através da compactação, correção granulométrica e de sua plasticidade ou da adição de substâncias que lhe confirmem uma coesão proveniente da cimentação ou aglutinação dos seus grãos.

Conforme apresentado por Almeida (2016), em meio aos principais métodos de estabilização (mecânica, física e química), o processo de estabilização química é o que apresenta um número maior de reações entre o solo, o aditivo estabilizante e a água, para obter um novo material com características melhores do que o solo puro. É natural que as características da estabilização estejam muito relacionadas com o comportamento e qualidade do solo, por ser o componente de maior quantidade e o mais heterogêneo da mistura.

Dentro deste contexto, o presente trabalho busca contribuir para uma melhor compreensão do comportamento de um solo arenoso em misturas com polímero líquido (Copolímero de Butadieno e Estireno (XSBR)), visando estudar a viabilidade da utilização de polímeros como material de reforço em solo, através de estudos experimentais. O emprego desse produto como elemento alternativo a misturas de solos reforçados, pode se apresentar como uma solução economicamente viável a utilização dessas misturas em obras geotécnicas, como por exemplo, aterros sobre solos moles, aterros em taludes e solos de fundações superficiais.

1.2. Objetivos

O Copolímero de Butadieno e Estireno foi o composto escolhido para o presente estudo, uma vez que compostos desta natureza não haviam sido incorporados a misturas de solo como elemento de reforço. O objetivo principal desta pesquisa é estudar a utilização de polímero como composto estabilizante e de reforço em solos arenosos para aplicações futuras em obras geotécnicas. O programa experimental desse estudo consiste em: ensaios de caracterização física do solo arenoso utilizada, e ensaios mecânicos de cisalhamento direto, com o intuito de definir os parâmetros de resistência da areia pura e da areia misturada com os polímeros e o ensaio de permeabilidade, além da análise química dos compostos presentes nas amostras de solo/polímero.

De acordo com o objetivo principal apresentado acima foram definidos os seguintes objetivos específicos:

- Analisar o comportamento mecânico da areia pura e em mistura com os polímeros, através dos ensaios de cisalhamento direto (CD) visando obter os parâmetros de resistência ao cisalhamento das amostras;
- Avaliar a influência do tipo de polímero, dos teores utilizados nas misturas, e do tempo de cura das amostras no comportamento mecânico das misturas;
- Analisar, por meio dos resultados obtidos nos ensaios, se as misturas estudadas são tecnicamente e ambientalmente viáveis para a aplicação em obras geotécnicas.
- Analisar a composição química da amostra de areia pura em comparação com a amostra de areia/polímero.

1.3. Estrutura do trabalho

O trabalho em questão é dividido em cinco capítulos, iniciando-se com o capítulo introdutório (Capítulo 1), seguido do Capítulo 2, onde é apresentada a revisão bibliográfica dos materiais utilizados e o dos processos adotados no estudo, destacando-se a areia e o polímero (XSBR), com informações a respeito das aplicações e dos impactos ambientais dos polímeros.

O Capítulo 3 apresenta o programa experimental implementado na pesquisa, incluindo os compostos utilizados nas misturas, os equipamentos, os métodos e os ensaios realizados, obedecendo as indicações propostas nas normas vigentes.

O Capítulo 4 apresenta os resultados obtidos no processo de caracterização física do solo, nos ensaios mecânicos de cisalhamento direto e no ensaio de permeabilidade das amostras de areia pura e das misturas com o polímero.

Por fim, o Capítulo 5 apresenta as considerações finais baseadas nos resultados obtidos no programa experimental e como as misturas podem ser aplicadas em obras geotécnicas, além de recomendações para pesquisas complementares.

2

Revisão Bibliográfica

2.1.

Considerações Iniciais

No capítulo em questão será apresentada a revisão bibliográfica acerca de melhoramento de solos com polímeros, assim como conceitos gerais sobre o melhoramento de solos arenosos com compostos alternativos. A partir dos artigos encontrados na literatura nacional e internacional procurou-se englobar todas as informações relacionadas ao tema disponíveis até o momento da pesquisa.

A princípio, serão apresentados os principais tipos de polímeros utilizados nesse processo e os resultados obtidos a partir de cada mistura, assim como informações relacionadas as propriedades físicas e químicas do polímero adotado nas misturas, possibilitando um melhor conhecimento de como o processo de iteração solo-polímero contribui para o aumento de resistência ao cisalhamento do solo.

Por fim, será apresentado, em linhas gerais, a definição de polímero, as características e composições dos compostos mais utilizados no processo de melhoramento de solos, incluindo os respectivos métodos de obtenção. Além da apresentação dos polímeros presentes nas misturas estudadas na presente pesquisa, bem como as particularidades do copolímero de butadieno e estireno, compreendendo aplicações mais frequentes, composição química e processo de obtenção.

2.2. Estabilização de Solos

Silva (2007) afirma que a estabilização de solos teve seu marco histórico no período da segunda guerra mundial, quando as migrações militares demandaram a construção de novas rotas. Enquanto que no cenário atual, em virtude do crescimento acelerado do setor da construção civil, constata-se uma elevada exploração das áreas terrestres, resultando na redução da disponibilidade dos chamados solos “bons”.

Para Ingles e Metcalf (1973), denomina-se estabilização de solos, a aplicação de processos e técnicas que busquem a melhoria das propriedades mecânicas dos solos. Entre as alterações a serem constatadas nas propriedades mecânicas do solo, destaca-se o aumento de resistência ao cisalhamento, da rigidez e da durabilidade como as principais.

De acordo com Baptista (1976), a estabilização de solos consiste na utilização de um processo qualquer de forma a tornar o solo estável para os limites de sua utilização e ainda fazer com que esta estabilidade permaneça sob as ações das cargas e ações climáticas variáveis.

Para Santos (2012), as propriedades de um solo podem ser alteradas por métodos mecânicos, físicos e/ou químicos. A escolha do tipo de estabilização varia de acordo com as propriedades no estado natural, as propriedades desejadas para o solo estabilizado e dos efeitos no solo após a estabilização.

Segundo Lopes (2011), o conhecimento das características e propriedades mecânicas do solo existente e disponível no local de execução de um projeto de pavimentação é de suma importância para análise da adequação aos requisitos técnicos. Entretanto, ocorre com certa frequência a existência de solos que não apresentam as propriedades adequadas para suportar as cargas impostas ao pavimento. Nestes casos, normalmente, uma das soluções mais comuns é a procura por outros materiais, diferentes dos materiais usualmente utilizados, mas que preencham os requisitos técnicos mínimos, o que se tornou sinônimo de custos adicionais, como por exemplo de transporte que muitas vezes podem inviabilizar o projeto.

Para Baghini et al. (2016), a ação de agentes estabilizantes pode resultar no melhoramento das propriedades de uma mistura solo-agregado. Os aditivos estabilizantes solo-agregados podem ser divididos em duas categorias: tradicionais e não tradicionais. Entre os aditivos tradicionais, podemos destacar: cimento, cal, cinzas volantes e materiais betuminosos. Enquanto que, aditivos não tradicionais incluem enzimas, polímeros líquidos, resinas, ácidos, silicatos, íons e derivados de lignina. Entre os diversos materiais utilizados para estabilização, um material de base tratada com cimento (CTB) apresenta elevada resistência e rigidez, e alta durabilidade quando utilizado na construção de pavimentos. Entretanto, durante a operação, esse tipo de pavimento tende a apresentar trincas.

O processo de estabilização dos solos, além do melhoramento das propriedades físicas e químicas podem ser obtidos por diversos métodos. Segundo Kezdi (1979 apud Nunez, 1991), os métodos são divididos em três categorias:

- Métodos mecânicos – Asseguram a estabilidade do solo sem a inclusão de aditivos. Sendo assim, as propriedades do solo podem ser melhoradas por meio dos processos de compactação, drenagem e/ou mistura com outros tipos de solo. Salienta-se que as técnicas apresentadas são combinadas entre si, uma vez que o processo de compactação é necessitado na maioria dos projetos de engenharia.
- Métodos Físicos – As reações físicas que conduzem à estabilização física do solo são: mudança de temperatura, hidratação, evaporação e adsorção.
- Métodos Químicos – A estabilização química ocorre devido a troca de íons, a precipitação, a polimerização e a oxidação por meio de reações químicas.

2.2.1. Estabilização Mecânica

A estabilização mecânica por ser executada por meio de métodos: compactação e a estabilização granulométrica. Para Santos (1995 apud Lopes, 2011) a estabilização mecânica por compactação é um processo de tratamento de um solo cuja a finalidade é minimizar a sua porosidade por meio da aplicação de carregamentos sucessivos, visto que a redução de volume de vazios é relacionada ao aumento de resistência mecânica. Enquanto que a estabilização mecânica por correção granulométrica ocorre a partir da mistura do solo com um ou mais tipos de solo, ou até mesmo outros materiais, resultando em uma mistura de propriedades conhecidas e condizentes com os requisitos estabelecidos para o projeto.

Embora existam diversos métodos utilizados para compactação em laboratório, e os diferentes modelos de carregamento aplicados na construção de aterros compactados, o efeito da umidade do solo no resultado da densidade é similar em todas as metodologias. Para cada técnica de compactação há uma umidade ótima relacionada, resultando no estado de maior densidade ou estado de maior compacidade. Além disso, cada solo ensaiado apresenta a sua própria curva característica densidade x umidade para uma dada energia de compactação. (Vendruscolo, 1996).

Segundo Vizarra (2010), o processo de estabilização por correção granulométrica visa a obtenção de um material bem graduado e de percentagem limitado de partículas finas, que apresenta maior estabilidade que o solo(s) de origem, a partir da mistura homogênea de dois ou mais solos.

Em Vogt (1971), o conceito é exemplificado por meio de uma mistura de areia e argila, em proporção definida e compactada na umidade ótima. Entretanto, além dos materiais utilizados, destacam-se outros materiais naturais que podem ser utilizados sem mistura ou adição.

2.2.2. Estabilização Física

Caso as condições de estabilidade não são obtidas por meio de processos mecânicos, ou quando se tornam necessários valores elevados de resistência e rigidez de um solo, métodos alternativos de estabilização deverão ser considerados. Diante disso, recorre-se normalmente a aditivos como o cimento ou a cal, ou a tratamentos especiais que envolvam reações físicas capazes de modificar as propriedades do solo (Cristelo, 2001).

Para Oliveira (1994 apud Soliz, 2007), a estabilização física mais comumente empregada no ramo da pavimentação é a técnica descrita no item anterior, entre os métodos utilizados na estabilização mecânica, que consiste na modificação das propriedades do solo, principalmente na textura do solo, ao misturar solos de diferentes frações granulométricas. Paralelamente, outras técnicas comumente empregadas envolvem tratamentos térmicos de congelamento ou secagem, tratamento elétrico e eletro-osmose, que contribuem para a melhoria das propriedades dos solos, além de auxiliar no processo de drenagem dos solos.

Segundo Cristelo (2001), o processo consiste na introdução no solo, por meio de um tubo perfurado, uma mistura comprimida de combustíveis e ar quente. O aquecimento ocorre a partir da queima de combustíveis ou a partir de processos elétricos. As pressões de aplicação da mistura são, em média, 1.5 vezes superiores à pressão atmosférica, e a temperatura pode variar entre 300°C e 1000°C. No caso de solos saturados, a permeabilidade deve ser elevada, permitindo a evacuação do vapor produzido no processo.

Conforme estudado por Castello Branco (1978), o tratamento por eletro-osmose consiste na introdução de dois eletrodos, de maneira espaçada entre eles, em uma massa de solo. A inclusão dos eletrodos possibilita a passagem de uma corrente elétrica na massa localizada entre eles, resultando na migração da água presente no solo do eletrodo positivo para o negativo. O processo reduz a quantidade de água no solo, e consequentemente auxilia na consolidação do solo.

2.2.3. Estabilização Química

Medina (2014) afirma que a estabilização química é um processo que consiste na adição de um ou mais produtos químicos no solo, que ao se solidificarem ou reagirem com as partículas de solo tendem a se aglomerar, vedando os poros, tornando assim o solo repelente à água.

Enquanto que para Santos et al. (1995), a estabilização química consiste na adição de uma determinada substância química ao solo, resultando em mudanças que irão influenciar as propriedades do solo, destacando-se a resistência mecânica, permeabilidade, assegurando a estabilização do solo.

Os aditivos utilizados nesse processo podem ser dos mais variados tipos, destacando-se: Cal, cimento Portland, polímeros, enzimas, cinza volante entre outros.

Com relação ao primeiro aditivo, Davidson e Handy (1960), afirmaram que, inicialmente, os íons cálcio reduzem o índice de plasticidade (IP) de solos coesivos por meio de trocas catiônicas ou de uma mudança na carga elétrica em torno das partículas de argila.

Segundo Ahmed (2013), os estabilizantes químicos podem ser classificados em três principais categorias: pó, líquido ou aditivos em emulsão. Entre os estabilizantes encontrados na forma de pó, destaca-se a cal, o cimento e as cinzas. Na categoria líquida, destaca-se os polímeros de resina epóxi, hidróxido de sódio, acetato de polivinila e emulsão de betume, nos quais foram constatadas melhoras com relação as propriedades geotécnicas, incluindo os parâmetros de resistência do solo.

Para Sandroni e Consoli (2010), os principais objetivos da mistura de aditivos aos solos são, melhorar ou controlar a estabilidade volumétrica, resistência ao cisalhamento e as propriedades tensão-deformação. As reações químicas mais comuns no processo de estabilização de solos são as de troca catiônica com as partículas de argila.

2.2.3.1. Solo-Cal

Para Sandroni e Consoli (2010), a quantidade de cal necessária para o tratamento de solos varia de acordo com as características do solo, o tipo de uso, e as características mecânicas desejadas para a mistura e para o tipo de cal.

De modo geral, o tratamento de solos com a adição de cal pode ser dividido em duas metodologias:

- Modificação do solo com cal, reduzindo a plasticidade do solo, aumentando a trabalhabilidade, e ao mesmo tempo, aumentando a resistência de defloculação e erosão;
- Estabilização do solo com cal, resultando no aumento permanente da rigidez e da resistência do solo, por conta da ação de reações pozolânicas.

A adição de cal em qualquer tipo de solo, desde que o solo possua minerais argilosos em qualquer proporção, quando no teor de umidade adequado, resultará na ocorrência das seguintes reações: troca de íons e floculação, reação cimentante pozolânica e carbonatação (Azevêdo, 2010).

- Troca de Íons e Floculação – Reações interdependentes, que ocorrem após a mistura, resultando na diminuição da plasticidade do solo, pelo aumento do limite de plasticidade (LP) e/ou pela diminuição do limite de liquidez (LL). Para Mitchell e Hooper (1961), quimicamente, ocorre uma troca de base, onde os cátions, provenientes da cal, com carga mais forte, substituem os íons de carga mais fraca, como os íons de sódio, magnésio e hidrogênio, presentes na superfície da partícula de argila. Além disso, a ligação entre as partículas de argila depende da carga e do tamanho dos íons presentes na interface, resultando em uma atração de maior magnitude, e assim, na floculação das partículas.
- Cimentação Pozolânica – A cimentação do solo é resultado de uma reação química entre a cal, a água e os elementos pozolânicos do solo, resultando na formação de compostos silicatos e alumínio hidratados de cálcio, semelhantes ao produto obtido a partir da hidratação do

cimento Portland no concreto e no solo-cimento. (Azevedo, 1998 apud Azevêdo 2010). Os elementos pozolânicos são encontrados na maioria dos solos com certo teor de argila. Com relação a resistência a ação da água, a cimentação pozolânica resulta no aumento dessa resistência, seja a ação gerada por gravidade (proveniente de chuvas) ou por capilaridade, uma vez que o solo mais coeso sofrerá menos com o efeito erosivo. Entretanto, a mistura solo-cal não se apresenta como um compósito impermeável, e sim um composto mais resistente ao efeito erosivo da água. (Azevêdo, 2010).

- Carbonatação – A carbonatação ocorre quando o dióxido de carbono existente no ar ou na água, entra em contato com a matriz solo-cal, convertendo a cal em carbonato de cálcio. A carbonatação se apresenta como uma reação na qual o resultado fragiliza a mistura solo-cal, retirando cátions de cálcio da superfície das partículas de argila floculadas para gerar a reação com o dióxido de carbono de ar, resultando em compostos menos resistentes que os compostos silicatos e aluminatos gerados a partir da cimentação pozolânica (Azevêdo, 2010). O carbonato de cálcio se apresenta como uma cimentação fraca, sendo facilmente solubilizada na água ácida. O processo é indesejável, já que reduz a quantidade de cal disponível para a produção de reações pozolânicas (Malko, 2015).

2.2.3.2. Solo-Cimento

Soliz (2007) explica que a estabilização solo-cimento ocorre a partir da hidratação do cimento dentro dos vazios do solo, onde o cimento atua como principal agente. Lembra que Lima et al (1993) busca com a adição do cimento, desenvolver uma mistura capaz de reduzir a sensibilidade às mudanças de umidade, e que possa gerar esforços de tração e de compressão no interior da massa de solo.

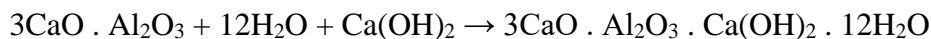
Para Baghini (2016), a estabilização de solos com a adição de cimento foi primeiramente utilizada para testes em 1917, e desde então, diversos trabalhos foram publicados sobre o tópico, destacando-se, entre outros: Goodary (2012) e Ismail (2014).

O uso do cimento como aditivo químico é enfatizado por Handy (1958), quando afirma que as ligações químicas que se desenvolvem entre o cimento e as superfícies minerais são mais importantes em misturas de granulação mais fina, como a do solo-cimento, do que nas misturas de graduação mais grosseira, como o concreto. Ainda segundo Handy, o aumento de resistência constatado a longo prazo pode ser explicado a partir de uma hipótese que segue as propostas de polarização de íons próximos as superfícies de sílica, formuladas por Weyl em 1953. A polarização iria compensar o desequilíbrio de forças presentes nas superfícies.

Em Sandroni e Consoli (2010 apud Malko, 2015), diversos tipos de cimento podem ser utilizados em processos de estabilização para na maioria dos tipos de solos, excluindo argilas altamente plásticas e orgânicas (com 1 a 2% de matéria orgânica), as quais demandam altas doses de cimento para a obtenção de resultados significativos nas propriedades mecânicas. Os cimentos Portland são conhecidos como cimentos hidráulicos, onde apresentam um aumento de resistência por meio de reações na presença de água – hidratação. Os quatro componentes do cimento Portland são:

- Silicato Tricálcico ($3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$) $\rightarrow \text{C}_3\text{S}$
- Silicato Dicálcico ($2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$) $\rightarrow \text{C}_2\text{S}$
- Aluminato Tricálcico ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$) $\rightarrow \text{C}_3\text{A}$
- Aluminoferrito Tetracálcico ($4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}$) $\rightarrow \text{C}_4\text{AF}$

Assim que a água é adicionada ao cimento Portland, temos as seguintes reações primárias:



O enrijecimento instantâneo do composto C_3S é o responsável pela resistência inicial. Como o C_2S enrijece mais lentamente, o composto proporciona o aumento de resistência para tempos maiores que 1 semana. Durante os primeiros dias de enrijecimento, o C_3A libera uma grande quantidade de calor, contribuindo pouco para o aumento da resistência inicial. Em solos finos, a fase argila também contribui para a estabilização através da sua solução em meio básico (pH elevado), e reações com a cal livre do cimento, formando CSH adicional (reações pozolânicas) (Malko, 2015).

Marques (2003 apud Fletrin, 2008) afirma que em muitos casos, as misturas de solo com cimento são confundidas e caracterizadas de forma errada, sendo todas denominadas solo cimento. Entretanto, há três tipos de misturas envolvendo solo e cimento, sendo classificadas em:

- Mistura Solo Cimento – Produto originado a partir dos processos de compactação e cura da mistura de solo, cimento e água, de modo a satisfazer os critérios de estabilidade e durabilidade.
- Solo modificado com Cimento – Mistura que apresenta pequenas quantidades de cimento, variando de 1 a 5%, utilizada para alterar propriedades físicas, como reduzir o índice de plasticidade (IP), com o aumento do LP ou com a redução do LL.
- Solo Cimento-Plástico – Material endurecido, com consistência similar a uma argamassa. Sendo uma mistura de solo, cimento e água em quantidade suficiente para a compactação e a completa hidratação do cimento.

2.3. Melhoramento de Solos

2.3.1. Solo-Polímeros

A aplicação de polímeros de origem natural ou artificial como estabilizantes dos solos é baseada na capacidade de repelir a água presente na mistura, e através do processo de polimerização, gerar uma coesão aparente (Soliz, 2007).

Com relação a aplicação de estabilizantes poliméricos, os compostos mais utilizados em misturas solo-polímeros são: acetatos de vinil, ou copolímeros acrílicos suspensos em emulsão por surfactantes. Esse tipo de aditivo reveste as partículas do solo e forma cadeias de ligações físicas quando a água presente na emulsão evapora, deixando a matriz do polímero no solo. O agente emulsificante também serve como surfactante, melhorando a penetração para aplicações tópicas e revestimento de partículas sob condições de mistura. A utilização de polímeros como modificadores em novas estruturas se apresenta como uma solução promissora, melhorando a microestrutura das misturas, além do aumento da durabilidade do compósito. Os polímeros têm uma grande influência na trabalhabilidade e nas propriedades mecânicas de misturas solo/ agregado/cimento. São materiais conhecidos por apresentar uma durabilidade superior a apresentada pelo cimento Portland, além da ação resistente ao ataque de ácidos, descongelamento e difusão de cloretos. (Baguini, 2016).

Liu et al (2018) analisou o comportamento mecânico de misturas de solo com polímero de poliuretano (PU) e fibra de polipropileno (PF) em comparação com areia pura. Após uma série de ensaios de tração variando as proporções de PF/PU/Solo/Água, o tempo de cura e a densidade seca do material, verificou-se que esses fatores influenciaram diretamente na resistência a tração da amostra. Concluiu-se então que o tempo de cura influencia consideravelmente a resistência a tração da mistura, e que até a saturação, o aumento do tempo de cura irá resultar no aumento da resistência a tração. Com relação ao reforço com o PU, o efeito é gerado por uma membrana formada, composta por uma rede espacial. Os efeitos são classificados em enrolar, encher e conectar. Enquanto que o reforço de FP é decorrente da força interfacial entre fibras e os grãos de areia, que impede que as partículas se rearranjem sob a aplicação de uma tensão.

Ingles e Metcalf (1972) afirmam que materiais orgânicos poliméricos se mostram eficientes quando aplicados no processo de estabilização de solos ácidos. Fato esse, justificado pelo caráter iônico dos polímeros, sendo dividido em aniônicos, neutros ou catiônicos. Quando em caráter aniônico, atuam no sentido de promover a dispersão dos solos; quando em caráter neutro, caso em que não influenciam nas condições de floculação ou dispersão dos solos; e por fim, com caráter catiônico, atuando no sentido de promover a floculação dos solos.

Ates (2013) estudou os efeitos provocados pela mistura do Copolímero de Vinil-Acrílico e do cimento com solos arenosos liquefeitos na resistência a compressão não confinada do solo. Foram realizados ensaios onde as misturas de solo/copolímero/cimento se encontravam nas condições úmida e seca, para diversas proporções copolímero/cimento, e tempos de cura de 7 a 14 dias. Verificou-se que a adição de polímero ao solo arenoso resultou na melhoria da resistência a compressão do solo, e que os maiores valores de resistência foram observados em misturas com 3 a 4% de polímero em 30 a 40% de cimento. Além disso, concluiu-se que o tempo de cura também influencia diretamente na resistência do solo, e que as maiores resistências foram verificadas para tempos de cura igual a sete dias.

Segundo a empresa PolyPavement™, fornecedora de polímeros utilizados em processos de estabilização de solos, experimentos realizados pela U.S. Army Corps of Engineers (USACE) no ano de 1996, mostraram que os polímeros fornecidos pela empresa apresentaram resultados satisfatórios com relação aos ensaios de resistência a ação de intempéries, como: água, vento, calor extremo e derramamento de combustíveis (Patricio, 2015).

Como o mecanismo de ligação é físico, o aumento da resistência ao cisalhamento do solo varia de acordo com a capacidade que o estabilizante polimérico tem em revestir as partículas de solo. Portanto, a utilização de emulsões poliméricas no processo de estabilização é mais apropriada para solos granulares, sendo assim menos eficientes para solos finos, uma vez que possuem grande área específica superficial (Tingle et al, 2007 apud Patricio 2015).

Segundo estudo de Rauch et al (2002) sobre o comportamento de solos tratados e não tratados utilizando os ensaios de limites de Atterberg, compactação e triaxial não-consolidado não-drenado, verificou-se que o estabilizante polimérico não modificou significativamente os valores de plasticidade, umidade ótima e massa específica aparente seca máxima de nenhum dos solos estudados.

Os cientistas da GRT (Global Road Technology) estão desenvolvendo, com o auxílio da Universidade Tecnológica de Queensland (QUT), novos polímeros para a utilização em processos de estabilização de solos. Polímeros dessa natureza apresentam dimensões inferiores a 100 nanômetros. As nanopartículas do polímero estão dispersas em água e estabilizados, utilizando produtos químicos especiais. Após a mistura com solo, as partículas aglomeradas formam fios e cadeias (rede). As cadeias formadas a partir dessa mistura podem ser observadas nas figuras abaixo.

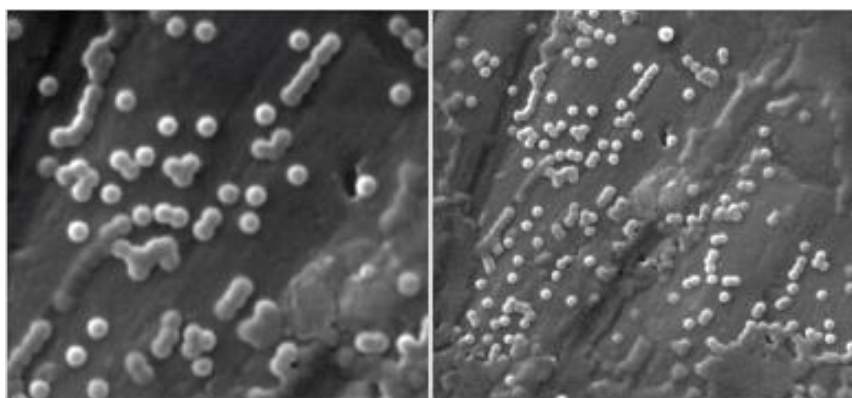


Figura 2.1 – Nano polímeros GRT – Formação das Cadeias Poliméricas

A figura abaixo mostra a partícula de um mineral sendo enclausurado pelas partículas do polímero no processo de formação das cadeias. As pequenas partículas são formadas para serem facilmente difundidas em solo, sendo assim, uma pequena quantidade de polímero já é suficiente para unificar grandes quantidades de solo.

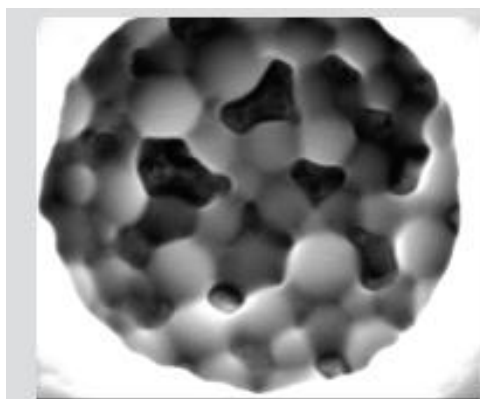


Figura 2.2 – Partícula Mineral com as partículas do polímero GRT

Além de mostrar que os polímeros podem aumentar a flexibilidade, reduzindo a retração do solo, a GRT comparou o comportamento mecânico apresentado pelas amostras de solo + polímero com o comportamento de misturas solo + cimento em bases de solo estabilizados. Nesse caso, as misturas apresentaram a mesma porcentagem de cimento/polímero, 2%. Os resultados são apresentados no gráfico abaixo.

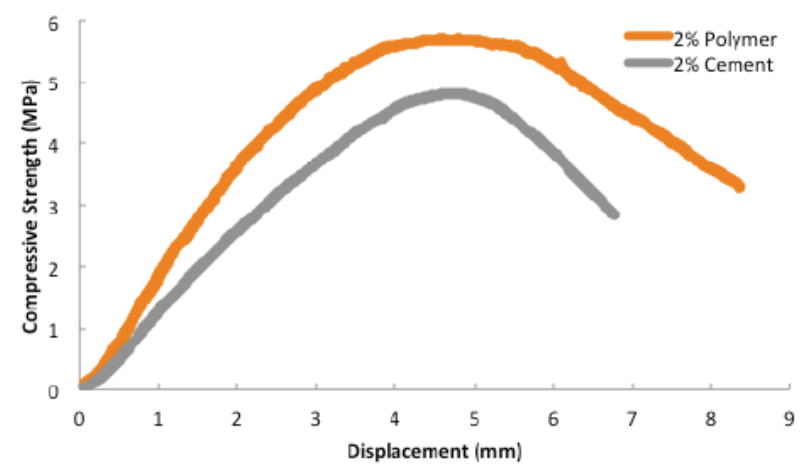


Figura 2.3 – Curvas Tensão-Deformação (Artigo GRT)

Os ensaios mostraram também que o solo estabilizado com o polímero GRT apresentou um valor de resistência superior a amostra de solo com cimento (cerca de 15% maior), a primeira mistura apresentou um aumento surpreendente da flexibilidade (16% superior a outra amostra). Esse aumento mostra que a mistura de solo com polímero afeta diretamente o mecanismo de fratura do solo. O tipo de solo utilizado nesse estudo não foi apresentado pela empresa.

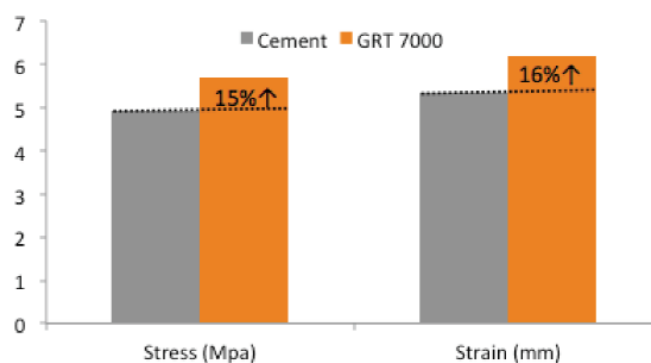


Figura 2.4 – Comparação da Tensão x Deformação das misturas (Artigo GRT)

2.3.2. Solo-Enzimas

Malko (2015) afirma que ao ser adicionada ao solo, a enzima atua como um catalisador, aumentando a velocidade da reação. E que a mudança na velocidade do regime é proveniente dos processos de fermentação que ocorrem devido as reações que ocorrem com substratos do solo. Os substratos do solo são formados por agentes orgânicos, sendo assim, as enzimas reagem mais eficientemente em solos com teor elevado de matéria orgânica.

Murphy e Brazetti (2000) utilizaram um aditivo enzimático em alguns trechos de estradas de terra não pavimentadas localizadas no município de Curitiba no Paraná, com uma camada de 15cm de solo tratado obedecendo as recomendações do fabricante para a dosagem, monitorando o comportamento por um período de 165 dias. Os locais em estudo apresentavam um nível de tráfego médio, variando de 100 a 200 veículos/dia. De acordo com as análises realizadas, foram obtidas as seguintes conclusões:

- Aumento do valor de ISC (Índice de Suporte Califórnia);
- Aumento da capacidade de suporte de tráfego em mais de 15 vezes;
- Manutenção da integridade estrutural da superfície;
- Protege a seção natural, evitando erosões;
- Elimina o aparecimento de ondulações na via;
- Elimina o aparecimento de marcas de pneus;

Enquanto que Amaral et al. (1998 apud Malko, 2015), construíram um trecho rodoviário na região norte do país, utilizando o mesmo produto usado por Murphy e Brazetti (2000). Analisando o desempenho do material nesse caso, concluíram que o produto não apresentou os resultados esperados, uma vez que o maior valor obtido de ISC foi de 28%, valor inferior ao mínimo exigido para base (60% a 40% em regiões onde há a ocorrência de escassez de materiais). Por fim, é importante ressaltar também, que em um dos trechos analisados nesse estudo, verificou-se a variação percentual significativa do ISC devido ao aumento da concentração do aditivo em 2x.

Em Malko (2015), foram analisadas três amostras de solos lateríticos, retirados de uma jazida localizada no município de Duque de Caxias no Rio de Janeiro, com diferentes enzimas, provenientes de três fornecedores distintos, variando as dosagens de aplicação e os tempos de cura. A composição química dos solos estudados é predominantemente de Alumínio (Al), Silício (Si) e Ferro (Fe), correspondendo a mais de 97% da composição das amostras. A partir do estudo realizado, concluiu-se que:

- A dosagem de aplicação das enzimas exerceu um fator importante nas misturas. Quanto menor a dosagem, ou seja, quanto maior for a quantidade de enzima na mistura, melhor será o comportamento do solo.
- Para longos períodos de análise não foram constatadas diferenças nos resultados, ou seja, o fator tempo não altera o resultado final da cura, concluindo que as reações ocorrem nos primeiros sete dias após a fabricação dos corpos de prova.
- Por meio das análises e dos estudos realizados, conclui-se que há viabilidade técnica para a utilização de enzimas em obras de pavimentação. Entretanto, a aplicação desse tipo de material carece de estudos mais aprofundados e entendimentos acerca da atuação dos aditivos nas misturas.

2.3.3. Solo-Cinza Volantes

Para Pinto (1971) e Nardi (1975), o uso de cinzas vulcânicas como aditivo às argamassas é uma técnica antiga, usada há cerca de 2.000 anos pelos romanos, que coletavam as cinzas no sopé do vulcão Vesúvio, localizado na cidade de Pozzuoli, na Itália. Fato esse que explica a denominação pozolana, dada a esse tipo de material. Enquanto que a cal se apresenta como um dos primeiros materiais de construção, utilizada pelos chineses junto com argila para a construção da Muralha da China.

Segundo Pinto (1971), a cinza volante (fly ash) é uma pozolana artificial, produzida nas usinas termelétricas que queimam carvão em pó. Para a norma americana, ASTM C618, pozolana pode ser definida como um material silicoso ou sílico-aluminoso, que na ausência de outros compostos, apresenta pouca ou nenhuma capacidade de cimentação. Entretanto, quando em forma dividida, na presença de umidade, reage quimicamente com hidróxidos alcalinos e alcalinos terrosos, formando compostos com propriedades cimentícias.

Rosa (2009) afirmou que as cinzas volantes são capazes de desenvolver reações pozolânicas, e que quando misturadas com cal, apresentam características importantes para o processo de estabilização de solos. Para Rohde et al (2006 apud Lopes, 2011), os elementos responsáveis pela atividade pozolânica nas cinzas volantes são: SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO , MgO , SO_3 , Na_2O e K_2O . Todavia, a velocidade da reação depende de outras variáveis, como a distribuição do tamanho das partículas e a mineralogia dos solos.

As reações que ocorrem na mistura solo-cinza volante-cal-água possuem um fenômeno físico-químico complexo envolvido: parte da cal reage com as partículas de solo, uma parte com o dióxido de carbono presente na fase água e ar do solo, e a parte restante, com a cinza volante, originando a reação de natureza pozolânica (Mateos, 1961 apud Rosa, 2009).

Segundo Lopes (2011), o tempo de cura à temperatura ambiente (21°C) pode ser apontado como o fator determinante no valor da resistência à compressão simples, conforme estudos realizados por análise de variância. As variações de temperatura afetam a velocidade das reações pozolânicas, com uma desaceleração em temperaturas inferiores a 7°C e aceleração em temperaturas elevadas.

2.3.4. Solo-Escória de Cobre

Conforme apresentado pelo Sumário Mineral – ano 2015, a produção brasileira de concretado de cobre em metal contido atingiu, em 2014, um total de 301.197 toneladas (11,2% a mais que a produção de 2013). Diante disso, estudos foram realizados para analisar um solo do Estado de Sergipe estabilizado granulometricamente com os resíduos obtidos da escória de cobre, e estabilizado quimicamente com cimento Portland. Além dos possíveis benefícios técnicos, o aproveitamento desse tipo de resíduo se apresenta como uma solução ambientalmente viável, já que o material não utilizado seria descartado em aterros sanitários (Almeida, 2016).

Nos processos de estabilização química e granulométrica, o teor de 30% de escória pós-jateada e 5% de cimento mostrou-se ser o mais adequado, reduzindo o índice de vazios e aumentando a resistência da mistura, devido ao preenchimento dos vazios do solo com as partículas de escória, além de proporcionar um contato maior entre as partículas envolvidas, reduzindo o teor de cimento na estabilização. Além disso, foi constatada uma diminuição da permeabilidade, da plasticidade e um aumento da rigidez, sem mudanças significativas na durabilidade nem a resistência à tração do solo. Portanto, o material poderia ser aproveitado em base de pavimento em vias de pequenos acessos ou trechos com baixo volume de tráfego (Almeida, 2016).

Segundo Gorai et al. (2003 apud Almeida, 2016), a escória de cobre encontrada é um silicato de ferro vítreo impuro, com reduzidas proporções de cobre e sulfetos de cobre, apresentando uma composição química variada.

A escória de cobre apresenta propriedades mecânicas adequadas para a utilização do material como agregado, incluindo alta resistência e excelente estabilidade, com valor elevado de ângulo de atrito, devido a sua forma angular. Entretanto, a escória tende a ser vítrea, afetando negativamente as suas propriedades de atrito (aderência da superfície), o que representa um problema, caso o material seja utilizado em superfícies de pavimentos. (Gorai et al, 2003 apud Almeida, 2016).

Entre as aplicações da escória de cobre, podemos citar: ferramenta de corte, produtos cerâmicos, vidro, abrasivos, camadas de pavimento, substituição parcial do cimento, agregado em mistura de cimento e outras aplicações. (Almeida, 2016).

Segundo Al-Sayed e Madany (1992), a escória de cobre pós-jateada pode ser usada como agregado fino em misturas de concreto asfáltico. Nos estudos apresentados, concluíram que a estabilidade das misturas com escória foram acima de 8 kN, e o teor ótimo de asfalto sofreu uma redução com o aumento da relação escória/areia e variou, em peso, de 4,4% a 5,7%.

Anjos (2015) propõe a utilização de escória de cobre pós-jateada em substituição ao agregado miúdo, já que o resíduo apresenta baixo índice de atividade pozzolânica (57,5%), melhora a trabalhabilidade, redução da absorção e do índice de vazios para misturas com teores da ordem de 80% de escória, diminuição no valor da resistência à compressão axial e da resistência à tração por compressão diametral com incrementos do teor do resíduo. Além disso, o concreto produzido apresentou um comportamento mais propício a deformações quando comparado com o concreto sem adição de escória.

Para Moura (2000), como camada drenante em pavimentos, a escória possui um coeficiente de permeabilidade médio de 0,038 cm/s, e que associado à sua massa específica, apresenta um bom desempenho como colchão drenante e como camada estabilizadora em pavimentos de paralelepípedo.

Em misturas de argila mole, cimento e escória de cobre, para uma trabalhabilidade constante, foram constatadas uma diminuição das resistências das misturas, quando submetidas a acréscimos no teor de escória, para um menor tempo de cura e um menor teor de cimento. Todavia, quanto maior o tempo de cura e maior o teor de cimento, foi observado um aumento de resistência, mesmo com o acréscimo da escória. Concluiu-se então que a escória de cobre pode ser utilizada na substituição parcial no tratamento de argilas moles, sem alterações significativas nas propriedades mecânicas de compressibilidade. (Bharati e Chen, 2016).

2.3.5. Solo-Resíduo Sólido Urbano

A estabilização de solos com cinzas de Resíduos Sólidos Urbanos tem sido menos estudada e utilizada que com as cinzas de carvão vegetal, já que o número de usinas termoeletricas de RSU é inferior ao número de usinas de carvão. Por outro lado, os efeitos da estabilização com RSU são comparáveis aos resultados obtidos em estabilização com o carvão vegetal, desde que o resíduo utilizado seja composto, em sua maioria, por matéria orgânica (Vizcarra, 2010).

Goh e Tay (1993) estudaram a possibilidade de utilização de cinzas volantes de RSU como material de aterro em obras geotécnicas. Verificou-se que a cinza volante apresenta os pré-requisitos para esse tipo de aplicação, como alta resistência e permeabilidade, típicos de material granular, e densidades inferiores, quando compactadas, aos materiais utilizados nos aterros convencionais. Além disso, concluiu-se que a utilização desse material na estabilização de solos, ao invés da aplicação de cal ou cimento, resultou no melhoramento da resistência ao cisalhamento da mistura, além da redução da compressibilidade com relação a solos não-tratados.

Vizcarra (2010) afirma que a aplicação da cinza volante de RSU no processo de estabilização de solos ocorre por meio da substituição de materiais como cal ou cimento pelas cinzas. A densidade da Cinza Volante de RSU é inferior à de outros materiais utilizados na construção de aterros: os valores da cinza de RSU variam de 1,7 a 2,4, enquanto que para areias, esse valor é da ordem de 2,65. Em solos compressíveis, a substituição de materiais convencionais de aterro pela cinza é vantajosa, reduzindo o carregamento sobre a fundação, resultando em recalques menos expressivos.

A utilização da Cinza de Fundo de RSU em misturas com solo tem se apresentado mais frequentemente que a de Cinza Volante de RSU. Nos EUA, a sua aplicação limita-se a apenas alguns trechos de teste. Em contrapartida, na Europa, esse material é utilizado como material para base de rodovias ou aterros há mais de duas décadas. Países como a Alemanha, Dinamarca e Holanda, utilizam mais de 50% da Cinza de Fundo de RSU produzida como material de base para rodovias e aterros (FWHA, 2008).

Goh e Tay (1993) compararam ainda o lixiviado de Cinza Volante com o lixiviado de Cinza Volante estabilizado com cal ou cimento. A partir da análise, verificaram que o lixiviado da Cinza Volante não estabilizada não atendeu as normas de qualidade de água potável estabelecidas em norma. Enquanto que a Cinza Volante estabilizada com cal ou cimento apresentou valores menores de crômio e cádmio, ou seja, concentrações não tóxicas. Entretanto, os autores em questão não avaliaram a mistura solo/cinza volante, o que poderia proporcionar um melhor entendimento sobre o comportamento do lixiviado de aterros construídos com solo/cinza volante.

Vizcarra (2010) verificou que entre a adição de cinzas ao solo, a cinza volante teve a maior ação estabilizante quando misturada ao solo, reduzindo significativamente a expansibilidade do solo. Entretanto, o efeito estabilizante é dependente do teor de cinza utilizado. Para teores de 40% de cinza volante, constatou-se a redução da expansibilidade do solo em até 0,5%, viabilizando o seu emprego em base de pavimentos.

2.4. Polímeros

Os polímeros estão presentes na maioria das atividades desenvolvidas pelas pessoas no dia a dia, seja por meio dos materiais utilizados, seja nos processos adotados. As aplicações dos polímeros são muito comuns em utensílios domésticos e nas indústrias automobilística e de brinquedos. A grande variedade de aplicação desses materiais se dá pelo baixo custo de produção, aliado ao peso reduzido e a elevada resistência à corrosão, tornando-o componentes mais resistentes a intempéries, prolongando a vida útil do material.

Essa sessão irá tratar do polímero utilizado nesse estudo, o Copolímero de Butadieno e Estireno. A solução polimérica utilizada foi comercializada na forma de solução aquosa, permitindo a mistura do composto com o solo arenoso e com a água destilada.

2.4.1. Copolímero de Butadieno e Estireno (XSBR)

O SBR é um exemplo de aditivo líquido não-tóxico, solúvel em água, derivado dos monômeros de estireno e de butadieno, conforme mostrado na Figura 2.1. O polímero é dividido em duas classes: Emulsão de SBR (E-SBR) e SBR em Solução (S-SBR). O SBR em solução é um do grupo de polímeros que apresenta um enorme potencial para aplicação em diversas áreas. O látex de butadieno e estireno é um composto relativamente barato, facilitando a obtenção e a aplicação. Esse material pode ser aplicado como estabilizante de solos em canteiros de obra, e não demanda qualquer instrumentação específica para o serviço. (Ahmed, 2013).

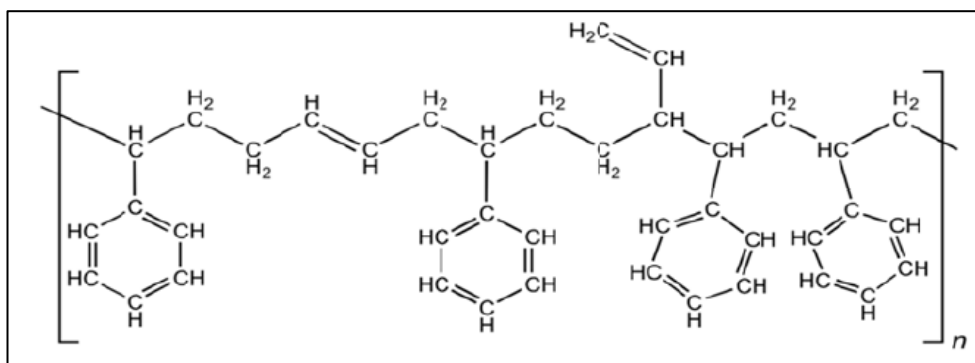


Figura 2.5 - Estrutura Química do Polímero de Butadieno e Estireno (Ahmed, 2013)

Ainda segundo Ahmed (2013), técnicas baseadas na estabilização química com o polímero SBR são amplamente empregadas no ramo de transportes, entre as principais aplicações, destacam-se o auxílio no controle da poeira gerada a partir da passagem de automóveis em vias não pavimentadas, o controle da erosão, o controle da fixação e da lixiviação de resíduos e materiais reciclados. A aplicação do polímero não se limita ao setor de transportes, sendo empregado também no setor da construção civil, em camadas inferiores ao nível da fundação de edificações.

A técnica de obtenção do SBR predominante é a de polimerização por emulsão, na qual os monômeros apresentam-se dispersos em água com um surfactante e sofrem a polimerização através de radicais livres que proveem da decomposição de um iniciador solúvel presente na mistura. Obtém-se então o látex, que é uma dispersão estável de um polímero em meio aquoso (CHERN, 2006).

Misturas entre material poroso e o polímero de butadieno e estireno não se limitam a misturas com solo, pois estudos desenvolvidos por Rozenbaum et al. (2005) comprovam que o látex de SBR em mistura com o cimento reduz a proporção de água necessária nas misturas, e aumenta a resistência do material a flexão e a tração. Em contrapartida, reduz a resistência a compressão do composto.

Para Visconte et al (2001), os copolímeros de butadieno são muito utilizados em misturas poliméricas, produzidas a partir da mistura mecânica de dois ou mais polímeros, como NR/SBR (mistura de borracha natural com o SBR), conforme apresentado na Figura 2.2.



Figura 2.6 - Borracha de Butadieno e Estireno

Rossignolo (2009) afirma que pesquisadores indicaram que há um grande potencial envolvido a misturas de cimento com fumo de sílica e o látex SBR, com relação ao aumento da performance das propriedades do concreto. Diante disso, o polímero SBR apresenta-se como uma alternativa na estabilização de solos.

2.4.1.1. Polimerização em Emulsão

A polimerização em emulsão é um processo químico único, onde o processo de polimerização dos radicais livres heterogêneos envolve a emulsificação de um monômero hidrofóbico por um emulsificante de óleo em água, seguida da reação de início com um iniciador insolúvel em água (Persulfato de Sódio – NAPS) ou um iniciador solúvel em óleo. Entre os monômeros mais utilizados no processo, destacam-se: butadieno, estireno, acrilonitrila, ésteres acrílicos, metil metacrilato, acetato de vinil e cloreto de vinil (CHERN, 2006).

Segundo Urban et al. (2002), o processo de polimerização em emulsão é amplamente utilizado na indústria química para a produção de látex para inúmeras aplicações, como: revestimentos e massa polimérica. Além disso, para Gilbert (1995), esse processo apresenta algumas vantagens com relação ao processo em solução. O uso de água como meio de dispersão se apresenta como uma alternativa ambientalmente viável, permitindo também a dissipação de energia na forma de calor durante o procedimento de polimerização. Do mesmo modo, a baixa viscosidade da emulsão proporciona o acesso a frações mais pesadas do polímero, inacessíveis em solução.

Em Thickett e Gilbert (2007 apud Marinangelo, 2010), o conceito da teoria e a cinética do processo, incluindo as reações e os eventos que ocorrem na polimerização em emulsão são apresentados na Figura 2.3.

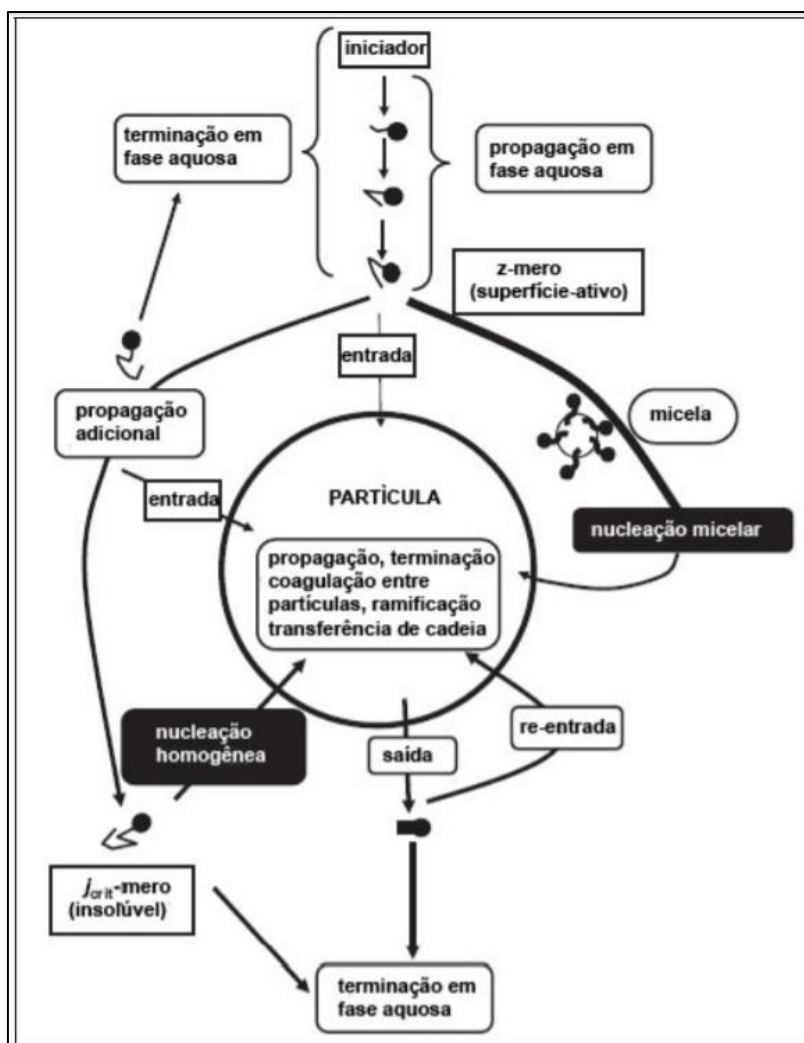


Figura 2.7 - Esquema integral das reações presentes no processo típico de polimerização em emulsão (Thickett e Gilbert, 2007 apud Marinangelo, 2010)

No final da década de 40, foi desenvolvida a técnica de polimerização em emulsão a frio (5°) para produzir o polímero SBR. As principais diferenças apresentadas entre os processos de polimerização a quente e a frio são os valores de temperatura e o tipo de sistema iniciador. O sistema iniciador usado no processo de polimerização em emulsão a frio é um sistema redox constituído por um sal ferroso e um hidroperóxido (ROOH). Os radicais iniciadores são formados a partir da reação entre o hidroperóxido e o íon ferroso. Para a regeneração do sal ferroso durante o processo de polimerização, utiliza-se o sulfoxilato. Tanto no processo a quente quanto no processo a frio, são utilizados mercaptans, que atuam como agentes de transferência de cadeia, evitando a formação de polímero com elevado peso molecular, indesejável para o processamento do elastômero (Rocha et al., 2007).

Segundo Odian (1991), a polimerização em emulsão é um processo vantajoso, onde há um controle maior da temperatura e da viscosidade do meio reacional (coloidal), facilitando o controle do processo. Além disso, o produto final, como o látex, pode ser utilizado para fins comerciais, desprezando operações de separação.

Conforme publicado pelo Instituto Internacional de Produtores de Borracha Sintética (International Institute of Synthetic Rubber Producers, 2004), o copolímero de butadieno e estireno composto apolar e mau condutor de eletricidade. Além disso, enquanto as propriedades elétricas do E-SBR dependem da quantidade e do tipo dos agentes emulsificantes e coagulantes, o E-SBR, quando vulcanizado, apresenta resistência a ácidos e bases diluídas, inchando em meios apolares tais como, gasolina, óleos ou graxas. Como consequência, o SBR não pode ser aplicado em situações que necessitem de resistência ao inchamento com solventes à base de hidrocarbonetos.

Segundo Rocha et al. (2007), no momento em que a conversão desejada é atingida, os monômeros que não reagiram são retirados do látex. O butadieno é retirado por desgaseificação do látex, por meio do processo de destilação, reduzindo a pressão do sistema. Com relação ao estireno, esse composto é removido por arraste de vapor, por meio da passagem do látex através de uma coluna de stripping. O produto final, o látex, é estabilizado com um antioxidante apropriado e transferido para o tanque de mistura.

2.4.1.2. Polimerização em Solução

Perini e Da Cunha (2014), afirmam que, em relação as microestruturas, o polímero S-SBR apresenta vantagens quando comparado com o E-SBR, dentre elas, faixa de coloração, diminuição da quantidade de carga, estabilidade dimensional, elevada velocidade de cura, além da resistência a abrasão e a rasgos.

Além do mecanismo da polimerização de SBR em solução ser aniônico, os iniciadores utilizados são constituídos por um composto alquil lítio. Sabendo que os solventes interferem na microestrutura das cadeiras formadas, os solventes utilizados podem ser tanto polares quanto apolares. Com solventes apolares (hexano), o composto butadieno polimeriza primeiro (o composto é mais reativo do que o estireno, em meio apolar, devido a sua baixa polaridade), e em seguida, após quase todo o butadieno consumido, o estireno inicia o processo polimerização. Como resultado, o processo resulta na formação de SBR em bloco. Portanto, na produção de polímeros com distribuição aleatória dos meros, em solventes apolares, aumenta-se a quantidade de butadieno no meio reacional, mantendo a concentração de estireno seja sempre superior a concentração de butadieno (Rocha et al., 2007).

Para Rocha et. al (2007), os polímeros de SBR produzidos no processo em solução apresentam características distintas, variando de acordo com as condições do processo de produção. O S-SBR apresenta algumas vantagens sobre E-SBR, refletidas em suas propriedades mecânicas, dentre elas: a disponibilidade de uma ampla faixa de colorações, estabilidade dimensional, maior velocidade de cura e os vulcanizados têm maior resistência ao rasgo e melhor resistência à abrasão. Entretanto, os compostos S-SBR apresentam também desvantagens, com relação à incorporação de cargas, e à processabilidade devido à estreita distribuição de peso molecular. Com relação ao primeiro, estudos confirmaram que a adição de aminas durante o processo de polimerização é capaz de reduzir a magnitude do problema. No processo, a amina é incorporada nos terminais de cadeia do elastômero facilitando a dispersão do negro de fumo, resultando no aumento da elasticidade.

A utilização do processo de polimerização em solução facilita o controle do peso molecular do composto, uma vez que o mecanismo e a cinética possibilitam o crescimento igualitário das cadeiras, e, conseqüentemente, um peso molecular controlável por agentes de terminação.

3

Programa Experimental

3.1.

Considerações Iniciais

O programa experimental de ensaios definido tem como objetivo, identificar, analisar e mensurar o efeito da adição de compostos químicos (polímeros em solução aquosa) no solo arenoso. Sendo assim, o programa foi dividido em três etapas:

A primeira etapa consiste no processo de caracterização do solo utilizado e na análise química dos polímeros escolhidos para o estudo.

Na segunda etapa foram analisados os comportamentos mecânicos de misturas de solo com polímero, por meio dos ensaios de cisalhamento direto e de compressão simples. As misturas analisadas apresentaram teores água/polímero variando de 1:1 a 1:4 em massa, e tempos de cura variando entre 1 a 45 dias.

Na terceira e última etapa foram realizados Ensaio de Permeabilidade para avaliar a variação do coeficiente de permeabilidade da areia quando misturada ao polímero, além de uma análise microscópica (MEV) das ligações grãos-polímero.

O processo de caracterização do material e os ensaios de cisalhamento direto e de Permeabilidade apresentados no programa experimental dessa pesquisa, foram realizados no Laboratório de Geotecnia e Meio Ambiente (LGMA), enquanto que a Microscopia Eletrônica de Varredura utilizando o microscópio eletrônico de varredura da marca JEOL, modelo JSM-6510LV, foi realizado no Laboratório de Microscopia Eletrônica do Departamento de Engenharia Química dos Materiais (DEQM), ambos localizados na Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio).

3.2. Materiais utilizados

3.2.1. Solo

O solo utilizado nesse estudo foi coletado em um rio nas proximidades da região do Porto de Caxias, localizado no município de Itaboraí, no estado do Rio de Janeiro. A escolha deste tipo de solo está relacionada ao fato de areias serem materiais inertes e muito utilizadas em obras geotécnicas. O uso de um solo argiloso ou siltoso poderia dificultar a análise do efeito provocado pelo polímero utilizado, pois solos que possuem argilominerais tendem a apresentar elementos não-inertes em sua composição, resultando na formação de grumos.

A Figura 3.1 apresenta a localização da jazida utilizada para a obtenção do solo utilizado nesse estudo, enquanto que a Figura 3.2 representa uma amostra do solo utilizado na sua condição inicial ou pura.



Figura 3.1 – Localização da Jazida – Itaboraí/RJ

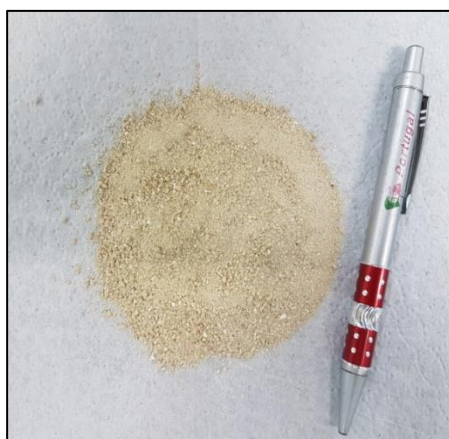


Figura 3.2 – Amostra de Solo

3.2.2. Polímero

O polímero utilizado nesse estudo foi obtido junto a empresa Nitriflex, uma das empresas do ramo de compostos poliméricos no Brasil, que produzem esse tipo de composto sob encomenda. O Copolímero de Butadieno e Estireno (XSBR) é formado por dois monômeros, o Butadieno e o Estireno, sendo necessária a mistura dos mesmos antes da comercialização.

O Copolímero de Butadieno e Estireno Modificado foi comercializado sob o nome Latex XSBR. Conforme orientação da empresa fornecedora, o material foi mantido dentro do contêiner original de 20 L (Figura 3.3), no LGMA da PUC-Rio, ambiente seco, bem ventilado, ao abrigo da luz solar direta e de temperatura amena (20°C), afastado de dispositivos de aquecimento e devidamente vedado.



Figura 3.3 – Solução Polimérica Aquosa – Butadieno e Estireno (XSBR)

A tabela 3.1 apresenta as propriedades físico-químicas do copolímero, disponibilizados pela empresa Nitriflex.

Tabela 3.1 – Propriedades Físicas e Químicas do Copolímero XSBR (Nitriflex, modificado)

Aspecto:	Líquido
Odor:	Caraterístico
pH:	8,5-9,5
Ponto de Fusão:	Não aplicável.
Ponto de Ebulição:	100°C
Taxa de Evaporação:	Semelhante à água.
Densidade:	~ 1,0
Solubilidade em água:	Miscível.

3.2.3. Água

A água utilizada tanto nos ensaios de caracterização física, quanto na preparação das misturas solo/polímero para realização dos ensaios, foi água destilada (Figuras 3.4 a) e b), conforme especificado em normas técnicas.



Figura 3.4 – (a) Dosador de Água Destilada; (b) Tanque do Destilador de Água

3.2.4. Misturas Solo-Polímero

As misturas analisadas são apresentadas na Tabela 3.2 e explicadas em seguida. O foco do estudo era analisar e mensurar a influência dos teores água/polímero e dos tempos de cura no comportamento mecânico das misturas, o que resultou em onze diferentes misturas. Em alguns casos, para atestar a qualidade dos resultados, foram realizados de dois a três ensaios para cada mistura.

Tabela 3.2 – Misturas Solo/Polímero – Cisalhamento Direto

Solo	Polímero	Teor Água/Polímero (g)	Tempo de Cura (h)
Areia	Copolímero de Butadieno e Estireno (XSBR)	1:1	24
			72
		1:2	72
			96
		1:4	48
			72
			96
			120
			576
			720
			792

Para cada mistura foram moldados e ensaiados 3 corpos de prova, a fim de obter os pontos mínimos necessários para o traçado da envoltória de ruptura.

Os corpos de prova (CPs) utilizados no ensaio de cisalhamento direto são quadrados, com tamanho padrão de 100mm x 100mm x 20mm, totalizando 200 cm³ de volume. As misturas foram realizadas de forma manual no prato metálico com o auxílio de uma espátula.



Figura 3.5 – (a) Preparação das Amostras; (b) Corpo de Prova (CP) quadrado

Afim de garantir o valor de densidade relativa igual a 50%, foi calculada a massa necessária para preencher o volume conhecido do molde, e a partir disso, foi realizada a compactação manual da mistura dentro do molde.

Todos os corpos de prova utilizados nesse estudo foram produzidos a partir da mesma metodologia, ou seja, sob as mesmas condições de temperatura e umidade (20° C e 70%, respectivamente). Para a comparação dos resultados, foram executados também corpos de prova sem a adição de polímeros, ou seja, areia pura.

3.3. Métodos e Procedimentos de Ensaio

3.3.1. Ensaio de Caracterização Física do Solo

A caracterização física das amostras de solo arenoso utilizadas foi realizada a partir de ensaios de análise granulométrica, densidade específica dos grãos, determinação do índice de vazios máximo e mínimo. Os ensaios foram executados no Laboratório de Geotecnia e Meio Ambiente da PUC-Rio e seguiram os procedimentos definidos nas normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT):

- NBR 6457/1986 – Amostras de Solo. Preparação para Ensaios de Compactação e Ensaios de Caracterização;
- NBR 7181/1984 – Solo – Análise Granulométrica;
- NBR 6508/1984 – Solo – Determinação da Massa Específica dos Grãos;

3.3.2. Método de Caracterização Química do Solo

No processo de caracterização da composição química da matriz arenosa foi empregado o método de determinação por Fluorescência de Raios-X (FRX) utilizando o aparelho de modelo Rainy EDX 720, da marca Shimadzu (Figura 3.6). O procedimento foi realizado no Laboratório de Caracterização de Combustíveis (LACCOM) da PUC-Rio (Silveira, 2018).



Figura 3.6 – Aparelho Rainy EDX 720, Shimadzu (Shimadzu Corp.)

A determinação do pH foi realizada a partir da suspensão dos solos em água destilada (proporção 1:2,5) mediante o uso do pHmetro. A definição do pH fornece a acidez ou alcalinidade do solo. Esse ensaio foi realizado no Laboratório de Geotecnia e Meio Ambiente da PUC-Rio, seguindo o Manual de Métodos de Análises de Solos (CNPS/EMBRAPA, 1997) vigente (Silveira, 2018).

3.3.3. Processo de Caracterização Mineralógica do Solo

Para a identificação dos principais componentes minerais de cada fração do solo, desenvolve-se o estudo mineralógico, permitindo também descrever as formas dos grãos. Essa análise foi realizada no Laboratório de Estruturas e Materiais da PUC-Rio, utilizando a lupa binocular da marca Leica, com a captura das imagens feita através do programa da lupa (Figura 3.7). Antes da análise, a amostra foi homogeneizada e passada nas peneiras de #40 (0,42mm) e #200 (0,074mm), possibilitando a análise do comportamento das fases mineralógicas em função da faixa granulométrica. (Silveira, 2018).



Figura 3.7 - Lupa Binocular, Leica (Leica Microsystems)

3.3.4. Ensaio de Cisalhamento Direto

O ensaio de cisalhamento direto é um dos ensaios mais antigos utilizados na mecânica dos solos para determinação dos parâmetros de resistência do solo, coesão (c') e ângulo de atrito (Φ'), e consequentemente, estabelecer a envoltória de resistência de Mohr-Coulomb em tensões efetivas.

O ensaio é dividido em duas etapas: adensamento e cisalhamento. A fase de adensamento consiste na aplicação de uma carga sob o corpo de prova, e posteriormente, aguardar a estabilização dos deslocamentos verticais se, indicando a dissipação completa dos excessos de poro-pressão gerados pela aplicação do carregamento. Como o solo utilizado nesse estudo é de matriz arenosa, a fase de adensamento foi considerada como instantânea.

O ensaio é executado em uma caixa metálica bipartida, deslizando-se a metade superior em relação a metade inferior. Nesse processo foram utilizados corpos de prova de solo prismáticos de seção quadrada. Inicialmente, o corpo de prova é comprimido por uma força normal “N”, e posteriormente a aplicação, em velocidade constante, de uma força cisalhante “T”. A força “T” impõe um deslocamento horizontal (ΔL) ao corpo de prova até o momento da ruptura (o plano de ruptura em ensaios de cisalhamento direto é horizontal). Para cada valor de tensão normal aplicada, temos um valor de tensão cisalhante de ruptura, e a partir da medição no anel de carga e da área do plano horizontal da amostra de solo podemos traçar a envoltória de resistência (Figura 3.8).

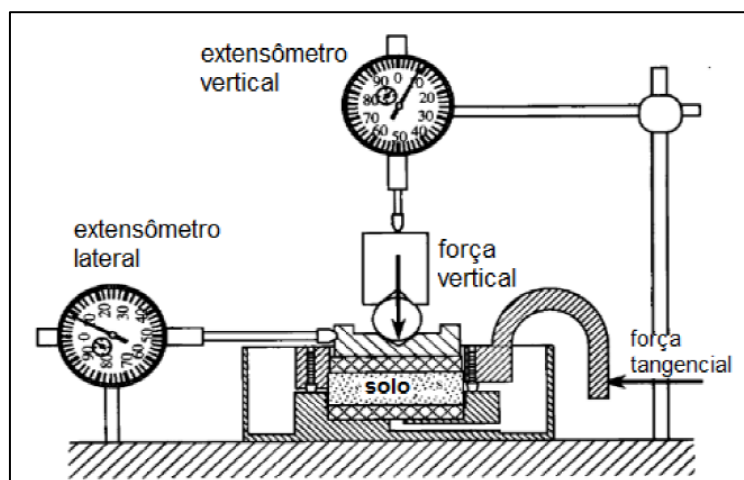


Figura 3.8 – Equipamento do Ensaio de Cisalhamento Direto (Romanel, 2015)

Além do anel de carga, o ensaio mede os deslocamentos horizontais e verticais através transdutores de deslocamento, LVDT's e extensômetros.

Os equipamentos usados nesse ensaio são listados abaixo:

- Caixa bipartida com placas dentadas e perfuradas;
- Pedras porosas de topo e base e quepe para transmissão de carga;
- Molde do CP;
- Prensa equipada com motor e sistema de transmissão de carga;
- Extensômetros mecânicos ou transdutores elétricos de deslocamentos;
- Anel de carga;

A Figura 3.9 apresenta os itens que compõem o utilizado nesse estudo e localizado no Laboratório de Geotecnia e Meio Ambiente da PUC-Rio.

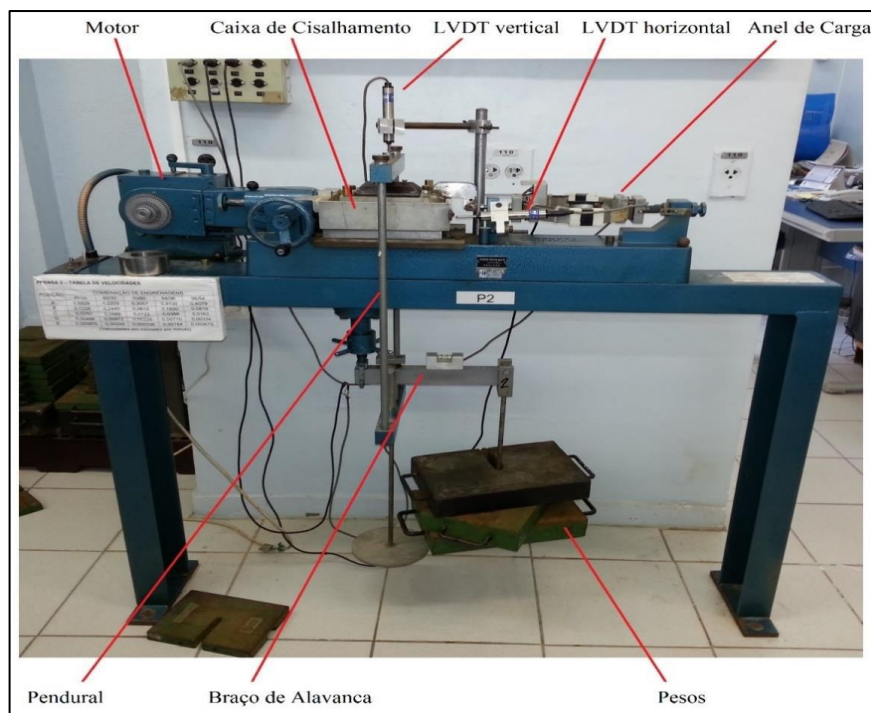


Figura 3.9 - Itens que compõem o equipamento de CD (Repsold, 2018)

A leitura dos dados do ensaio possibilita o traçado das curvas de tensão cisalhante versus deslocamento, de deslocamento vertical versus deslocamento horizontal, e de tensão normal versus tensão cisalhante, denominada também de envoltória de ruptura.

3.3.5. Ensaio de Permeabilidade

Na presente pesquisa, com o intuito de analisar a permeabilidade da amostra de solo com polímero e ao mesmo tempo identificar os compostos químicos liberados pela amostra quando submetidos a um fluxo pela amostra, optou-se por adaptar o permeâmetro existente no Laboratório de Geotecnia e Meio Ambiente da PUC-Rio, onde foi possível aplicar o mesmo tipo de pressão e percolar água pela amostra.

Conforme usado por Perez (2017), o permeâmetro é apresentado na Figura 3.10, com os principais componentes do sistema e da interface.

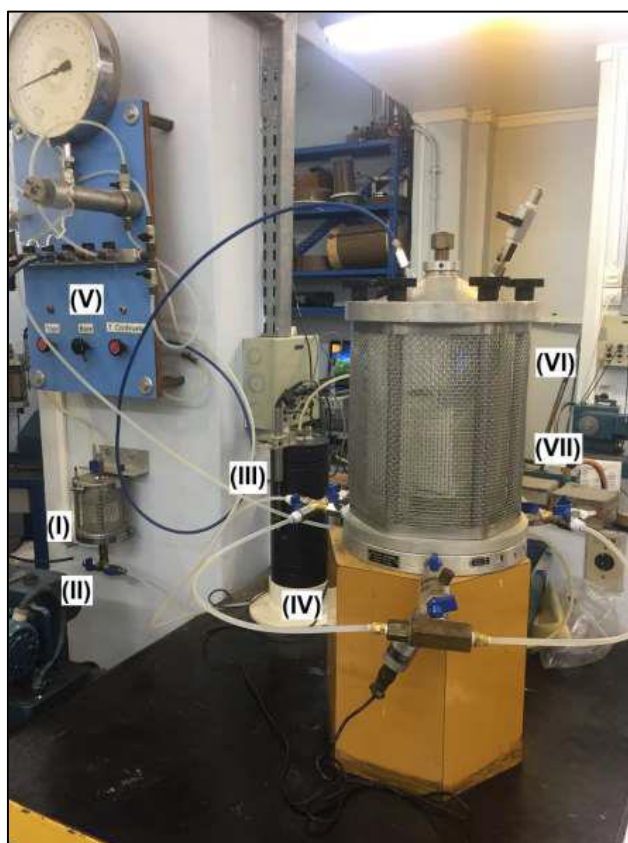


Figura 3.10 – Permeâmetro: (I) Material Coletado; (II) Válvula de retirada do material; (III) Saída do fluido do topo da amostra; (IV) Medidor de Variação de Volume; (V) Painel de Pressão; (VI) Câmara do Permeâmetro; (VII) Amostra; (VIII) Transdutor de pressão

As amostras foram colocadas no pedestal da câmara, com uma pedra porosa (previamente saturada) e um papel filtro em cada extremidade, como mostrado na Figura 3.11. Em seguida, a membrana foi colocada na amostra, aplicando sucção entre suas paredes, e posteriormente fixada com anéis de vedação, conforme a Figura 3.12.



Figura 3.11 – Amostra no Pedestal com Pedra Porosa e Papel Filtro

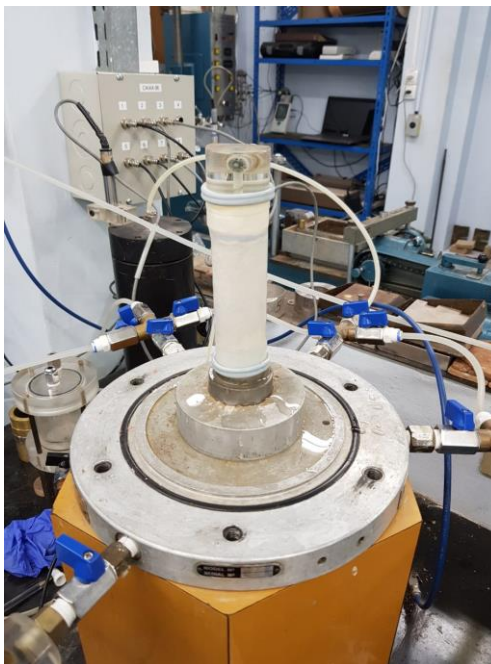


Figura 3.12 – Amostra no Pedestal envolta com a Membrana

Em seguida, a câmara foi fechada e preenchida por água. Primeiramente foi aplicada uma pressão confinante ao corpo de prova, onde o fluxo de água acontecia pelo topo e pela base da amostra, com a mesma pressão.

Posteriormente, os incrementos de tensão confinante aplicados a amostra foi de 50 kPa. Para cada incremento de tensão foi medido o valor da poropressão na amostra. Os incrementos foram aplicados até alcançar a saturação da amostra, quando o parâmetro B de Skempton se aproxima de 1 ($B = \Delta u / \Delta \sigma_c$). O valor máximo de tensão aplicada foi 500 kPa, enquanto que a poropressão medida foi 495 kPa, quando começou o processo de percolação de água na amostra. Para que a percolação fosse ascendente, a pressão no topo da amostra foi mantida com uma diferença de 50 kPa da pressão da base, que ainda apresentava um valor de menos 5 kPa em relação à tensão confinante. A base da amostra estava conectada ao medidor de variação de volume, de onde vinha a água que percolava pela amostra, e o topo da amostra, conectado a uma interface, onde foi coletado o fluido que percolou pela amostra.

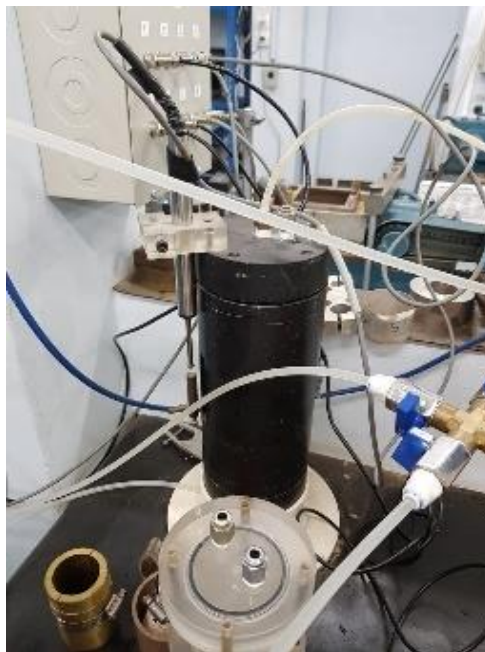


Figura 3.13 – Saída do Percolado do Topo da Amostra

3.3.6. Análise Química dos Materiais

Na análise química da areia pura e da mistura solo/polímero foram utilizadas duas técnicas: Espectrometria de Fluorescência de Raios X (FRX) e a Espectroscopia de Infravermelho (IV).

3.3.6.1. Espectrometria de Fluorescência de Raios X (FRX)

A FRX é uma técnica que permite a identificação dos elementos químicos presentes nas amostras, além de apresentar as concentrações de cada composto químico. As análises foram realizadas em amostra de areia pura e em amostra de solo com polímero.

As análises foram realizadas com o equipamento do modelo Rayny EDX-700, marca Shimadzu, disponível no Laboratório de Caracterização de Combustíveis (LACCOM) da PUC-Rio. As amostras foram moldadas em tamanho inferior a 1mm, além do acondicionamento em um port-amostras próprio para o tipo de ensaio.

3.3.6.2. Espectroscopia de Infravermelho (IV)

A análise de Espectroscopia de Infravermelho (IV) é um tipo de espectroscopia de absorção, sendo muito utilizada na identificação de um composto ou na definição dos elementos que compõem uma amostra. Esse método permite identificar as mudanças produzidas pela mistura do solo com o copolímero de butadieno e estireno no comportamento característico da areia pura.

Os espectros da amostra de areia pura (10% de umidade) e da mistura solo/copolímero foram obtidos com um espectrômetro de infravermelho de modelo Nicolet IR200 (Thermo Scientific, EUA) disponível no Laboratório de Caracterização de Combustíveis (LACCOM) da PUC-Rio com o auxílio da Prof^a Maria Isabel Pais da Silva do Departamento de Química da PUC-Rio. As condições para a obtenção dos espectros são descritas a seguir:

- 01 (um) "background" com a célula limpa antes de cada espectro, 120 leituras por espectro, com resolução de 4cm^{-1} e região de aquisição entre 4000 e 500cm^{-1} , sendo todos os espectros obtidos na transmissão.

Os exemplares foram moldados em amostras de tamanho inferior a 1 mm, misturadas ao pó de Brometo de potássio (KBr), obtendo um melhor contato ótico, e compactadas para a formação de uma pastilha. A pastilha era transferida para um porta-amostra, e posteriormente levada para análise.

3.3.7. Microscopia Eletrônica de Varredura – MEV

A Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) tornou-se uma ferramenta de trabalho muito utilizada por profissionais de diversas áreas, devido à sua capacidade de possibilitar a caracterização de materiais, bem como a identificação da superfície de amostras em escala micrométrica, onde é possível observar, analisar e explicar corretamente os fenômenos microscópicos. Para estudos geotécnicos, o MEV viabiliza uma análise das partículas, dos vazios e dos arranjos das partículas do solo, além da microestrutura de floculação (Perez, 2017).

O método tornou-se um dos instrumentos disponíveis mais importantes para a observação e a análise das microestruturas de objetos sólidos. Um dos principais motivos que justificam a sua utilização é a alta resolução obtida nas amostras são observadas; valores que variam de 2 a 5 nanômetros são geralmente apresentados por instrumentos comerciais, enquanto instrumentos de pesquisa avançada são capazes de alcançar uma resolução melhor que 1 nm (Nagatani et al. 1987).

Para Maliska (2007), a elevada profundidade de foco (imagens tridimensionais) e a possibilidade de compilar uma análise microestrutural com a microanálise química são os principais fatores, além da alta resolução nas imagens, que contribuem em muito para o uso vasto dessa técnica.

O ensaio de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) foi realizado no Laboratório de Microscopia Eletrônica (LME) do Departamento de Engenharia Química e de Materiais (DEQM) da PUC-Rio.

4 Resultados e Discussões

4.1. Considerações Iniciais

Neste capítulo serão apresentados os resultados e análises dos ensaios descritos no capítulo anterior. Esses ensaios tiveram por objetivo uma melhor compreensão do comportamento dos materiais em estudo.

4.2. Caracterização Física do Solo

Segundo a classificação da NBR 6502 (ABNT, 1995), esse material é classificado como uma areia média, enquanto no Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS), ele é classificado como uma areia uniforme mal graduada. Durante o processo de caracterização do material, não foi observada a presença de matéria orgânica. A Tabela 4.1 apresenta os índices físicos da areia.

Tabela 4.1 – Índices Físicos da Areia de Itaboraí

Índices Físicos	Valor
Densidade dos grãos (G_s)	2.65
Diâmetro efetivo D_{10}	0.22 mm
Diâmetro médio D_{50}	0.58 mm
Coefficiente de uniformidade (C_u)	3.27
Coefficiente de curvatura (C_c)	0.87
Índice de vazios máximo (e_{max})	0.96
Índice de vazios mínimo (e_{min})	0.71

A análise granulométrica consistiu no peneiramento de 1000 gramas do solo, utilizando a peneira #40 (0,425 mm), conforme a NBR 7181 (ABNT, 1984). O material retido na peneira foi lavado, e posteriormente, secado por 24h na estufa a 105 °C, realizando-se o peneiramento do material grosseiro logo após este período. Como resultado, temos a curva granulométrica do solo (Figura 4.1).

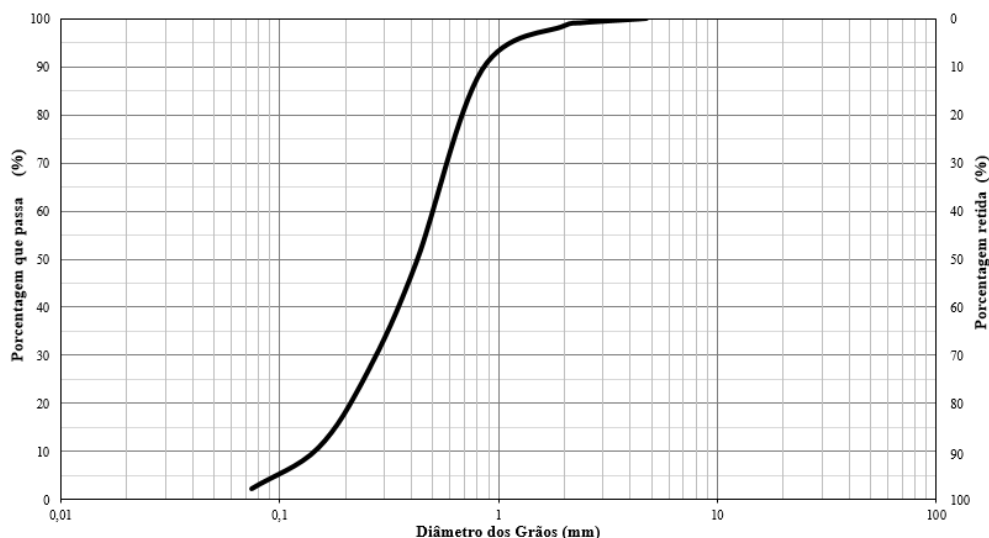


Figura 4.1 – Curva Granulométrica do Solo

4.3. Caracterização Química do Solo

Na análise química do solo foram verificados os teores de sílica (SiO_2), alumina (Al_2O_3), potássio (K_2O), óxido de titânio (TiO_2) e ferro (Fe_2O_3), dentre outros compostos químicos (Tabela 4.2). O resultado confirma, conforme esperado, a presença significativa de sílica, e aponta a presença de alumina como o segundo elemento mais representativo (Silveira, 2018).

O solo apresenta um valor de pH (em água) igual a 4,4, mostrando que a matriz do composto é ácida. Para Moreira (2006), a maioria dos solos apresentam pH entre 4,0 e 8,5. Em climas úmidos, os horizontes superficiais de solos são ácidos devido à lixiviação de bases e decomposição da serrapilheira. A fertilização, a chuva ácida e a fixação biológica de nitrogênio contribuem para a redução pH do solo. Enquanto que em regiões mais secas ou semi-áridas, os solos são geralmente alcalinos (Silveira, 2018).

Tabela 4.2 – Composição Química da Areia de Itaboraí

Amostra	Constituintes em Porcentagens					
	SiO_2	Al_2O_3	K_2O	TiO_2	Fe_2O_3	Outros
Matriz Arenosa	66.02	30.01	3.20	0.50	0.21	0.06

4.4. Caracterização Mineralógica do Solo

As fases mineralógicas identificadas são: quartzo, muscovita, k-feldspato, óxidos e hidróxidos de ferro (Figura 4.2). A amostra é composta por quartzo (85%), com reduzido grau de esfericidade e arredondamento, e alta angulosidade. Os compostos k-feldspato, muscovita, óxidos e hidróxidos são observados em pequenas proporções, e totalmente liberados em ambas as frações granulométricas (Silveira, 2018).

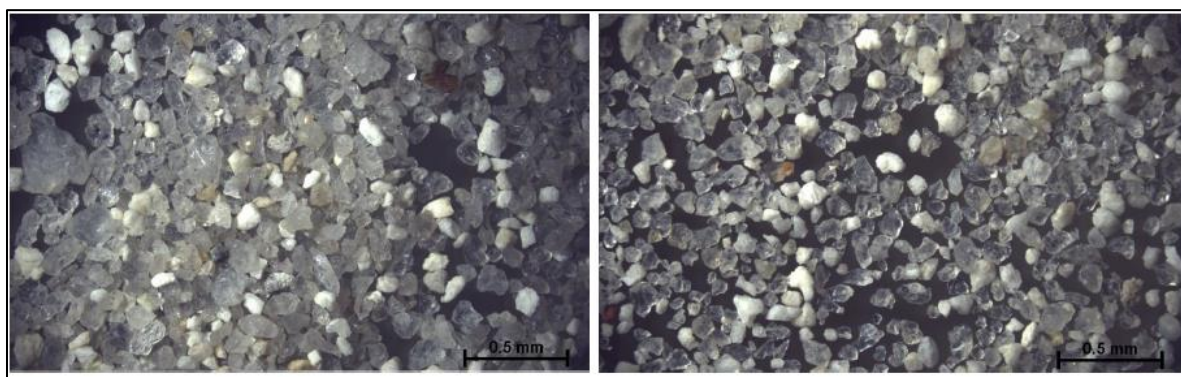


Figura 4.2 – Aspecto macroscópico da amostra de solo: (a) fração retida na peneira n°40 e (b) fração de areia passante na peneira de n°40 e retida na peneira de n°200 (Silveira, 2018)

Conforme apresentado anteriormente, as análises químicas apontam que as amostras são compostas majoritariamente de SiO_2 , Al_2O_3 e K_2O . Os altos teores de SiO_2 confirmam, a partir da análise microscópica, uma grande quantidade de quartzo na composição do solo. Os teores de Al_2O_3 indicam uma possível ocorrência de minerais secundários argilosos, podendo esses serem frutos de transformações secundárias (Silveira, 2018).

4.5. Ensaio Mecânico

4.5.1. Ensaio de Cisalhamento Direto

Conforme apresentado no item 3.2.4, as misturas solo/polímero foram ensaiadas para diferentes tempos de cura, e para variados teores água/polímero. Os resultados obtidos nos ensaios de cisalhamento direto na areia pura e nas misturas solo/polímero são apresentados a seguir.

4.5.1.1. Resultados da Areia Pura

Nas Figuras 4.3 e 4.4 e na Tabela 4.3 serão apresentados os resultados dos ensaios CD em amostras de areia pura. Os resultados serão utilizados como parâmetros na análise do comportamento mecânico das misturas solo/polímero.

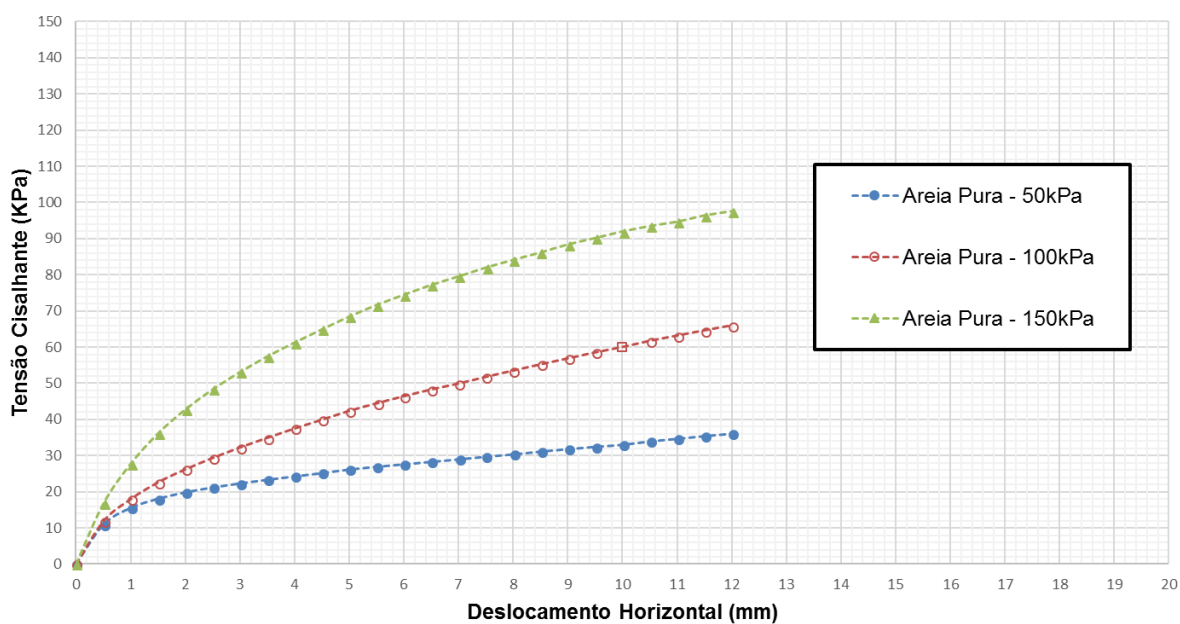


Figura 4.3 – Gráfico Tensão Cisalhante vs Deslocamento Horizontal – Areia Pura

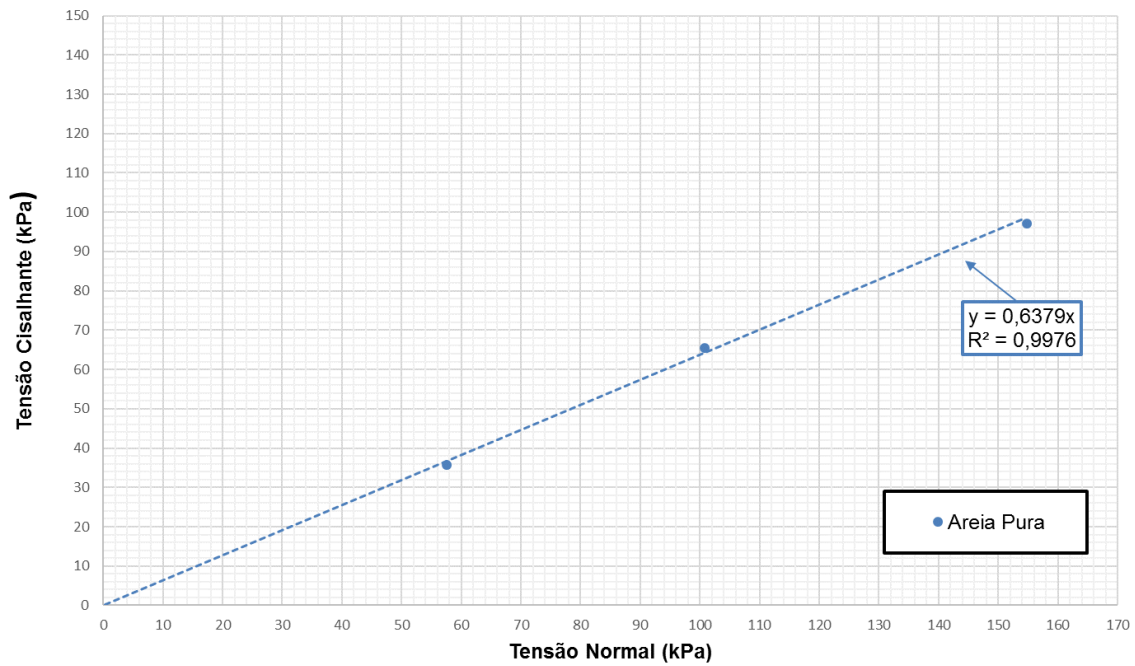


Figura 4.4 – Envoltória de Ruptura – Areia Pura

Tabela 4.3 – Parâmetros de Resistência – Areia Pura

Areia Pura		
Tensão Aplicada (kPa)	τ (kPa)	σ (kPa)
50	36,2	57,3
100	65,9	100,5
150	97,5	154,5
Parâmetros de Resistência		
Φ'	33,0	Graus
c'	0	kPa

4.5.1.2.

Resultados Utilizando o Teor 1:1 e Tempo de Cura 24h

Nas Figuras 4.5 e 4.6 e na Tabela 4.4 serão apresentados os resultados dos ensaios CD das misturas com teor 1:1 (1g de água para 1g de polímero) e com tempo de cura de 24h (1 dia).

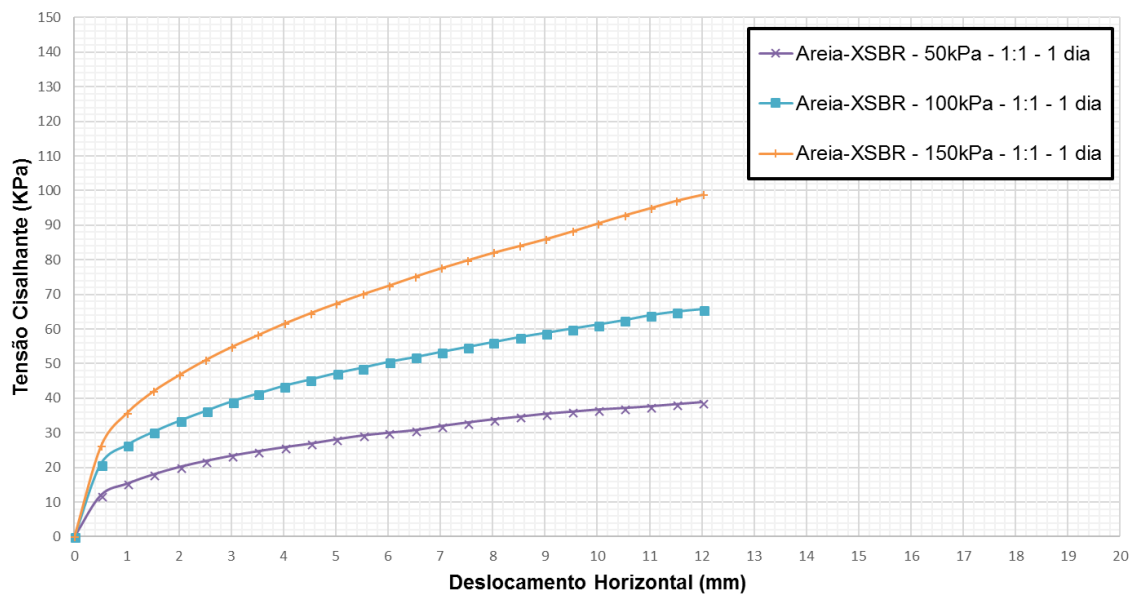


Figura 4.5 – Gráfico Tensão Cisalhante vs Deslocamento Horizontal – Areia/XSBR (1:1 e 24h)

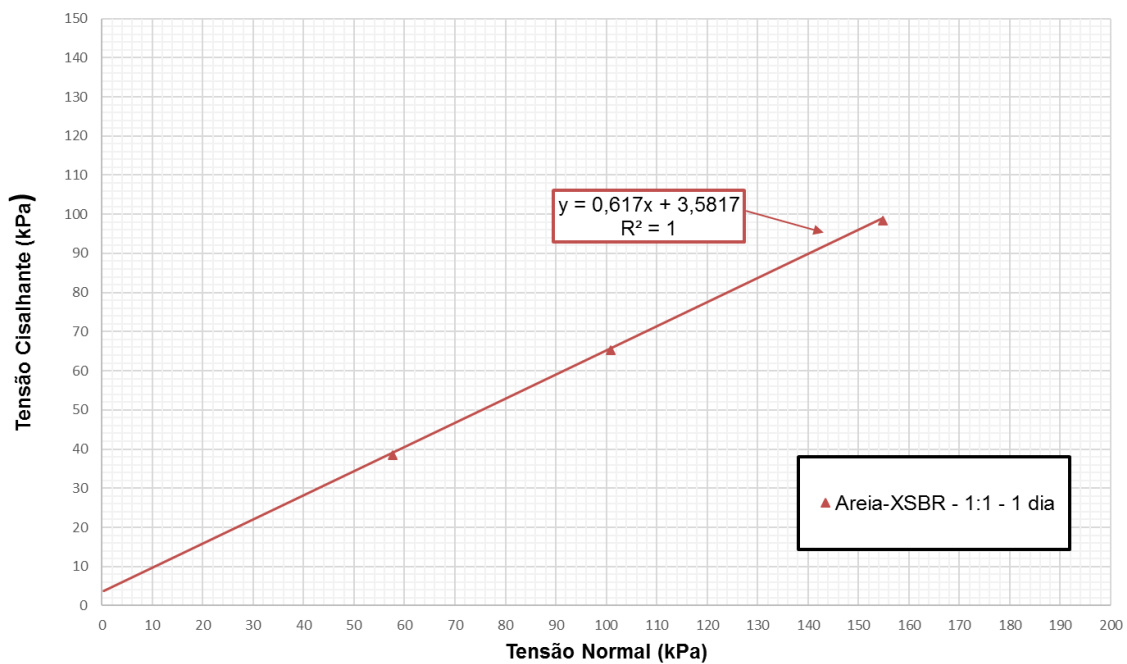


Figura 4.6 – Envoltória de Ruptura –Areia/XSBR (1:1 e 24h)

Tabela 4.4 – Parâmetros de Resistência – Areia/XSBR (1:1 e 24h)

Areia/XSBR		
Tensão Aplicada (kPa)	τ (kPa)	σ (kPa)
50	38,9	57,3
100	65,8	100,5
150	98,9	154,5
Parâmetros de Resistência		
Φ'	32	Graus
c'	4	kPa

4.5.1.3.

Resultados Utilizando o Teor 1:1 e Tempo de Cura 72h

Nas Figuras 4.7 e 4.8 e na Tabela 4.5 serão apresentados os resultados dos ensaios CD das misturas com teor 1:1 (1g de água para 1g de polímero) e com tempo de cura de 72h (3 dias).

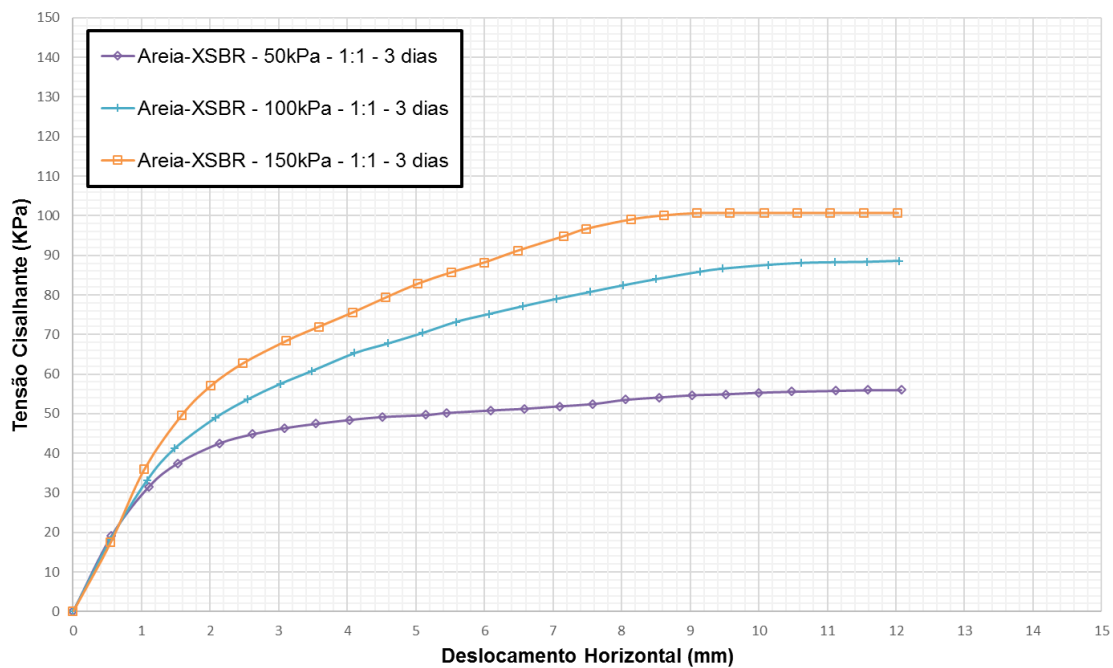


Figura 4.7 – Gráfico Tensão Cisalhante vs Deslocamento Horizontal – Areia/XSBR (1:1 e 72h)

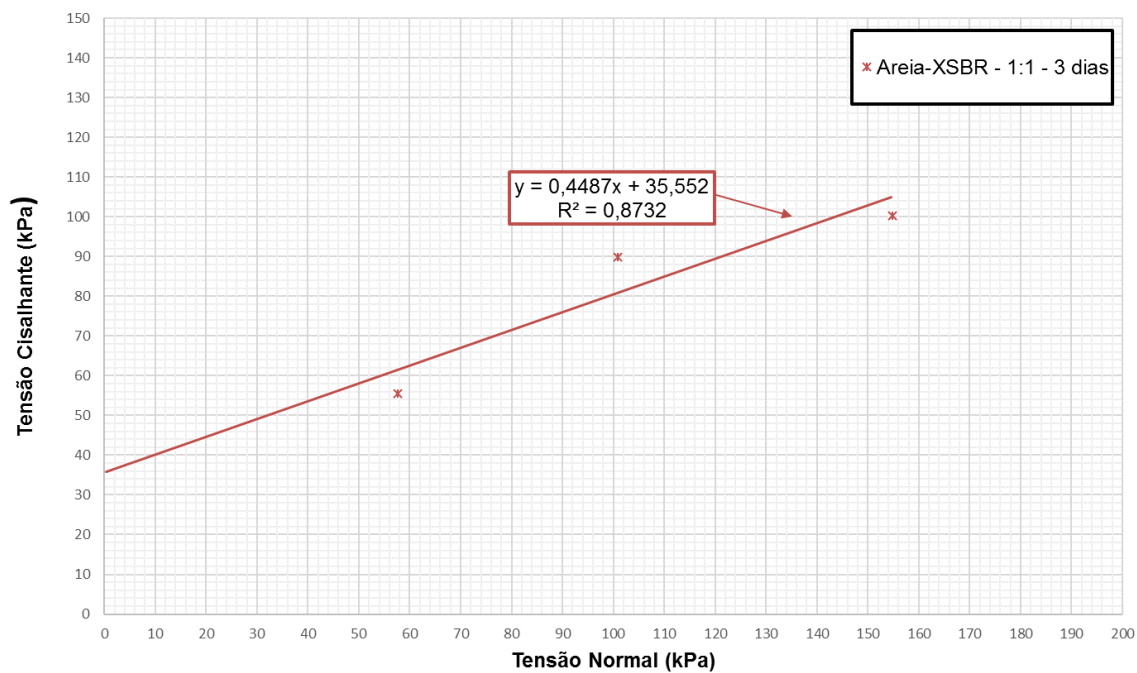


Figura 4.8 – Envoltória de Ruptura – Areia/XSBR (1:1 e 72h)

Tabela 4.5 – Parâmetros de Resistência – Areia/XSBR (1:1 e 72h)

Areia/XSBR		
Tensão Aplicada (kPa)	τ (kPa)	σ (kPa)
50	56,0	57,3
100	90,3	100,5
150	100,6	154,5
Parâmetros de Resistência		
Φ'	25	Graus
c'	36	kPa

4.5.1.4.

Resultados Utilizando o Teor 1:2 e Tempo de Cura 72h

Nas Figuras 4.9 e 4.10 e na Tabela 4.6 serão apresentados os resultados dos ensaios CD das misturas com teor 1:2 (1g de água para 2g de polímero) e com tempo de cura de 72h (3 dias).

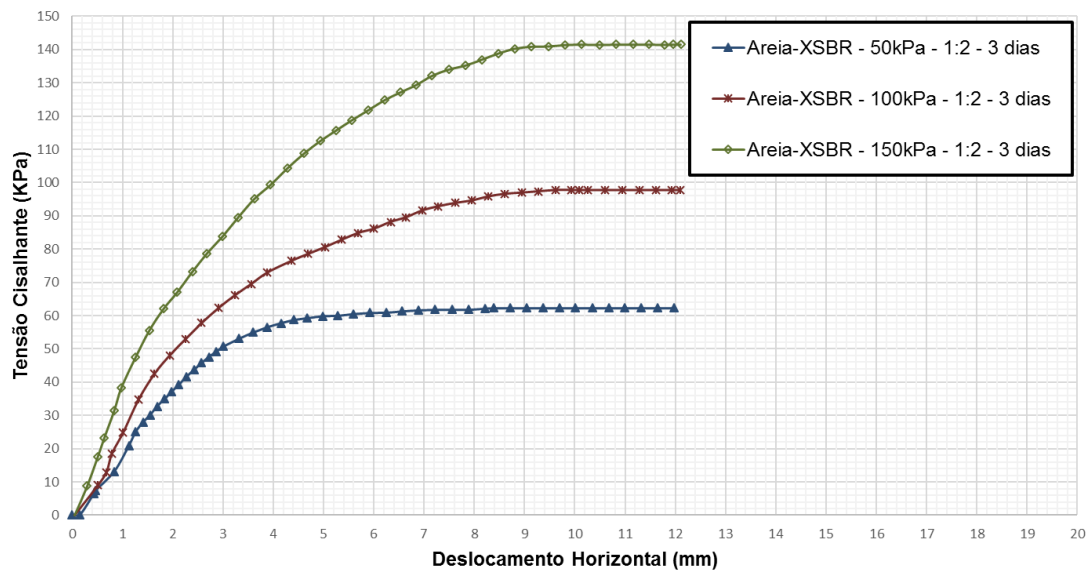


Figura 4.9 – Gráfico Tensão Cisalhante vs Deslocamento Horizontal – Areia/XSBR (1:2 e 72h)

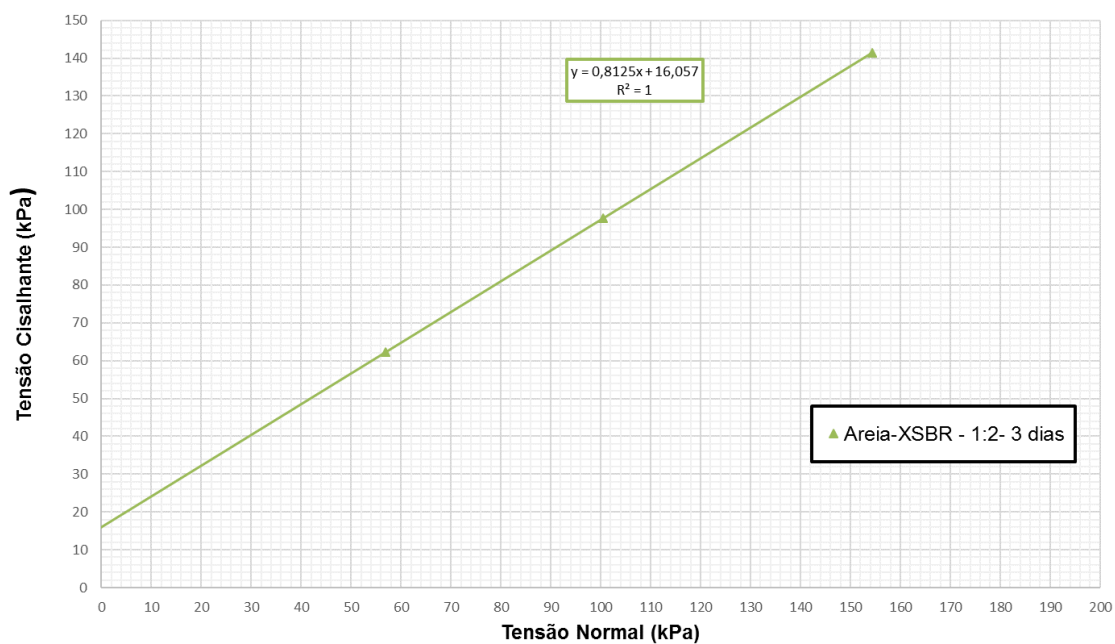


Figura 4.10 – Envoltória de Ruptura – Areia/XSBR (1:2 e 72h)

Tabela 4.6 – Parâmetros de Resistência – Areia/XSBR (1:2 e 72h)

Areia/XSBR		
Tensão Aplicada (kPa)	τ (kPa)	σ (kPa)
50	62,3	57,3
100	97,7	100,5
150	141,5	154,5
Parâmetros de Resistência		
Φ'	39	Graus
c'	16	kPa

4.5.1.5.

Resultados Utilizando o Teor 1:2 e Tempo de Cura 96h

Nas Figuras 4.11 e 4.12 e na Tabela 4.7 serão apresentados os resultados dos ensaios CD das misturas com teor 1:2 (1g de água para 2g de polímero) e com tempo de cura de 96h (4 dias).

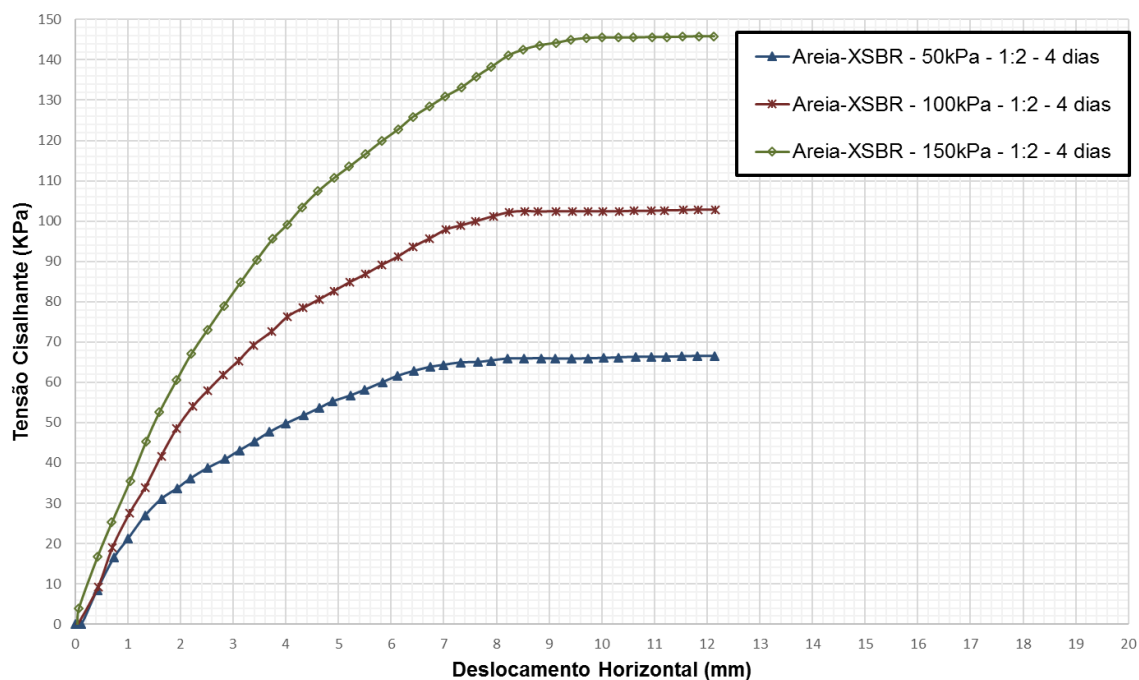


Figura 4.11 – Gráfico Tensão Cisalhante vs Deslocamento Horizontal – Areia/XSBR (1:2 e 96h)

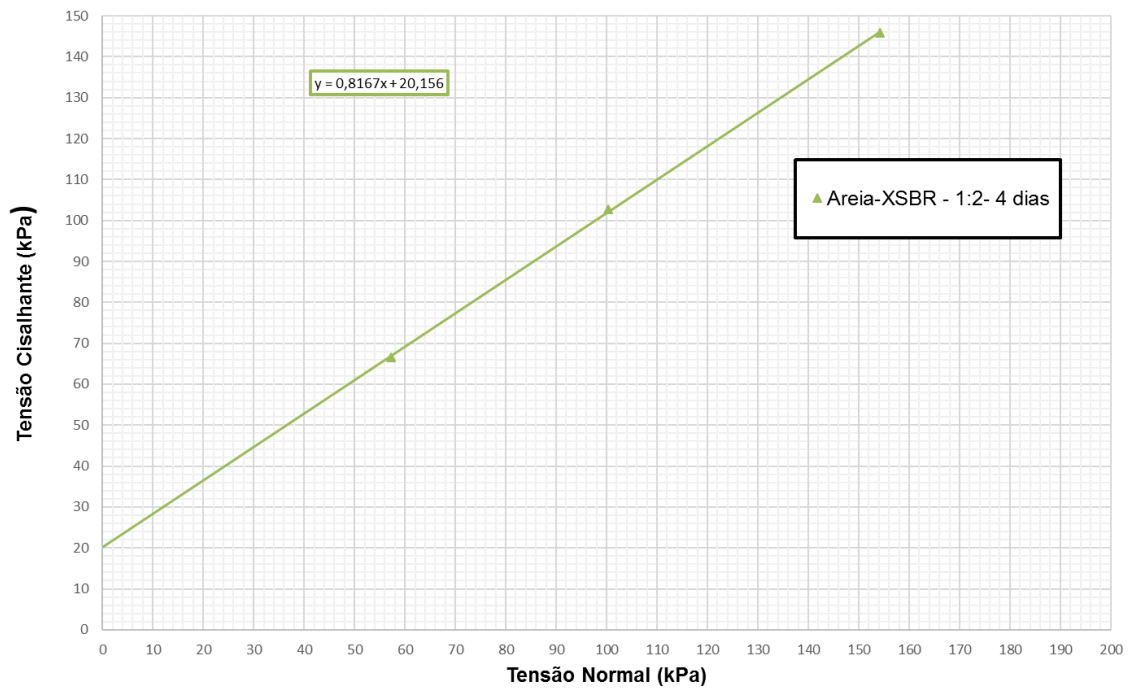


Figura 4.12 – Envoltória de Ruptura – Areia/XSBR (1:2 e 96h)

Tabela 4.7 – Parâmetros de Resistência – Areia/XSBR (1:2 e 96h)

Areia/XSBR		
Tensão Aplicada (kPa)	τ (kPa)	σ (kPa)
50	66,5	57,2
100	102,8	100,3
150	145,8	154,2
Parâmetros de Resistência		
Φ'	39	Graus
c'	20	kPa

4.5.1.6.

Resultados Utilizando o Teor 1:4 e Tempo de Cura 48h

Nas Figuras 4.13 e 4.14 e na Tabela 4.8 serão apresentados os resultados dos ensaios CD das misturas com teor 1:4 (1g de água para 4g de polímero) e com tempo de cura de 48h (2 dias).

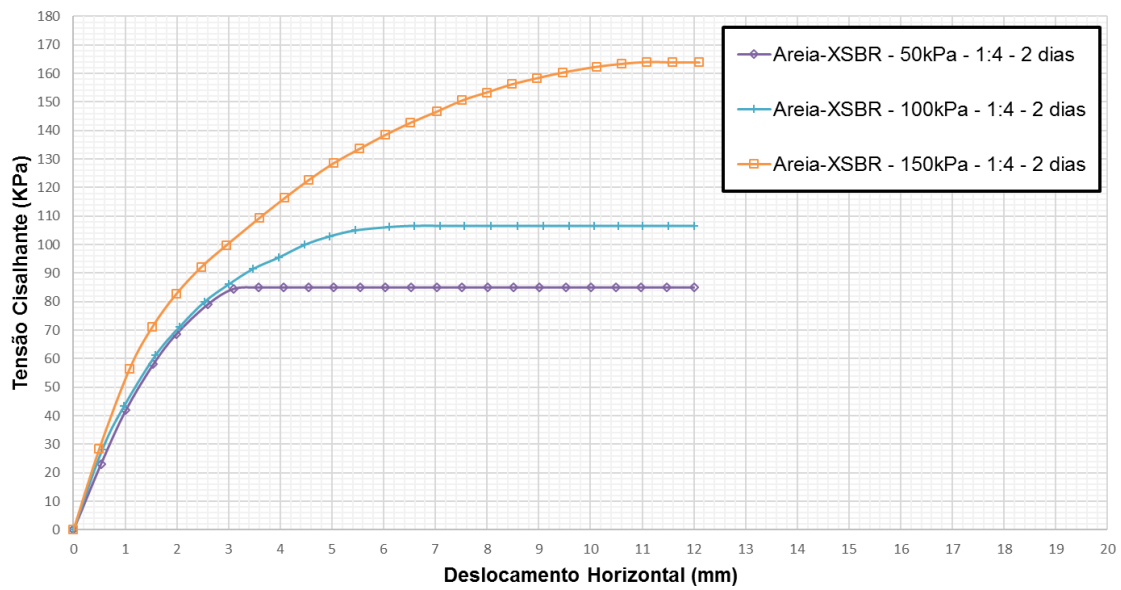


Figura 4.13 – Gráfico Tensão Cisalhante vs Deslocamento Horizontal – Areia/XSBR (1:4 e 48h)

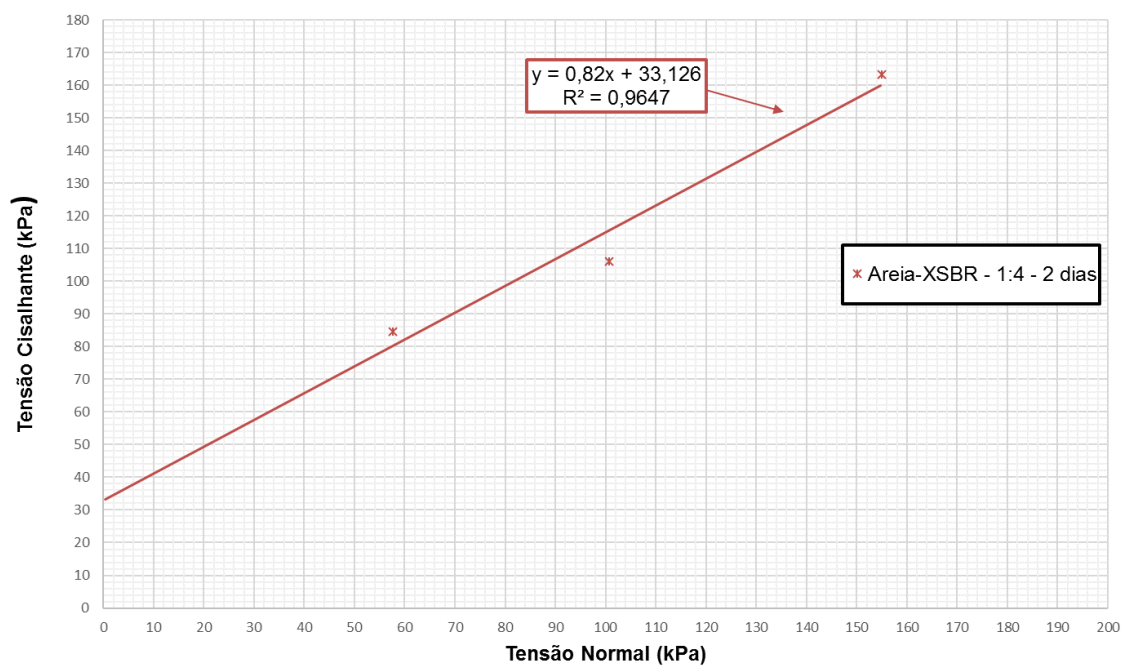


Figura 4.14 – Envoltória de Ruptura – Areia/XSBR (1:4 e 48h)

Tabela 4.8 – Parâmetros de Resistência – Areia/XSBR (1:4 e 48h)

Areia/XSBR		
Tensão Aplicada (kPa)	τ (kPa)	σ (kPa)
50	85,0	57,3
100	106,6	100,5
150	163,9	154,5
Parâmetros de Resistência		
Φ'	40	Graus
c'	33	kPa

4.5.1.7.

Resultados Utilizando o Teor 1:4 e Tempo de Cura 72h

Nas Figuras 4.15 e 4.16 e na Tabela 4.9 serão apresentados os resultados dos ensaios CD das misturas com teor 1:4 (1g de água para 4g de polímero) e com tempo de cura de 72h (3 dias).

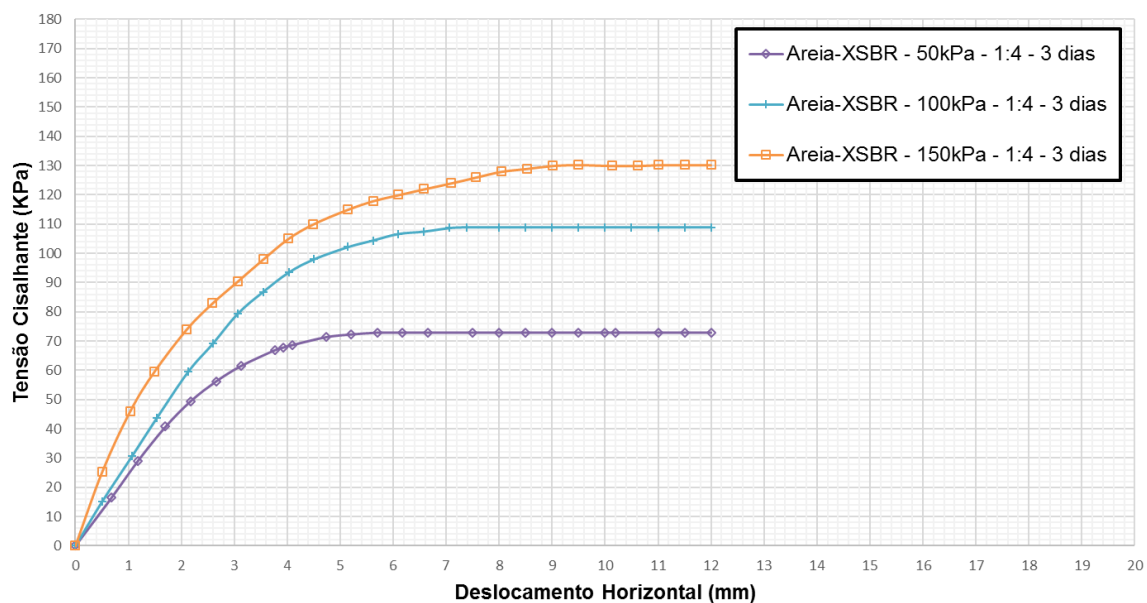


Figura 4.15 – Gráfico Tensão Cisalhante vs Deslocamento Horizontal – Areia/XSBR (1:4 e 72h)

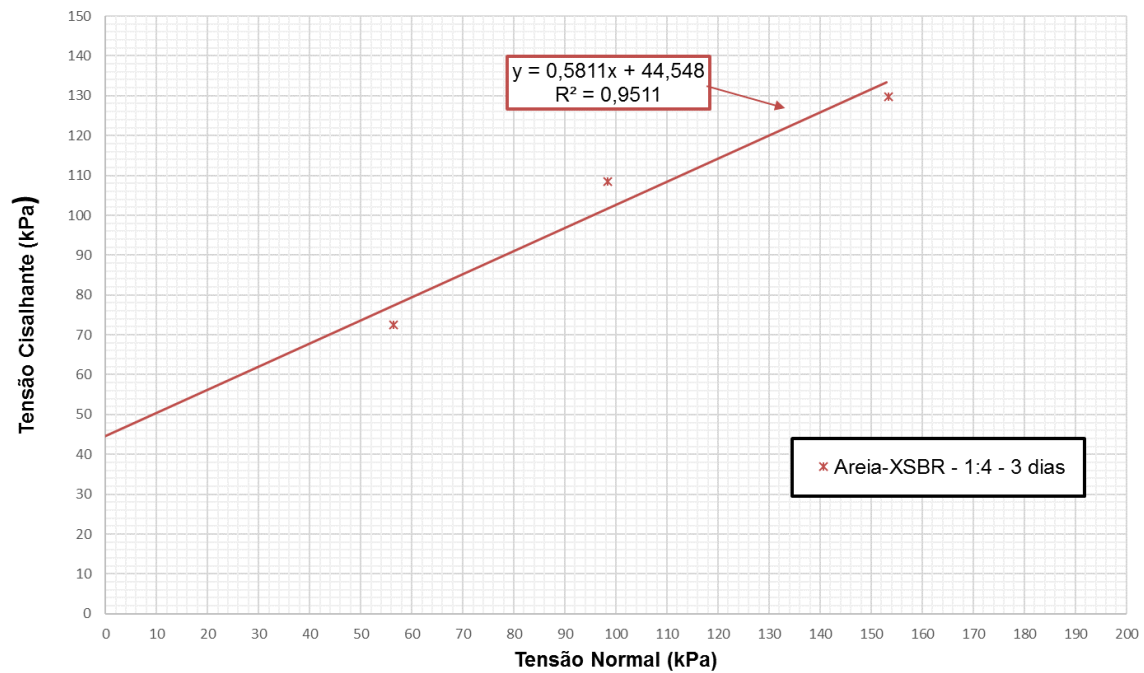


Figura 4.16 – Envoltória de Ruptura - Areia/XSBR (1:4 e 72h)

Tabela 4.9 – Parâmetros de Resistência – Areia/XSBR (1:4 e 72h)

Areia/XSBR		
Tensão Aplicada (kPa)	τ (kPa)	σ (kPa)
50	73,0	56,1
100	108,9	98,1
150	130,3	153,0
Parâmetros de Resistência		
Φ'	30	Graus
c'	45	kPa

4.5.1.8.

Resultados Utilizando o Teor 1:4 e Tempo de Cura 96h

Nas Figuras 4.17 e 4.18 e na Tabela 4.10 serão apresentados os resultados dos ensaios CD das misturas com teor 1:4 (1g de água para 4g de polímero) e com tempo de cura de 96h (4 dias).

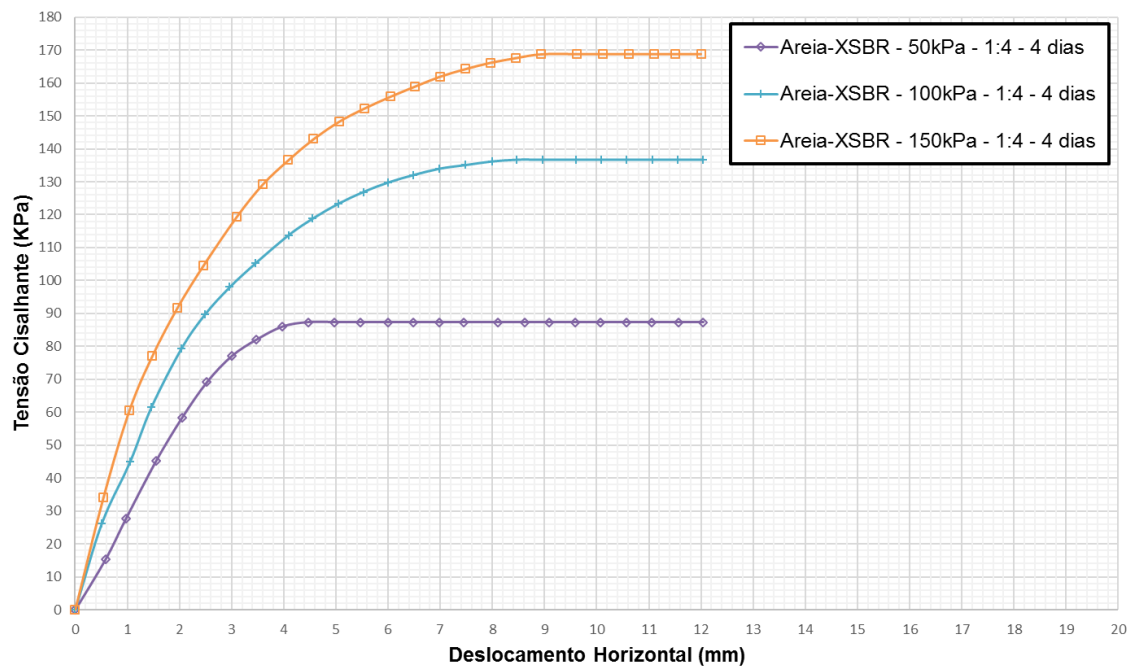


Figura 4.17 – Gráfico Tensão Cisalhante vs Deslocamento Horizontal – Areia/XSBR (1:4 e 96h)

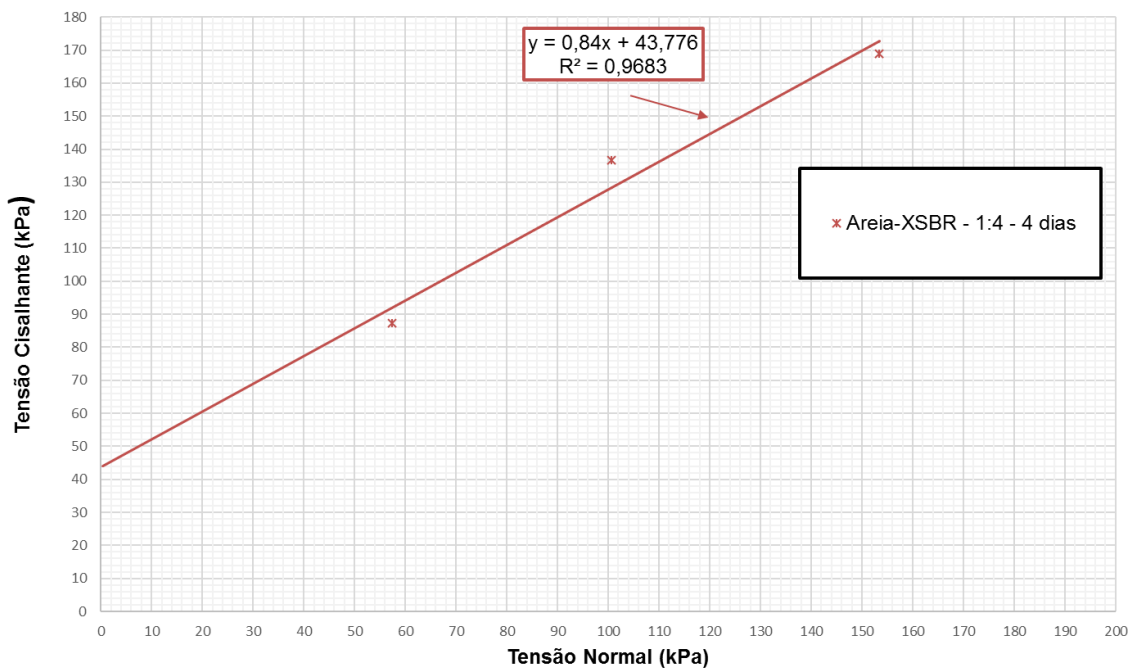


Figura 4.18 – Envoltória de Ruptura – Areia/XSBR (1:4 e 96h)

Tabela 4.10 - Parâmetros de Resistência – Areia/XSBR (1:4 e 96h)

Areia/XSBR		
Tensão Aplicada (kPa)	τ (kPa)	σ (kPa)
50	87,3	57,4
100	136,7	100,6
150	168,8	153,4
Parâmetros de Resistência		
Φ'	40	Graus
c'	44	kPa

4.5.1.9.**Resultados Utilizando o Teor 1:4 e Tempo de Cura 120h**

Nas Figuras 4.19 e 4.20 e na Tabela 4.11 serão apresentados os resultados dos ensaios CD das misturas com teor 1:4 (1g de água para 4g de polímero) e com tempo de cura de 120h (5 dias).

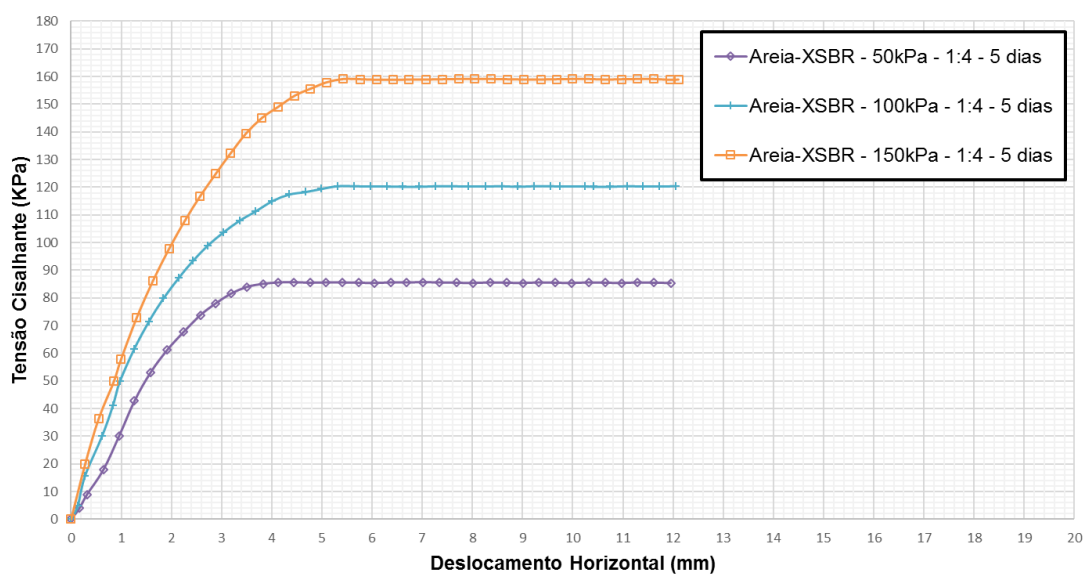


Figura 4.19 – Gráfico Tensão Cisalhante vs Deslocamento Horizontal – Areia/XSBR (1:4 e 120h)

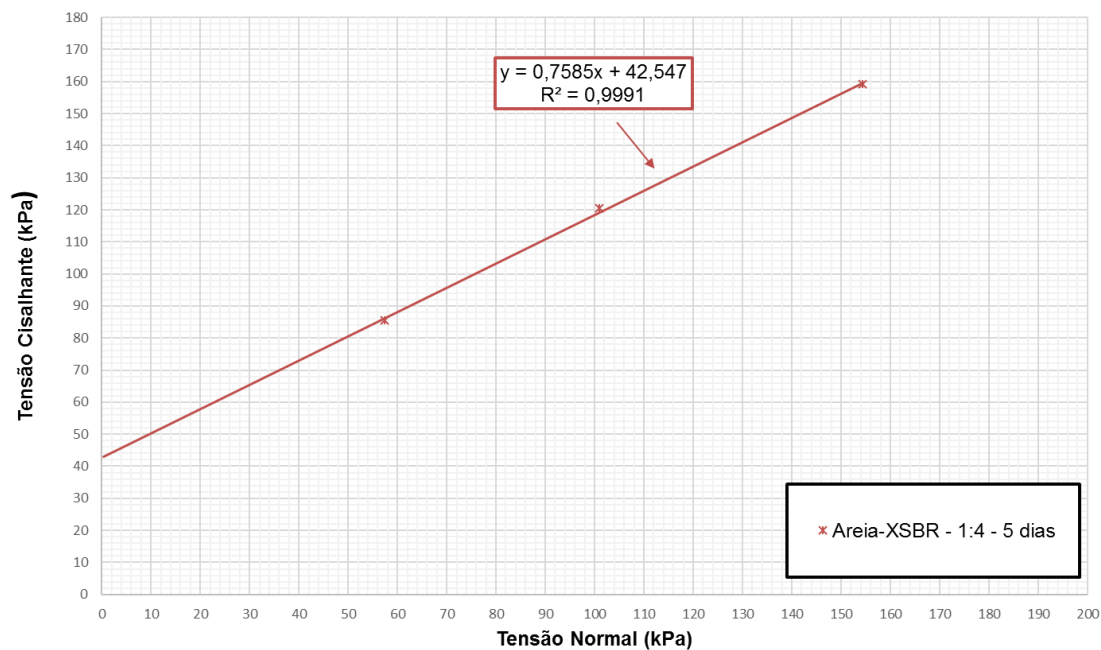


Figura 4.20 – Envoltória de Ruptura – Areia/XSBR (1:4 e 120h)

Tabela 4.11 – Parâmetros de Resistência – Areia/XSBR (1:4 e 120h)

Areia/XSBR		
Tensão Aplicada (kPa)	τ (kPa)	σ (kPa)
50	85,4	57,4
100	120,4	101,0
150	159,1	154,4
Parâmetros de Resistência		
Φ'	37	Graus
c'	43	kPa

4.5.1.10. Resultados Utilizando o Teor 1:4 e Tempo de Cura 576h

Nas Figuras 4.21 e 4.22 e na Tabela 4.12 serão apresentados os resultados dos ensaios CD das misturas com teor 1:4 (1g de água para 4g de polímero) e com tempo de cura de 576h (24 dias).

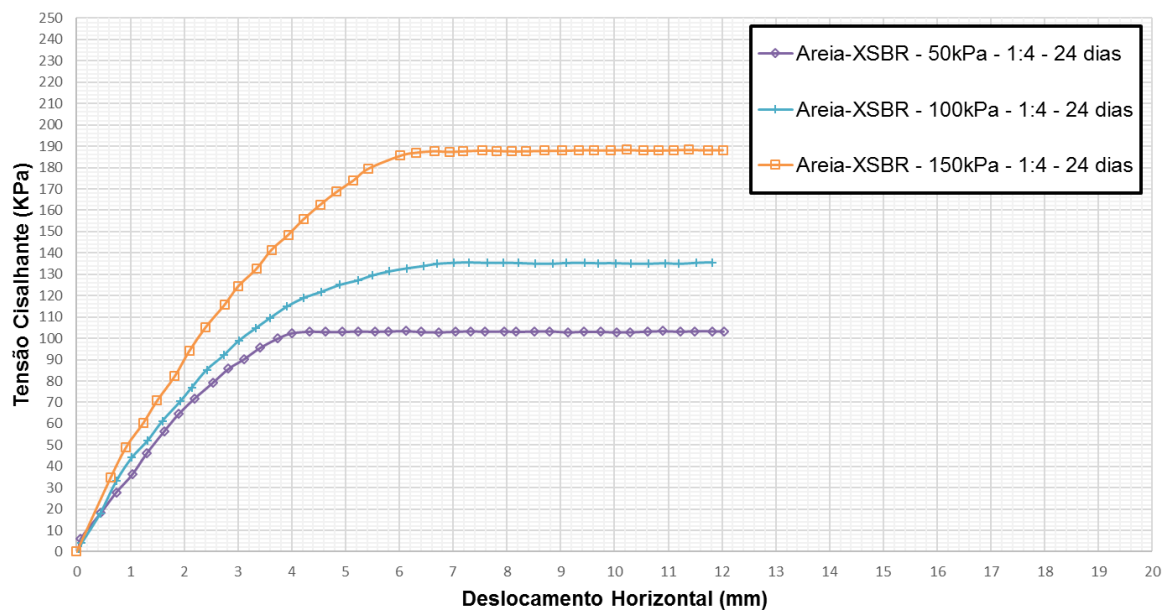


Figura 4.21 – Gráfico Tensão Cisalhante vs Deslocamento Horizontal – Areia/XSBR (1:4 e 576h)

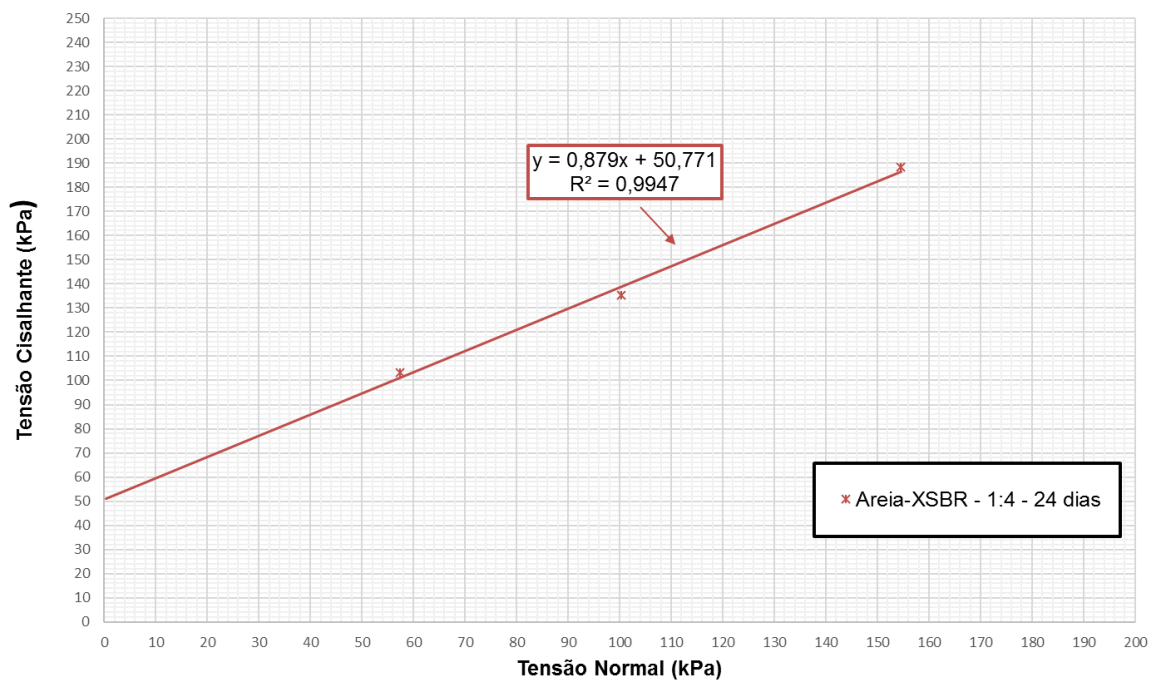


Figura 4.22 - Envoltória de Ruptura – Areia/XSBR (1:4 e 576h)

Tabela 4.12 – Parâmetros de Resistência – Areia/XSBR (1:4 e 576h)

Areia/XSBR		
Tensão Aplicada (kPa)	τ (kPa)	σ (kPa)
50	103,2	57,4
100	135,3	100,3
150	188,2	154,5
Parâmetros de Resistência		
Φ'	41	Graus
c'	51	kPa

4.5.1.11.

Resultados Utilizando o Teor 1:4 e Tempo de Cura 720h

Nas Figuras 4.23 e 4.24 e na Tabela 4.13 serão apresentados os resultados dos ensaios CD das misturas com teor 1:4 (1g de água para 4g de polímero) e com tempo de cura de 720h (30 dias).

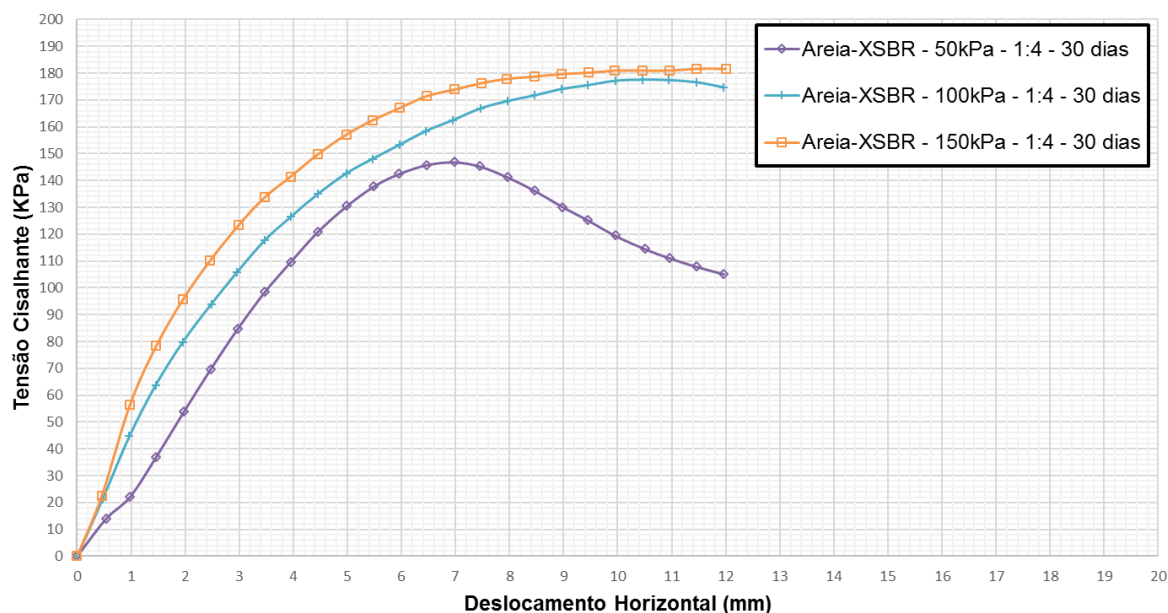


Figura 4.23 – Gráfico Tensão Cisalhante vs Deslocamento Horizontal – Areia/XSBR (1:4 e 720h)

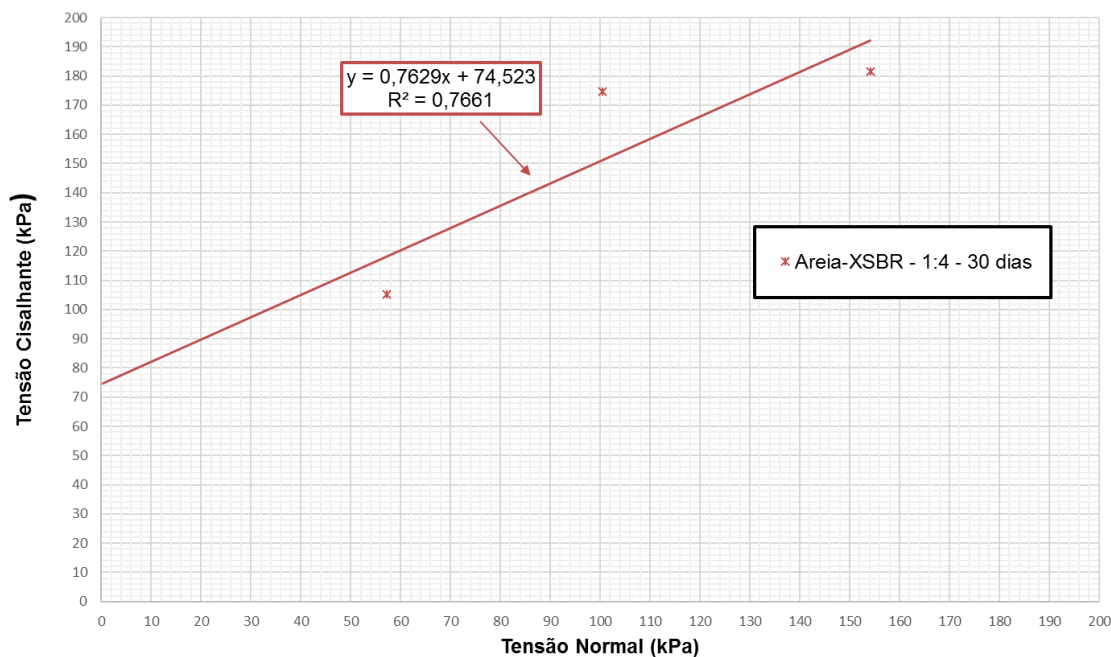


Figura 4.24 – Envoltória de Ruptura – Areia/XSBR (1:4 e 720h)

Tabela 4.13 – Parâmetros de Resistência – Areia/XSBR (1:4 e 720h)

Areia/XSBR		
Tensão Aplicada (kPa)	τ (kPa)	σ (kPa)
50	105,2	57,3
100	174,7	100,5
150	181,7	154,2
Parâmetros de Resistência		
Φ'	37	Graus
c'	75	kPa

4.5.1.12.

Resultados Utilizando o Teor 1:4 e Tempo de Cura 792h

Nas Figuras 4.25 e 4.26 e na Tabela 4.14 serão apresentados os resultados dos ensaios CD das misturas com teor 1:4 (1g de água para 4g de polímero) e com tempo de cura de 792h (33 dias).

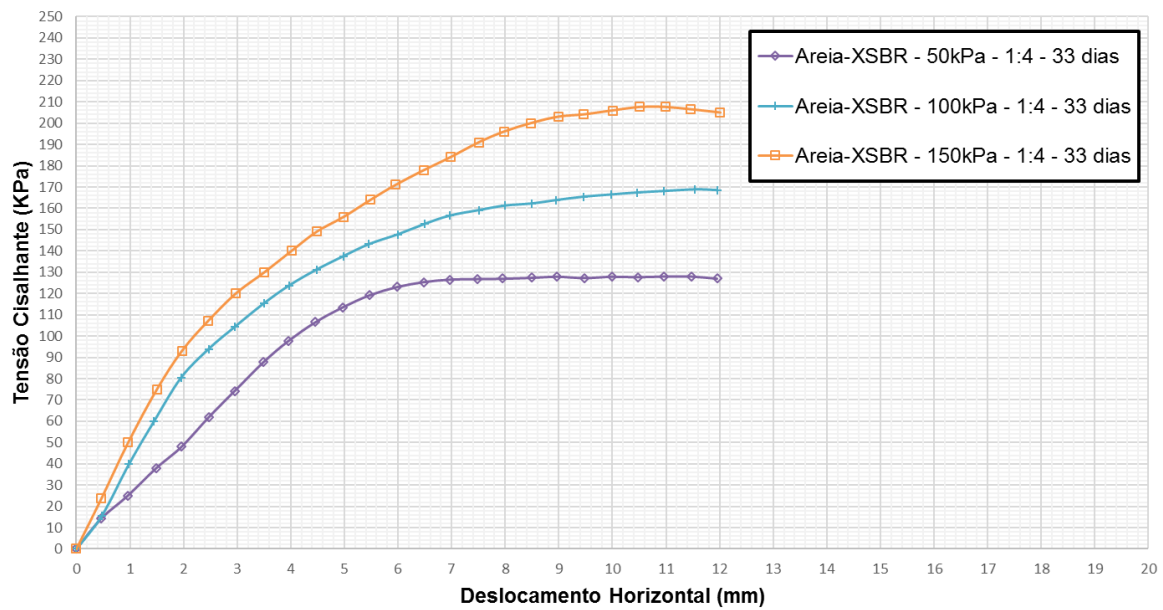


Figura 4.25 – Gráfico Tensão Cisalhante vs Deslocamento Horizontal – Areia/XSBR (1:4 e 792h)

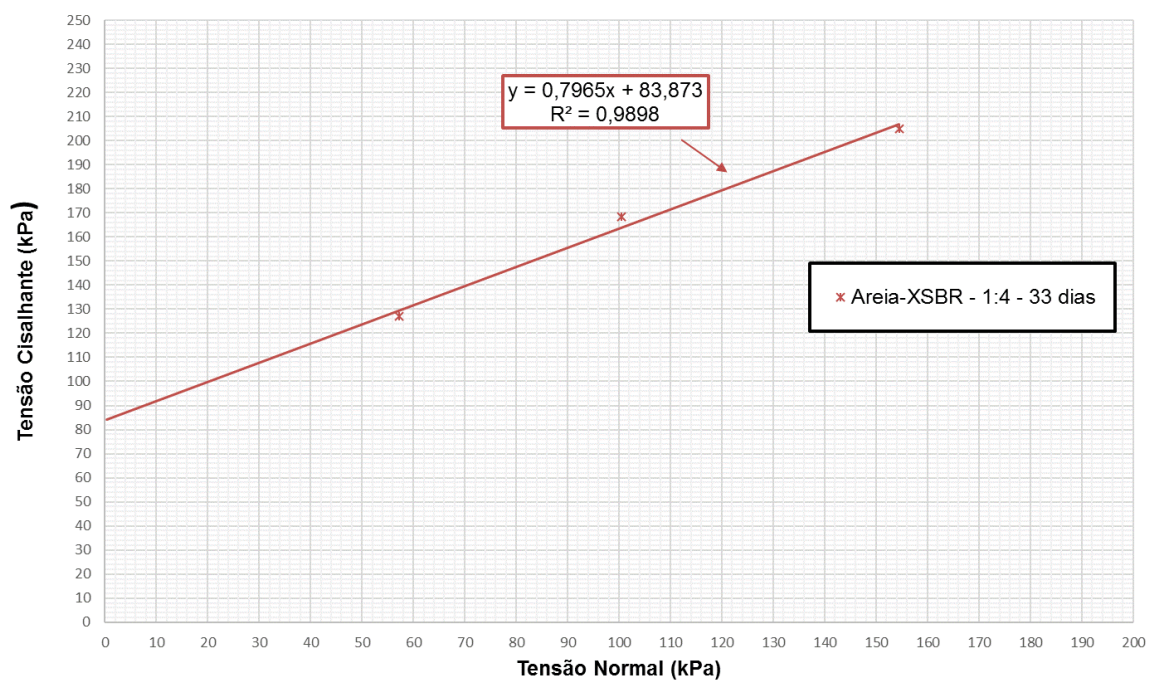


Figura 4.26 – Envoltória de Ruptura – Areia/XSBR (1:4 e 792h)

Tabela 4.14 – Parâmetros de Resistência – Areia/XSBR (1:4 e 792h)

Areia/XSBR		
Tensão Aplicada (kPa)	τ (kPa)	σ (kPa)
50	127,0	57,3
100	168,4	100,5
150	204,9	154,5
Parâmetros de Resistência		
Φ'	38	Graus
c'	84	kPa

4.5.1.13.

Comparação dos Resultados

A efeito de comparação, foi elaborado um gráfico que engloba os comportamentos das misturas que apresentaram os melhores parâmetros de resistência (Misturas Areia/Polímero no teor 1:4 e para os tempos de cura de 30 e 34 dias) e o comportamento da amostra de areia pura, usada como mistura base. O gráfico é apresentado a seguir.

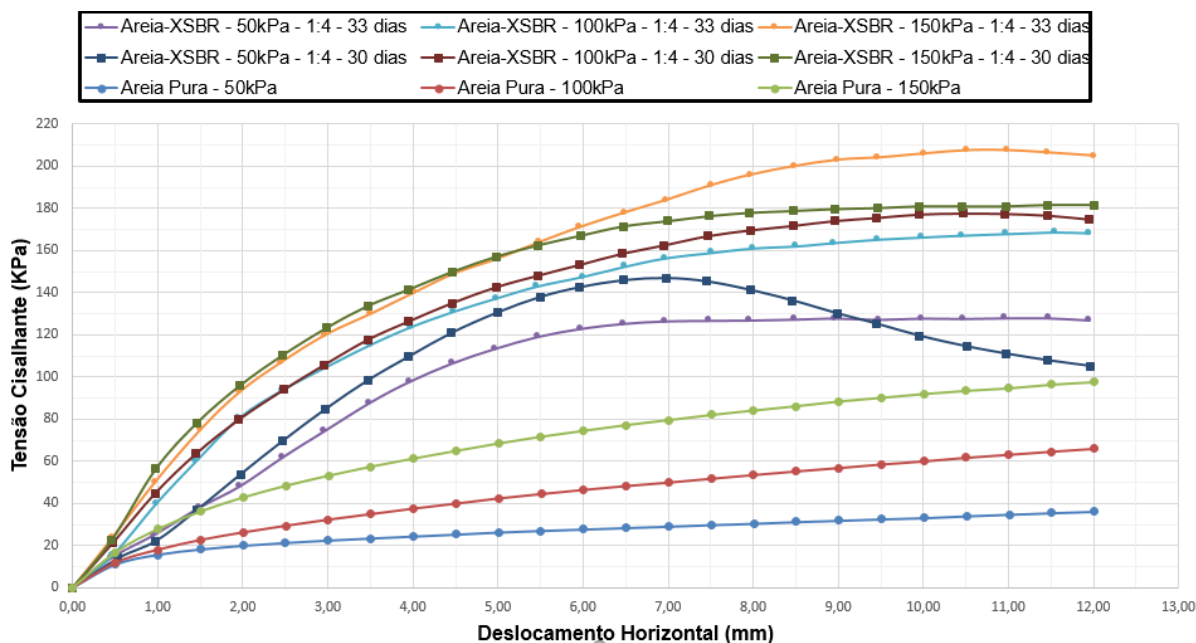


Figura 4.27 – Gráfico Tensão Cisalhante vs Deslocamento Horizontal – Areia Pura x Areia/XSBR (1:4 – 720 e 792h)

4.5.1.14. Resumo dos Resultados

Visto que nos itens anteriores foram apresentados os parâmetros de resistência para cada mistura estudada, onde variou-se o teor água/polímero e/ou o tempo de cura, foi elaborada uma tabela resumo, que apresenta todos os parâmetros de resistência obtidos das misturas estudadas (Tabela 4.15). Diante disso, podemos comparar de forma mais direta os parâmetros obtidos em cada mistura e verificar em qual combinação tivemos os melhores resultados.

Tabela 4.15 – Tabela Resumo – Parâmetros de Resistência

Misturas			Parâmetros de Resistência	
Solo + Polímero	Teor	Tempo de Cura (dias)	Φ' (Graus)	c' (kPa)
Areia Pura			33	0
Areia-XSBR	1:1	1	33	0
Areia-XSBR	1:1	3	25	36
Areia-XSBR	1:2	3	39	16
Areia-XSBR	1:2	4	39	20
Areia-XSBR	1:4	3	30	47
Areia-XSBR	1:4	4	40	44
Areia-XSBR	1:4	5	37	43
Areia-XSBR	1:4	24	41	51
Areia-XSBR	1:4	30	37	75
Areia-XSBR	1:4	33	38	84

4.6. Permeabilidade

A permeabilidade da areia pura foi obtida por meio do ensaio triaxial convencional. Os resultados do ensaio são apresentados na tabela a seguir.

Tabela 4.16 – Ensaio de Permeabilidade da Areia Pura

Q (cm ³ /s)	V (cm/s)	i (cm/cm)	k (cm/s)
0,0134	0,0011	2,7333	3,90E-04
0,0141	0,0011	1,1858	9,43E-04
0,0563	0,0045	1,1858	3,78E-03
0,0131	0,0010	1,1858	8,78E-04
k_{med} =			1,50E-03

Portanto, para a amostra de areia pura, verificou-se um valor de permeabilidade comum a areias finas.

O ensaio de permeabilidade para a amostra solo/polímero foi realizado para a mistura que apresentou os melhores parâmetros de resistência nos ensaios de cisalhamento direto (Tabela 4.17). A amostra com o teor água/polímero 1:4 e com o tempo de cura de 33 dias foi moldada na forma cilíndrica, similar ao corpo de prova usado em ensaios triaxiais, de dimensões 3,8x7,8cm (diâmetro x altura).

Tabela 4.17 – Ensaio de Permeabilidade da Mistura Solo/Polímero

Δt (s)	Vol. Colet. (mL)	Q (cm ³ /s)	k (cm/s)
4,0	0,2	0,04	1,17E-03
4,0	0,5	0,13	1,16E-03
2,0	0,8	0,42	1,15E-03
2,0	1,0	0,50	1,17E-03
k_{med.} =			1,16E-03

Como observado no ensaio para a areia pura, a permeabilidade da mistura solo/polímero apresenta um valor característico de areias finas, não apresentando diferenças significativas dos valores obtidos para a amostra de areia pura.

4.6.1. Análise Química dos Materiais

A análise química foi realizada em uma amostra de areia pura com umidade de 10%, e em uma amostra de areia com o copolímero de butadieno e estireno, possibilitando a comparação dos comportamentos químicos antes e depois da mistura do solo com o polímero.

4.6.1.1. Espectrometria de Fluorescência de Raios X (FRX)

A tabela a seguir apresenta as porcentagens dos compostos químicos presentes em cada amostra.

Tabela 4.18 – Espectrometria de Fluorescência de Raios X (FRX)

Amostra	Compostos Químicos (%)							
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	K ₂ O	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	S	ZrO ₂	Outros: Zn,Cr,Cu, Sr
Areia Pura	74,6	10,8	9,0	1,9	1,8	1,3	0,17	0,25
Areia/Polímero	70,2	13,9	10,9	1,6	1,3	1,6	0,16	0,25

Conforme esperado, na amostra de areia pura, verificou-se uma porcentagem elevada de Dióxido de Silício (Quartzo), valores característicos de areias. Na análise da amostra de areia com o copolímero, quando comparada com a amostra de areia pura, não foram observadas diferenças significativas nas porcentagens de Óxido de Ferro, Dióxido de Titânio, Dióxido de Zircônio e de Enxofre. Por outro lado, as proporções de Dióxido de Silício, Óxido de Alumínio e Óxido de Potássio sofreram mudanças consideráveis, sugerindo a atuação do polímero nesses elementos/compostos. Outros compostos presentes em baixos teores seriam provenientes de impurezas da amostra de solo ou do polímero utilizado.

4.6.1.2. Espectroscopia no Infravermelho (IV)

Na análise de espectroscopia no infravermelho, as amostras foram comparadas quanto a comportamento característico de cada mistura no gráfico número de onda x transmitância. As curvas obtidas em cada análise são apresentadas no gráfico abaixo.

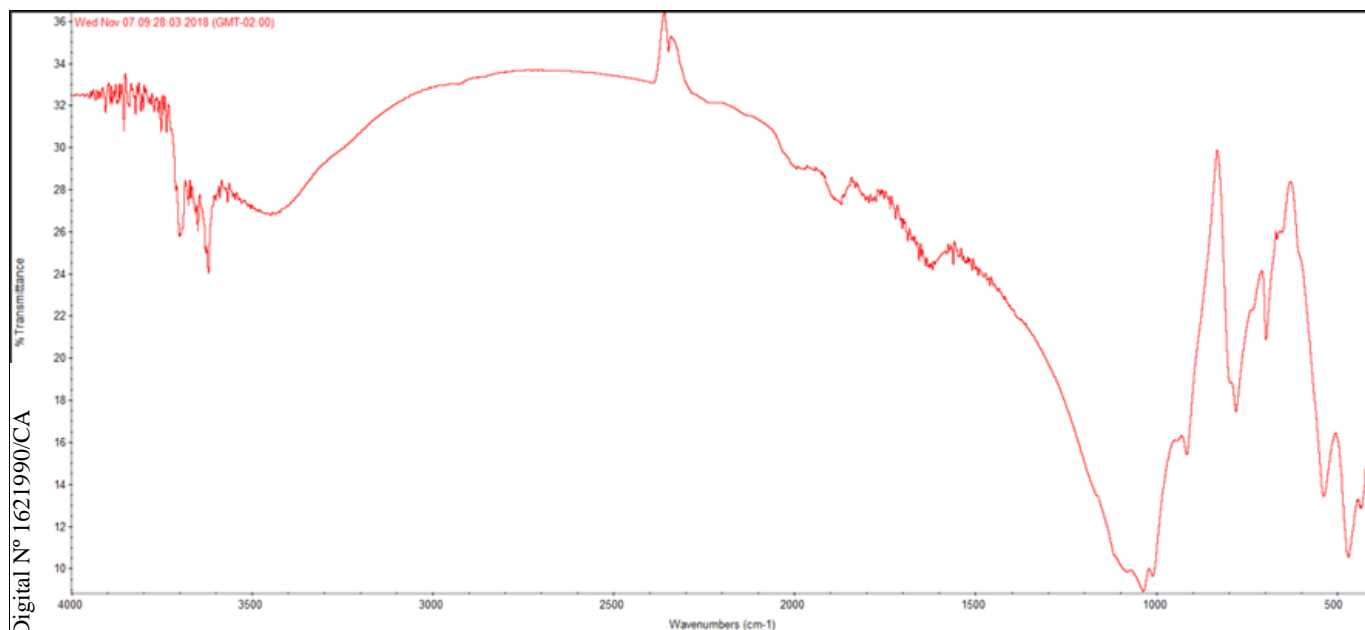


Figura 4.28 – Espectroscopia no Infravermelho – Areia Pura

Analizando a espectroscopia da amostra de areia pura, notou-se a presença de hidróxidos (O-H) na faixa 3600 a 3800 cm⁻¹, moléculas de H₂O na faixa de 3300 a 3500 e presença de dióxido de silício e silicatos (1050 e 800cm⁻¹, respectivamente). A presença de água nessa amostra já era esperada, visto que a amostra de areia pura foi analisada sob as condições de temperatura e umidade do ambiente (20°C e 70%), a amostra não foi colocada em estufa para a secagem antes de ser utilizada no estudo.

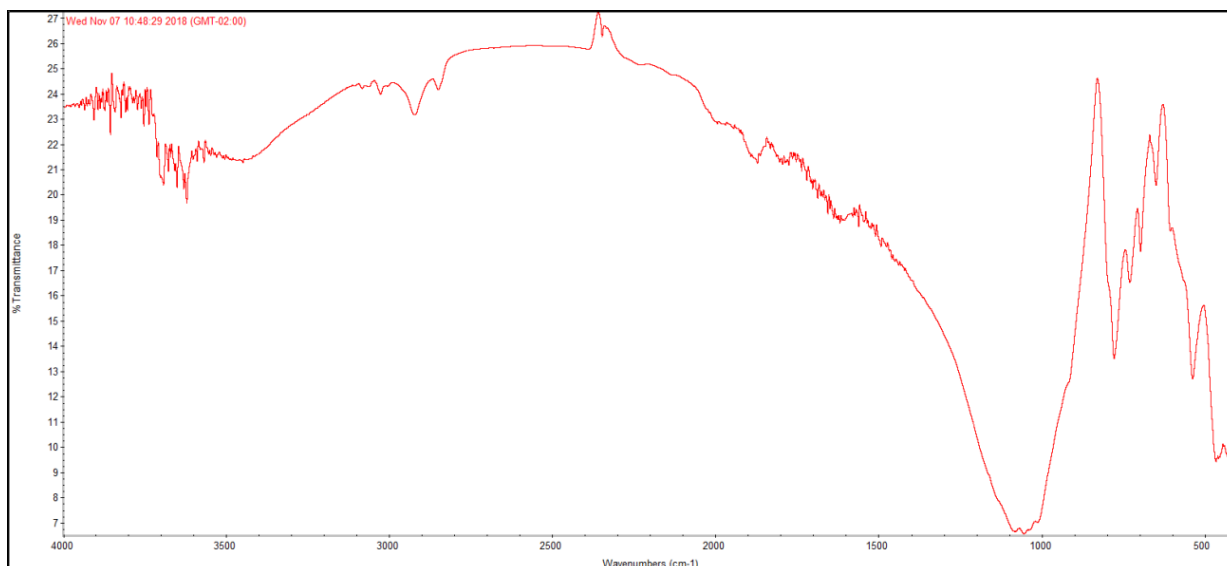


Figura 4.29 – Espectroscopia no Infravermelho – Areia/Polímero

Ao analisar a curva proveniente da espectroscopia da amostra de solo + polímero, a presença do polímero fica evidente por uma mudança de comportamento na faixa 2950 a 2700 cm^{-1} (na amostra de areia pura, a curva seguia um padrão nessa faixa), além da formação de alcanos (C-H), alcenos (C=C) e aromáticos na faixa 3100 a 2950 cm^{-1} . Pela característica do material arenoso, assim como na amostra anterior, temos a presença de silicatos e dióxido de silício na faixa 800 e 1050 cm^{-1} , respectivamente.

Entretanto, analisando o comportamento da curva na faixa de 800 a 600 cm^{-1} , percebe-se uma alteração na tendência apresentada pela amostra da areia pura. A mudança poderia ser explicada tanto por imperfeições nos ensaios como por uma eventual atuação do polímero na faixa em questão, alterando os compostos característicos da faixa. A influência do polímero no comportamento da curva não pode ser confirmada por esses ensaios, demandando um estudo mais aprofundado sobre a questão.

4.7. Análise Microscópica

Os métodos e procedimentos adotados no preparo das amostras para a análise de MEV foram os mesmos usados no preparo das amostras para os ensaios mecânicos, bem como as condições de ambiente (temperatura e umidade).

A amostra padrão utilizada na análise é cilíndrica, com 20mm de altura e 5mm de diâmetro, conforme apresentado na figura a seguir.



Figura 4.30 – Amostra para a Análise do MEV

As análises foram realizadas em amostras obtidas a partir de misturas com teor 1:4 (Água/Polímero) e para dois tempos de cura distintos, 24 e 30 dias. As Figuras 4.30, 4.31 e 4.32 mostram a estrutura da mistura solo/água/polímero para 24 dias de cura ao ar livre.

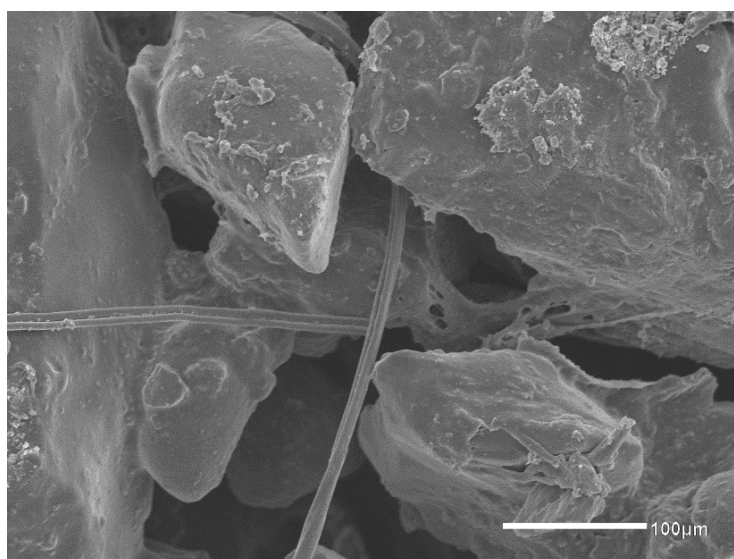


Figura 4.31 – Análise MEV – Solo/Água/Polímero – 24d

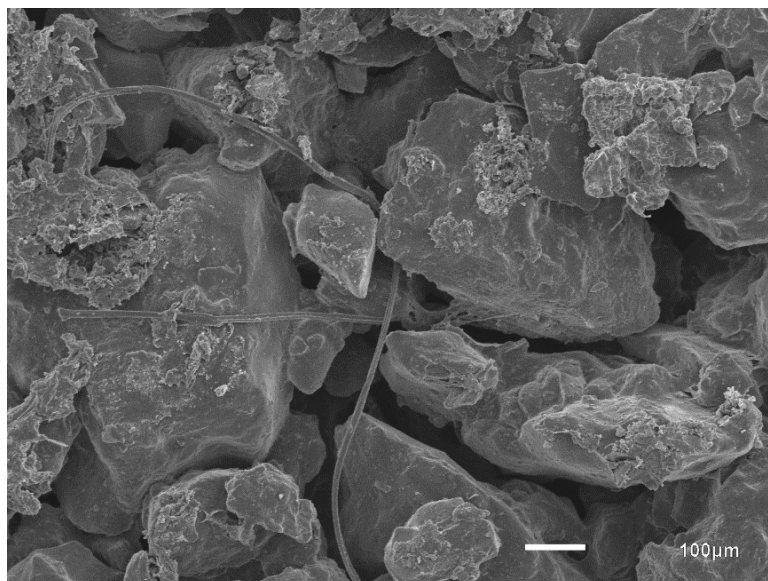


Figura 4.32 – Análise MEV – Solo/Água/Polímero – 24d

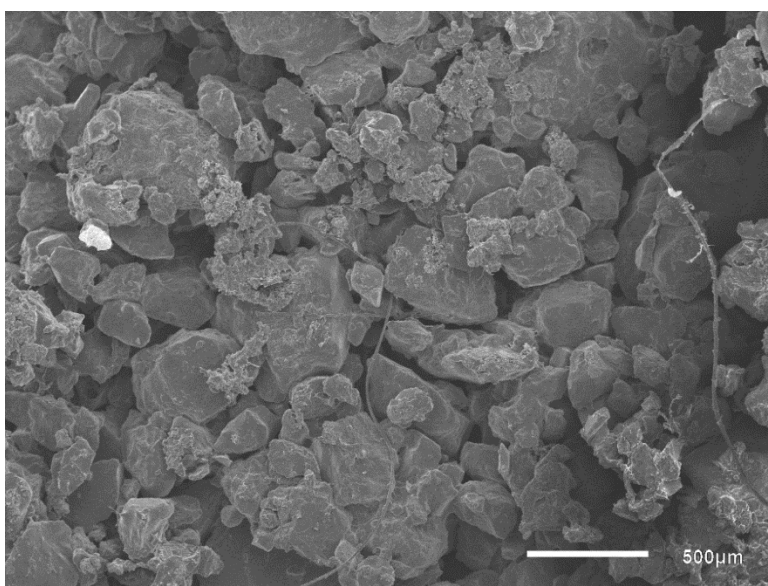


Figura 4.33 – Análise MEV – Solo/Água/Polímero – 24d

Enquanto que as Figuras 4.33 e 4.34 mostram a estrutura da mistura solo/água/polímero, na proporção 1:4 (água/polímero) para 30 dias de cura ao ar livre.

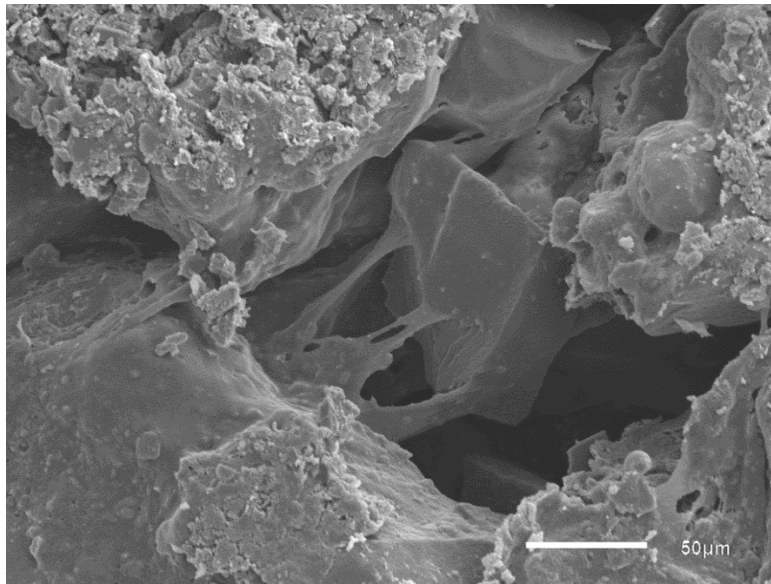


Figura 4.34 - Análise MEV – Solo/Água/Polímero – 30d

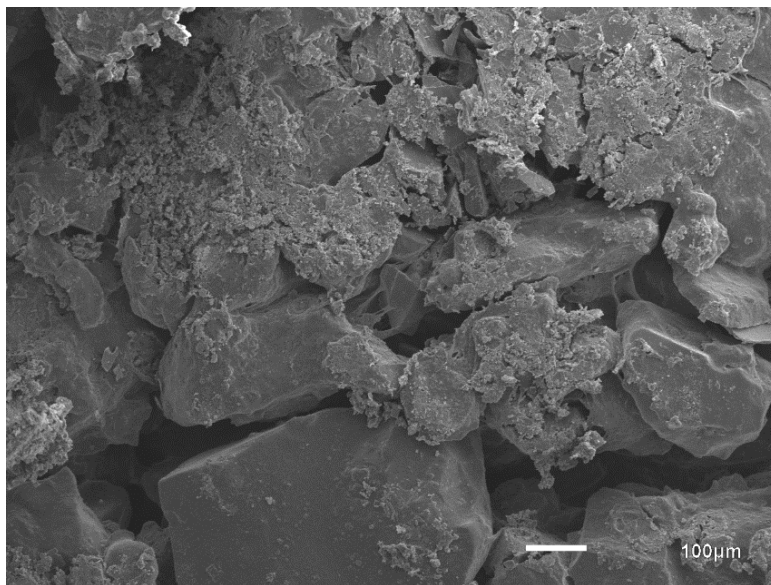


Figura 4.35 – Análise MEV – Solo/Água/Polímero – 30d

Analisando as figuras obtidas, observa-se uma estrutura elástica entre os grãos de areia não típica em solos arenosos não coesivos. E que para o tempo de cura de 30 dias, verificou-se uma estrutura mais coesa, sugerindo série de ligações elásticas mais presentes na mistura do que na amostra de 24 dias.

4.8.

Comparação Polímero XSBR x Polímero GRT

Conforme apresentado no item 2.3.1, o solo misturado ao polímero GRT apresentou um aumento significativo de resistência quando comparado a mistura solo/cimento. A mistura solo/polímero GRT apresentou um ganho de aproximadamente 15% de resistência quando comparada aos resultados apresentados pelas amostras de solo/cimento.

Além do fator resistência, quando estudada em uma análise microscópica, a mistura mostrou um comportamento diferenciado, apresentando uma série de ligações, resultando na formação de uma cadeia de ligações.

O copolímero de butadieno e estireno ao ser misturado ao solo arenoso resultou em mudanças significativas no comportamento desse tipo de solo. De um solo não coesivo, a areia/polímero apresentou resultados característicos de solos coesivos. O que mostra a capacidade do polímero de formar uma série de ligações em cadeia (conforme a figura 4.31) ao ser misturado a areia, o que resulta na criação de um comportamento coesivo.

Enquanto que nos estudos realizados pela GRT, a amostra de solo/polímero era composta por apenas 2% de polímero, no presente estudo, a porcentagem de composto químico nas amostras de solo/polímero de butadieno e estireno variaram de 5% a 8%. Os melhores resultados foram verificados para as amostras com 8% de polímero (Teor 1:4 – Água/Polímero), onde o solo apresentou um aumento substancial dos parâmetros de resistência de Mohr-Coulomb:

- Areia Pura: $c' - 0$ kPa; $\Phi' - 33^\circ$
- Solo/XSBR: $c' - 84$ kPa; $\Phi' - 38^\circ$

Portanto, verifica-se que nesses dois casos, a aplicação de polímeros em misturas com solo resultou em melhorias significativas do comportamento mecânico do solo, possibilitando a utilização desse mesmo solo em condições mais adversas.

5 Conclusão

5.1. Conclusões Gerais

O foco desse estudo era testar a utilização do Copolímero de Butadieno e Estireno na forma de solução aquosa, para o melhoramento de um solo arenoso. E partir disso, mensurar a mudança de comportamento mecânico do solo quando misturado ao polímero.

São apresentados abaixo as principais conclusões acerca desse estudo:

- Os resultados obtidos nos ensaios de cisalhamento direto mostram que o solo arenoso, um solo não coesivo, ao ser misturado com o copolímero de butadieno e estireno (composto químico), para uma umidade de 10% e densidade relativa de 50% apresentou incrementos de coesão. Ou seja, o solo passou a ter um comportamento de solo coesivo;
- Para quaisquer misturas estudadas, os valores de ângulo de atrito não variaram mais do que 8° com relação ao valor inicial da areia pura estudada (33°);
- Verificou-se que o teor água/polímero influi no comportamento mecânico das misturas. E que as misturas com o teor 1:4 (água/polímero) apresentaram aumentos significativos de coesão. O maior valor de coesão da mistura foi constatado em uma amostra de teor 1:4 (Água/Polímero);
- Constatou-se que o tempo de cura influencia diretamente nos parâmetros de resistência da mistura. Para tempos de cura curtos, as misturas não apresentaram mudanças significativas de comportamento. Enquanto que para tempos de cura longos (30 e 33 dias), as misturas apresentaram os melhores comportamentos.

- A permeabilidade da areia pura não apresentou variações significativas quando comparada a permeabilidade da mistura solo/polímero. Tanto na condição pura, como na condição de mistura com polímero, o solo apresenta permeabilidade característica de areias finas.
- A partir dos ensaios realizados no presente estudo, não podemos afirmar se o ganho de resistência das misturas foi proveniente, apenas, da adição do polímero. Visto que, no processo de secagem, o solo tende a apresentar um ganho de resistência devido a sucção.

5.2.

Sugestões para Futuros Trabalhos

No desenvolvimento de uma tese de mestrado ou qualquer outro trabalho de pesquisa, o objetivo principal é aprofundar os conhecimentos sobre um assunto específico. Durante o desenvolvimento da pesquisa, revelam-se novas alternativas que até então não haviam surgido. Todavia, por conta do período definido no cronograma inicial, diversas possibilidades e variações são ignoradas.

Para a ampliação do conhecimento e o desenvolvimento dos estudos sobre a aplicabilidade de soluções poliméricas em solos arenosos, algumas sugestões são apresentadas a seguir:

- Analisar a influência de diferentes teores água/polímero no valor da permeabilidade da mistura;
- Analisar o comportamento mecânico da mistura solo/polímero quando submetido a diferentes temperaturas;
- Avaliar a utilização de novos polímeros na forma aquosa em misturas solo/polímero;
- Verificar o efeito da densidade relativa no comportamento de solos melhorados com polímeros;
- Verificar o efeito de diferentes tempos de cura e teores água/polímero;
- Correlacionar os incrementos de resistência das amostras solo/polímero com os teores e os tempos de cura estudados;

- Analisar diferentes metodologias para a mistura dos componentes solo/polímero/água;
- Análise da toxicidade do material quando lixiviado;
- Realizar a mesma campanha de ensaios para amostras submetidas ao processo de cura sob condições controladas;
- Ensaiar e avaliar o comportamento mecânico do material quando submerso.

- AHMED, F.B; ATEMIMI, Y.K; ISMAIL, M.A.M. **Evaluation the Effects of Styrene Butadiene Rubber Addition as a New Soil Stabilizer on Geotechnical Properties**, The Electronic Journal of Geotechnical Engineering, 2013. 14p.
- ALMEIDA, G.B.O. **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, 2016. 7p.
- AL-SAYED, M.H.; MADANY, I.M. **Use of Copper Blasting Grit Waste in Asphalt Mixes in Bahrain**. Construction and Building Materials, v. 6, n. 2, 1992. pp. 113-116.
- AMARAL, J.A.C.; GUIMARÃES, A.C.R., SOARES, D.M.S. **Execução de Trecho Experimental de Base Estabilizada Quimicamente com o Produto Terrazyme tza 5x**. Relatório Interno, 7º Batalhão de Engenharia de Construção, 1998.
- ANJOS, M.A.G. **Aplicação da Granalha batida de Cobre como Substituta Parcial do Agregado Miúdo em Concreto de Cimento Portland**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil. Programa de Pós-Graduação da Universidade Federal de Sergipe. São Cristóvão, 2015. 40p.
- ATES, A. **The Effect of Polymer-Cement Stabilization on the Unconfined Compressive Strength of Liquefiable Soils**. International Journal of Polymer Science, Volume 2013. Turquia, 2013. 9p.
- AZEVÊDO, A.L.C.; OLIVEIRA, A. JR.; PEDROSA, R.A.; RAMALHO, R.W. **Estabilização de Solos com Adição de Cal**. Dissertação de Pós-Graduação, IPC/PUC-Minas, Belo Horizonte, 1998. 78p.

- AZEVEDO, A.L.C. **Estabilização de Solos com Adição de Cal. Um estudo a respeito da Reversibilidade das Reações que Acontecem no Solo após a Adição de Cal.** Dissertação de Mestrado Profissional em Engenharia Geotécnica. Programa de Pós-Graduação da Universidade Federal de Ouro Preto, 2010. 178p.
- 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.
- BAGHINI, M.S.I.A.; KARIM M.R.; SHOKRI F.; FIROOZI A.A. **Effect of Styrene-Butadiene Copolymer Latex on Properties and Durability of Road Base stabilized with Portland Cement Additive.** Elsevier, Construction and Building Materials, 2014. 10p.
- BAPTISTA, C.F.N. **Pavimentação.** Editora Globo, Tomo II, 2ª Ed, Porto Alegre, 1976.
- BHARATI, S.K.; CHEN, S.H. **Geotechnical behavior of Recycled Copper Slag-Cement-Trated Singapore Marine Clay.** Geotechnical and Geological Engineering. v. 34, 2016. p. 835-845.
- CASAGRANDE, M.T. **Estudo do Comportamento de um Solo Reforçado com Fibras de Polipropileno visando o Uso como Base de Fundações Superficiais.** Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001. 109p.
- CASTELLO BRANCO, J.E. **Estudo da Eletrosmose em Solos Finos.** Dissertação de Mestrado em Engenharia. COPPE/Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1978. 170p.
- CHERN, C.S. **Emulsion Polymerization Mechanisms and Kinetics.** Progress in Polymer Science 31, 2006. pp 443-486.
- CRISTELO, N.M.C. **Estabilização de Solos Residuais Graníticos através da Adição de Cal.** Dissertação de Mestrado em Engenharia – Programa de Pós-Graduação da Escola de Engenharia da Universidade do Minho, Minho, Portugal, 2001. 237p.

DAVIDSON, D.T.; HANDY, R.L. **Soil Stabilization**. Highway Engineering Handbook, Section 21. McGraw-Hill, New York, Estados Unidos, 1960. pp.108-133.

FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION (FHWA). **User Guidelines for byproduct and Secondary Use Materials in Pavement Construction**. FHWARD- 97-148. 2008. Disponível em: <http://www.tfhr.gov/hnr20/recycle/waste/index.htm> <<http://www.recycledmaterials.org/tools/uguidelines/index.asp>>.

Acesso em: 22 fev. 2010.

FIORATTI, N.A. **Análise da Influência de um Reforço de Solo-Cimento Compactado na Extremidade Superior de Estacas Escavadas, sob Carregamentos Horizontais**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação da Faculdade de Engenharia da Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2008. 130p.

GILBERT, R.G. **Emulsion Polymerisation: A Mechanistic Approach**. Academic Press. San Diego, Estados Unidos da América, 1995. 362p.

GLOBAL ROAD TECHNOLOGY. **Polymers Designed From Nano Scale to Build Kilometres of Road**

GOH, A.T.C.; TAY, J.H. **Municipal Solid-Waste Incinerator Fly Ash for Geotechnical Applications**. Journal Geotechnical Engineering, 119(5), 1993. pp. 811-825.

GOODARY, R.; LECOMTE-NANA, G.L.; PETIT, C.; et al. **Investigation of the Strength Development in Cement-Stabilised Soils of Volcanic Origin**. Construction Building Mater, 2012. 6p.

GORAI, B.; JANA, R.K.; PREMCHAND. **Characteristics and utilization of copper slag – a review**. Resources, Conservation and Recycling, v. 39, 2003. pp. 299-313.

GUACELLI, P.A.G. **Substituição da Areia Natural por Areia de Britagem de Rochas Basálticas para Argamassas de Revestimento**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação da Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2010. 167p.

- HERRIN, H.; HITCHELL, H. **Lime-Soil Mixtures**. Highway Research Board Bulletin, Washington, D.C. Estados Unidos, 1961. 304: pp.99-121.
- INGLES, O.G.; METCALF, J.B. **Soil Stabilization: Principles and Practice**. Melbourne, Australia, 1972. 372p.
- INTERNATIONAL INSTITUTE OF SYNTHETIC RUBBER PRODUCERS. **Emulsion Styrene-Butadiene Rubber (E-SBR)**. Worldwide Polymers, Houston, Estados Unidos da América, 2004.
- ISMAIL, A.; BAGUINI M.S.; KARIM M.R.; et al. **Laboratory Investigation on the Strength Characteristics of Cement-Treated Base**. App. Mech. Mater, 2014. 7p.
- JEWELL, R.A. **Soil Reinforcement with Geotextiles**, Construction Industry Research & Information Association (CIRIA), 1996. 332p.
- KEZDI, A. **Stabilized Earth Roads**. Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam, Holanda, 1979.
- KRAINER, C.W.M. **Aula de Laboratório de Mecânica dos Solos**. Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2016. 35p.
- LIU, J.; CHEN, Z.; SONG, Z.; BAI, Y.; QIAN, W.; WEI, J.; KANUNGO, D.P. **Tensile Behavior of Polyurethane Organic Polymer and Polypropylene Fiber-Reinforced Sand**. MDPI, Polymers. 2018. 15p.
- LOPES, L.S.E. **Análise do Comportamento Mecânico e Ambiental de Misturas Solo-Cinzas de Carvão Mineral para Camadas de Base de Pavimentos**. Dissertação de Mestrado em Engenharia – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2011. 206p.
- MALISKA, A.M. **Microscopia Eletrônica de Varredura e Microanálise**. Santa Catarina, 2007. 98p.
- MALKO, J.A.C. **Aplicabilidade de Enzimas para Melhoramento de Solos em Pavimentação**. Dissertação de Mestrado em Engenharia – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2015. 121p.
- MARINANGELO, G. **Copolimerização em Emulsão de Estireno e Acrilato de Butila com alto teor de sólidos: Estudo Experimental**

e Modelagem Matemática do Processo em Reator Semicontínuo.

Tese de Doutorado em Engenharia – Programa de Pós-Graduação da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010. 151p.

MEDINA, J.; MOTTA, L.M.G. **Apostila de Estabilização de Solos.** Escola Politécnica da Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2004.

MITCHELL, J.K.; HOOPER, D.R. **Influence of Time between Mixing and Compaction on Properties of a Lime Stabilized Expansive Clays.** Highway Research Board, bulletin nº 304, 1961. 18p.

MOREIRA, F.S. **Microbiologia e Bioquímica do Solo.** [S.I.]: UFLA, 2006.

MOURA, W.A. **Utilização de escória de cobre como adição e como agregado miúdo para concreto.** Tese de Doutorado em Engenharia – Programa de Pós-Graduação da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2000. 232p.

MURPHY, S.R.; BRAZETTI, R. **General usage of Bio-Enzymestabilizers in Road Construction in Brazil.** 32nd annual meeting on paving. Brazil, October, 2000.

NAGATANI, T. et al. **Development of an Ultra High Resolution Scanning Electron Microscope by Means of a Field Emission Source and in-Lens System.** Scanning Microscopy, v. 11, p. 901-909, 1987.

NUNEZ, W. P. **Estabilização Físico-Química de um Solo Residual de Arenito Botucatu, visando seu emprego na Pavimentação.** Dissertação de Mestrado em Engenharia – Programa de Pós-Graduação da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1991. 171p.

ODIAN, G.G. **Principles of Polymerization.** John Wiley & Sons, Inc.; New York, Estados Unidos da América, 3^a Ed., 1991. 839p.

OLIVEIRA, L.C. **A Estabilização de Solos Aplicada a Habitação, um Estudo de Misturas Solo-Cimento.** Dissertação de Mestrado em Engenharia – COPPE/Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1994.

PATRICIO, J.D. **Estudo de Solos modificados por Adição de Polímeros para Uso em Pavimentos Rodoviários.** Dissertação de Mestrado

em Engenharia Civil e Ambiental. Programa de Pós-Graduação da Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande, Paraíba, 2015. 127p.

PEREZ, I.A. **Avaliação do Potencial do Encapsulamento de um Solo Contaminado com Cloreto de Zinco através da Adição de Cal e Cimento**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil. Programa de Pós-Graduação da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2017. 118p.

PERINI, E; DA CUNHA, H.C. **Elastômeros**, OQP – Química de Polímeros – Prof.^a Carla Dalmolin, Universidade do Estado de Santa Catarina, Joinville, 2014. 11p.

PINTO, S. **Estabilização de areia com cal e cinza volante**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil. Programa de Pós-Graduação da Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1971. 153p.

RAUCH, A.F.; HARMON, J.S.; KATZ, L.E.; LILJESTRAND, H.M. **Measured Effects of Liquid Soil Stabilizers on Engineering Properties of Clay**. Transportation Research Rec, 1787, 2002. 8p.

ROCHA, T.C.J; SOARES B.G.; COUTINHO F.M.B. **Principais Copolímeros Elastoméricos à Base de Butadieno utilizados na Indústria Automobilística**, Polímeros Vol.17 no.4 São Carlos, São Paulo, 2007, 12p.

ROMANEL, C. **Apostila de Mecânica dos Solos**. Curso de Engenharia Civil – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2015. 141p.

ROMANINI, A. **Aula 10 – Solo Reforçado com Fibras**. Curso de Engenharia Civil – Técnicas de Melhoramento de Solos, Universidade do Estado de Mato Grosso, SINOP, 2017. 93p.

ROSA, A. D. **Estudo dos Parâmetros-chave no Controle da Resistência de Misturas Solo-Cinza-Cal**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009. 200p.

- ROSSIGNOLO, J.A. **Interfacial Interactions in Concretes with Silica Fume and SBR latex**. Construction and Building Materials, 23. São Carlos, São Paulo, 2009. 4p.
- ROZENBAUM, O.; PELLENQ, R.J.M.; VAN DAMME, H. **An Experimental and Mesoscopic Lattice Simulation Study of Styrene-Butadiene Latex-cement composites properties**. Materials and Structures, 38, França, 2005. pp 467-478.
- SANDRONI, S.; CONSOLI, N.C. **Sobre a Prática da Engenharia Geotécnica com Dois Solos Difíceis: Os Extremamente Moles e os Expansivos**. COBRAMSEG, 2010. Anais. PP. 97–186
- SANTOS, M.; LIMA, D.; BUENO, B. **Estabilização dos solos com Cal e Betume**. In: 6º Reunião de pavimentação urbana, Santos - São Paulo, 1995. 97p.
- SANTOS, M.N. **Análise do efeito da Estabilização Mecânica em Matrizes de Terra**. Relatório final de Iniciação Científica, PUC-Rio, Rio de Janeiro, 2012.
- SEGANTINI, A.A.S. **Utilização de solo-cimento plástico em estacas escavadas com trado mecânico em Ilha Solteira (SP)**. Tese de Doutorado em Engenharia – Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2000. 176p.
- SENEZ, P.C. **Comportamento de uma Areia Reforçada com Fibras de Polietileno Tereftalato (PET)**. Dissertação de Mestrado em Engenharia – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2016. 124p.
- SILVA, C.C. **Comportamento de Solos Siltosos quando Reforçados com Fibras e Melhorados com Aditivos Químicos e Orgânicos**. Dissertação de Mestrado em Engenharia – Programa de Pós-Graduação em Construção Civil da Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2007. 170p.
- SOLIZ, V.V.P. **Estudo de Três Solos Estabilizados com Emulsão Asfáltica**. Dissertação de Mestrado em Engenharia – COPPE/Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007. 182p.

- SILVEIRA, A. **Estabilização de Solos com Cimento**. Notas de Aula, Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, 1966. 45p.
- SILVEIRA, M.
- TECHNOLOGY, GLOBAL ROAD. **GRT Polymer Modified Cement (PMC)**. Disponível em: <https://www.globalroadtechnology.com/grt9000/> - Acesso em 13/01/2019.
- TEODORO, J.M. **Resistência ao Cisalhamento de Solos Reforçados com Fibras Plásticas**. Dissertação de Mestrado em Engenharia – Programa de Pós-Graduação da Escola de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 1999. 108p.
- THICKETT, S.C.; GILBERT, R.G. **Emulsion Polymerization: State of the Art in Kinetics and Mechanisms**. Polymer 48, Australia, 2007. 27p.
- TINGLE, J.S.; NEWMAN, J.K.; LARSON, S.L.; WEISS, C.A.; RUSHING, J.F. **Stabilization Mechanisms of Nontraditional Additives**. Journal of the Transportation Research Board, nº 1989, Vol. 2, Transportation Research Board of the National Academies, Washington, Estados Unidos da América, 2007.
- URBAN, D.; TAKAMURA K. **Polymer Dispersions and their Industrial Applications**. Weinheim, Alemanha, 2002. 408p.
- VARGAS, M. **Introdução à Mecânica dos Solos**. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, Ed. da Universidade de São Paulo, 2006. 509 p.
- VENDRUSCOLO, M.A. **Análise Numérica e Experimental do Comportamento de Fundações Superficiais Assentes em Solo Melhorado**. Dissertação de Mestrado em Engenharia – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1996. 141p.
- VIDAL, H. **The Principle of Reinforced Earth**. Highway Research Record. Washington, D.C. NCR-HRB n.282. 1969. 16p.
- VIEIRA, C.G.M.; REPSOLD, L.M. **Análise do comportamento físico e mecânico de Geopolímeros**. Projeto Final de Graduação em Engenharia Civil – Pontifícia Universidade Católica, PUC-Rio, Rio de Janeiro, 2017. 65p.
- VISCONTE, L.L.Y.; MARTINS, A.F.; NUNES, R.C.R.; SUAREZ & J.C.M. **Polímeros: Ciência e Tecnologia, XI**. 2001. 5p.

VIZCARRA, G. O. C., **Aplicabilidade de Cinzas de Resíduo Sólido Urbano para Base de Pavimentos**. Dissertação de Mestrado em Engenharia – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2010.