



**Phillipe Campello Senez**

**Comportamento de uma Areia Reforçada  
com Fibras de Polietileno Tereftalato (PET)**

**Dissertação de Mestrado**

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

Orientadora: Prof. Michéle Dal Toé Casagrande

Rio de Janeiro  
Agosto de 2016



**Phillipe Campello Senez**

**Comportamento de uma Areia Reforçada  
com Fibras de Polietileno Tereftalato (PET)**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil do Departamento de Engenharia Civil do Centro Técnico Científico da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

**Prof. Michéle Dal Toé Casagrande**

Orientadora

Departamento de Engenharia Civil - PUC-Rio

**Prof. Flávio de Andrade Silva**

Departamento de Engenharia Civil - PUC-Rio

**Prof. Romildo Dias Toledo Filho**

Universidade Federal do Rio de Janeiro

**Prof. Marcio da Silveira Carvalho**

Coordenador Setorial do  
Centro Técnico Científico – PUC-Rio

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

### **Phillipe Campello Senez**

Graduou-se em Engenharia Ambiental pela Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro em 2014. Ingressou no mestrado na Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro em agosto de 2014, desenvolvendo dissertação na linha de pesquisa de Geotecnia Experimental aplicada a solos reforçados.

#### Ficha Catalográfica

Senez, Phillipe Campello

Comportamento de uma areia reforçada com fibras de polietileno tereftalato (PET) / Phillipe Campello Senez; orientadora: Michéle Dal Toé Casagrande. – 2016.

124 f. : il. color. ; 30 cm

Dissertação (mestrado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil, 2016.

Inclui bibliografia

1. Engenharia civil – Teses. 2. Fibras PET. 3. Solos reforçados. 4. Ensaio triaxiais. 5. Ensaio de placa. 6. Modelo físico reduzido. I. Casagrande, Michéle Dal Toé. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Civil. III. Título.

CDD: 624

Dedico este trabalho à minha mãe e madrinha, que  
sempre me apoiaram e batalharam para me  
proporcionar este momento de glória.

## Agradecimentos

À Deus por me dar forças para levantar todo dia, me guiar pelo caminho certo e me dar forças para continuar a cada dia mais, apesar de todas as adversidades.

Principalmente a minha mãe e tia, que se não fosse pelas duas, não estaria aqui. Faltam palavras para descrever o quanto vocês fizeram por mim, todas as oportunidades que me deram, mas sei que todas as minhas conquistas e vitórias vieram por que tinha vocês ao meu lado.

Para minha avó Lourdes, que infelizmente não está presente desde 2001, mas sempre quis o melhor para mim, sem abdicar do carinho e amor que me proporcionou. Tenho a certeza que lá de cima ela continua torcendo e olhando por mim.

À Marcela, que com todo o seu amor e determinação, me fez chegar até o final de cabeça erguida, independente do caminho que trilhasse, sempre disposta a apoiar e ajudar nestes dois anos, mesmo entre brigas e carinhos.

À minha orientadora Michéle Casagrande, que desde tempos de Iniciação Científica apostou em mim e me fez guiar por este caminho. Muito obrigado por ser mais do que uma orientadora, por ser também uma conselheira e amiga. Aprendi muito nestes dois anos e devo muito a você.

Ao meu pai, avó, tios, irmãs e sobrinhos. Obrigado a todos vocês por fazerem parte desta gigante e bagunçada família.

Aos meus amigos Pedro Moraes, João Hermida, Pedro Saieg e Fernando Sydio, que representam um ciclo muito maior que o da amizade, o da família.

Aos profissionais do Laboratório de Estruturas e Geotecnia, Euclides, Rogério, Mariana Motta, Edson, Carlos e Amaury que me ajudaram e apoiaram desde os ensaios iniciais até o último instante.

Às alunas de iniciação Amanda e Bianca pelo tempo e ajuda disponibilizados.

À Isabel Amado, Thaiana e Fabrício, por fazerem parte deste quarteto fantástico, unido ao longo destes dois anos. Os dias seriam mais longos sem os três comigo.

Aos amigos feitos durante o período do mestrado, Nathalia Louzada, Natalia Durán, Adriano, Juan e Mariana. Obrigado por me ajudarem e me apoiarem, devo muito deste resultado final a vocês.

Ao CNPq e à PUC-Rio, pelos auxílios concedidos, sem os quais este trabalho não poderia ter sido realizado.

Gostaria de agradecer por último a empresa M&G Fibras, por cederem as fibras para utilização nesta pesquisa e ao Marcos Guerra, pela ajuda e paciência diante de tantas perguntas.

## Resumo

Senez, Phillippe Campello; Casagrande, Michéle Dal Toé (Orientadora). **Comportamento de uma Areia Reforçada com Fibras de Polietileno Tereftalato (PET)**. Rio de Janeiro, 2016. 124p. Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

O presente estudo teve como principal objetivo demonstrar que fibras derivadas da reciclagem de garrafas PET (Polietileno Tereftalato), confeccionadas com 100% do resíduo, pela indústria têxtil, podem ser uma boa alternativa se utilizadas como reforço de solos, quando submetidos a diferentes níveis de cargas. Buscando uma melhor aplicabilidade para este material, foram executados ensaios de compressão triaxial drenados em laboratório, bem como ensaios de prova de carga em placa e também com simulação de um talude em modelo físico reduzido, para a determinação do comportamento mecânico de uma areia e do compósito areia-fibras PET. Para os ensaios triaxiais drenados, foram utilizadas fibras PET com dois títulos (correspondente ao diâmetro das fibras) e comprimentos distintos (1,4 dtex com 38 mm e 3,3 dtex com 56 mm), inseridas aleatoriamente na massa de solo, onde foi utilizado o teor de 0,5% de fibras, em relação ao peso seco do solo, teor de umidade de 10% e densidade relativa de 50%. Os resultados mostraram que o comportamento da areia pura é influenciado pela adição de fibras PET, melhorando os parâmetros de resistência, como o intercepto coesivo e o ângulo de atrito, definidos pelo critério de Mohr-Coulomb. O compósito reforçado com as fibras PET de menor título e menor comprimento apresentou um maior ganho na resistência ao cisalhamento, mas ambos os compósitos, em comparação ao solo não reforçado, apresentaram uma maior resistência. Para os ensaios de prova de carga em placa e para a simulação do talude, ambos realizados em modelo físico reduzido, foram utilizadas as fibras de menor título e menor comprimento como elemento de reforço. Observa-se que a inserção das fibras PET melhora o comportamento carga-recalque da areia pura, onde o compósito reforçado apresenta uma maior capacidade de suporte e a redução dos recalques, bem como uma mudança na propagação e formação das fissuras ao redor da placa. Na simulação do talude, a inserção das fibras PET promove uma alteração completa no mecanismo de ruptura ocorrido no compósito, quando comparado à ruptura da areia pura. Ressalta-se o emprego positivo das fibras PET

para aplicação como reforço de solos em obras geotécnicas (como por exemplo, em camadas de aterros sanitários, aterros sobre solos moles, reforço de taludes, base de fundações superficiais e controle de erosão), além de eliminar problemas atuais de disposição de resíduos, dando um fim mais nobre a este material, com benefícios ambientais, sociais e econômicos.

## **Palavras-chave**

Fibras PET; ensaios triaxiais; solos reforçados; prova de carga em placa; modelo físico reduzido.

## Abstract

Senez, Phillipe Campello; Casagrande, Michéle Dal Toé (Advisor).  
**Behavior of Polyethylene Terephthalate (PET) Fibers Reinforced Sand.**  
Rio de Janeiro, 2016. 124 p. MSc. Dissertation. Departamento de  
Engenharia Civil, Pontificia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

The main objective of this study was to demonstrate that fibers derived from the recycling of PET (Polyethylene Terephthalate) bottle, 100% made from the residue by the textile industry, can be a good alternative if used as reinforcement of soil, when submitted to different load levels. Looking for a better applicability for this material, were executed drained triaxial compression tests in laboratory, as well as plate load tests, also with slope simulation in a reduced physic model, to evaluate the mechanical behavior of a sand and a composite sand-PET fibers. For the drained triaxial tests, were used PET fibers with two different titles (corresponding to the fiber diameters) and lengths (1,4 dtex com 38 mm e 3,3 dtex com 56 mm), distributed randomly in the soil mass, where was used a fiber contente of 0,5% by relation to the soil's dry weight, moisture content of 10% and relative density of 50%. The results showed that the pure sand behavior was influenced by the addition of PET fibers, improving the strenght parameters as the cohesion intercept and the friction angle, defined by the Mohr-Coulomb criteria. The composite reinforced with PET fibers with minor title and lenght presented a better improvement in the shear strenght, but both composites, compared to the non reinforced soil, showed greater resistance. For the plate load tests and for the slope simulation, both performed in a reduced physic model, it was used the fiber with minor title and lenght as reinforcement element. The addiction of PET fibers improve the load-settlement behavior of the sand, where the reinforced composite shows a greater bearing capacity, a reduction of the settlements and a change in the propagation and formation of fissures around the plate. In the slope simulation, the addiction of PET fibers promove a complete alteration in the rupture mechanism that occurred in the composite, when compared to the rupture of the pure sand. It is highlighted the positive use of PET fibers for application as soil reinforcement in geotechnical works (as an example, in landfill layers, embankment on soft soil, slope reinforcement, base of shallow foundations and

erosion control), eliminating current problems of waste disposal, giving a noble end to this material, with environmental, social and economical benefits.

## **Keywords**

PET fibers; triaxial tests; reinforced soils; plate load tests; reduced physical model.

# Sumário

1	Introdução	20
1.1	Relevância e Justificativa da Pesquisa	20
1.2	Objetivos	21
1.3	Estrutura do trabalho	22
2	Revisão Bibliográfica	24
2.1	Considerações Iniciais	24
2.2	Solos Reforçados	24
2.2.1	Contexto Histórico	24
2.2.2	Solos Reforçados com Fibras	25
2.2.2.1	Tipos de Fibras Utilizadas como Reforço	28
2.2.2.2	Mecanismo de Interação Solo-Fibra	31
2.3	Ensaio de Prova de Carga em Placa	41
2.4	Polietileno Tereftalato (PET)	47
2.4.1	Aspectos Gerais do PET	47
2.4.2	Reciclagem e Impacto Ambiental do PET	49
2.4.3	Estudos Experimentais com PET	52
3	Programa Experimental	56
3.1	Considerações Iniciais	56
3.2	Materiais Utilizados	57
3.2.1	Areia	57
3.2.2	Fibras	58
3.2.3	Água	60
3.2.4	Compósitos Solo-Fibra	60
3.3	Métodos e Procedimentos de Ensaio	61
3.3.1	Ensaio de Caracterização Física	62
3.3.1.1	Análise Granulométrica	62
3.3.1.2	Densidade Real dos Grãos	63
3.3.1.3	Índice de Vazios Máximo e Mínimo	63
3.3.2	Ensaio de Compressão Triaxial	64
3.3.2.1	Equipamentos Utilizados	65
3.3.2.2	Preparação dos Corpos de Prova	67
3.3.2.3	Processo de Saturação dos Corpos de Prova	68
3.3.2.4	Cálculo da Velocidade de Cisalhamento	69
3.3.2.5	Cisalhamento	70
3.3.3	Ensaio de Prova de Carga em Placa e Simulação de Talude	71
3.3.3.1	Caixa de Ensaio	72
3.3.3.2	Transdutores de Deslocamento	75

3.3.3.3 Sistema de Carregamento e Aquisição de Dados	77
4 Resultados e Discussões	79
4.1 Considerações Iniciais	79
4.2 Ensaio de Caracterização Física	79
4.2.1 Índices Físicos	79
4.2.2 Análise Granulométrica	80
4.3 Ensaio Triaxial CID	81
4.3.1 Tensão Desviadora e Variação Volumétrica vs Deformação Axial	81
4.3.2 Influência da Adição de Fibra PET	85
4.3.3 Trajetórias de Tensões e Parâmetros de Resistência ao Cisalhamento	88
4.3.4 Energia de Deformação Absorvida	91
4.3.5 Alongamento Médio das Fibras	92
4.4 Ensaio em Modelo Físico Reduzido	94
4.4.1 Ensaio de Carga em Placa	94
4.4.1.1 Areia	94
4.4.1.2 Compósito Areia-Fibra PET	97
4.4.1.3 Influência da Adição de Fibras PET	100
4.4.1.4 Comparação dos Resultados Obtidos com a Literatura Existente	104
4.4.2 Ensaio de Simulação de Talude	106
5 Conclusão	111
5.1 Conclusões Gerais	111
5.2 Sugestões para Futuros Trabalhos	113
6 Referências bibliográficas	115

## Lista de Figuras

Figura 2-1: Forças componentes do compósito durante um carregamento (Taylor, 1994).	27
Figura 2-2: Acréscimo de resistência devido à orientação da fibra (Gray e Ohashi, 1983).	32
Figura 2-3: Ligações químicas dos polímeros: a) termoplásticos; e b) termofixos.	48
Figura 2-4: Produção dos principais polímeros termoplásticos no Brasil em 2005 (Romão et al, 2009).	50
Figura 2-5: Geração no RSU dos principais polímeros termoplásticos no Brasil em 2005 (Romão et al, 2009).	50
Figura 2-6: Panorama do PET no Brasil (ABIPET, 2013).	51
Figura 2-7: Uso final do PET reciclado no Brasil (Spinacé e De Paoli, 2005).	52
Figura 3-1: Localização da areia in situ.	57
Figura 3-2: Amostra da areia estudada.	57
Figura 3-3: Comparativo entre as duas fibras PET utilizadas no estudo. À esquerda, 3,3 dtex com 56 mm de comprimento; A direita, 1,4 dtex com 38 mm de comprimento.	58
Figura 3-4: (a) Fibra PET de 3,3 dtex com 56 mm; (b) Fibra PET de 1,4 dtex com 38 mm.	58
Figura 3-5: Ciclo do PET (Fonte: M&G Fibras Brasil Ltda.).	59
Figura 3-6: Esquema de câmara triaxial (Bishop e Henkel, 1964).	65
Figura 3-7: (i) medidor de variação de volume; (ii) painel de controle de pressões; (iii) LVDT; (iv) célula de carga ; (v) transdutor de pressão; (vi) câmara de acrílico com grades; (vii) sistema de engrenagens para aplicação da velocidade de cisalhamento.	66
Figura 3-8: Molde tripartido.	67
Figura 3-9: Processo de moldagem dos corpos de prova para ensaio triaxial.	68
Figura 3-10: Exemplo de gráfico para obtenção de $t_{100}$ .	69
Figura 3-11: Esquema da caixa para ensaios de prova de carga em placa.	73
Figura 3-12: Caixa utilizada como modelo reduzido para realização dos ensaios.	74

Figura 3-13: Esquema dos ensaios de prova de carga em placa (esquerda) e simulação de talude (direita).	74
Figura 3-14 - Divisões da caixa por camadas para controle da densidade relativa.	75
Figura 3-15: Esquema do posicionamento dos transdutores de deslocamento no ensaio de prova de carga em placa.	76
Figura 3-16: Posicionamento dos transdutores de deslocamento durante a realização do ensaio de prova de carga em placa.	76
Figura 3-17: Esquema do posicionamento dos transdutores de deslocamento na simulação do talude.	77
Figura 3-18: Posicionamento dos transdutores de deslocamento durante a realização da simulação do talude.	77
Figura 3-19 - Sistema de carregamento utilizado para realização dos ensaios de prova de carga em placa.	78
Figura 4-1: Curva granulométrica da areia	80
Figura 4-2: Curvas tensão desviadora vs deformação axial para a areia (A100).	81
Figura 4-3: Curva variação volumétrica vs deformação axial para a areia (A100).	82
Figura 4-4: Curva tensão desviadora vs deformação axial para areia-fibras PET (F1,4_38).	83
Figura 4-5: Curva variação volumétrica vs deformação axial para areia-fibras PET (F1,4_38).	83
Figura 4-6: Curva tensão desviadora vs deformação axial para areia-fibras PET (F3,3_56).	84
Figura 4-7: Curva variação volumétrica vs deformação axial para areia-fibras PET (F3,3_56).	85
Figura 4-8: Curva tensão desviadora vs deformação axial para areia pura e misturas.	86
Figura 4-9: Curva variação volumétrica vs deformação axial para areia pura e misturas.	87
Figura 4-10: Trajetória de tensões e parâmetros de resistência para areia pura (A100).	88

Figura 4-11: Trajetória de tensões e parâmetros de resistência para compósito 1 (F1,4_38).	89
Figura 4-12: Trajetória de tensões e parâmetros de resistência para compósito 2 (F3,3_56).	89
Figura 4-13: Comparação entre trajetórias de tensões da areia e compósitos.	90
Figura 4-14: Energia de deformação absorvida nos ensaios triaxiais de compressão realizados para a areia e misturas areia-fibras PET.	91
Figura 4-15: Comprimento médio final das fibras PET para o compósito 1 (F1,4_38) após execução dos ensaios triaxiais.	93
Figura 4-16: Comportamento carga-recalque para a areia (A100).	95
Figura 4-17: Leituras dos transdutores de deslocamento ao lado da placa para ensaio de placa na areia (A100)	95
Figura 4-18: Campo de deslocamento da ruptura localizada (Lopes, 1979).	96
Figura 4-19: Fissuras encontradas na areia após a realização do ensaio de placa.	96
Figura 4-20: Exumação após ensaio de placa na areia.	97
Figura 4-21: Comportamento carga-recalque para o compósito solo-fibra PET (F1,4_38).	98
Figura 4-22: Leituras dos transdutores de deslocamento ao lado da placa para ensaio de placa no compósito areia-fibra PET.	98
Figura 4-23: Campo de deslocamento da ruptura por puncionamento (Lopes, 1979).	99
Figura 4-24: Fissuras encontradas na mistura areia-fibra PET após a realização do ensaio de placa.	99
Figura 4-25: Exumação após ensaio de placa na mistura areia-fibra PET.	100
Figura 4-26: Curvas carga-recalque obtidas para os ensaios de placa.	101
Figura 4-27: Comparação entre os perfis de areia e areia-fibra após o término dos ensaios de placa.	103
Figura 4-28: Comparação dos resultados obtidos com outros estudos existentes.	105
Figura 4-29: Leituras dos transdutores de deslocamento horizontal para as simulações de talude na areia e no compósito areia-fibras PET.	106
Figura 4-30: Fissuras encontradas na areia após a realização da simulação de talude.	107

Figura 4-31: Fissuras encontradas no compósito areia-fibra PET após a realização da simulação de talude.	108
Figura 4-32: Exumação após ensaio de simulação de talude na areia.	109
Figura 4-33: Exumação após ensaio de simulação de talude no compósito areia-fibra PET.	109
Figura 4-34: Instante final das simulações de talude para a areia e o compósito areia-fibra PET. Escala ampliada 10x.	110

## Lista de Tabelas

Tabela 2-1: Propriedades das fibras poliméricas (Mano, 1991; Hull e Clyne, 1996, Heineck, 2002)	31
Tabela 2-2: Dados da resina PET (Mano e Mendes, 2001).	49
Tabela 3-1: Propriedades mecânicas das fibras PET (Fonte: M&G Fibras Brasil Ltda.)	59
Tabela 3-2: Nomenclatura utilizada para o solo e compósitos.	61
Tabela 4-1: Índices Físicos da areia.	79
Tabela 4-2: Índices obtidos da curva granulométrica.	80
Tabela 4-3: Resumo dos parâmetros de resistência encontrados para a areia e misturas estudadas.	91
Tabela 4-4: Resultados da energia de deformação absorvida da areia e misturas areia-fibras PET estudadas.	92
Tabela 4-5: Comparação entre recalques para tensões acima de 400 kPa para a areia e areia-fibra.	102
Tabela 4-6: Características dos equipamentos.	104

## Lista de Abreviações

ABIPET	Associação Brasileira da Indústria do PET
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CBR	Índice de Suporte Califórnia
CID	Ensaio triaxial consolidado isotropicamente drenado
DR	Densidade relativa da areia
LVDT	Transformador Diferencial Variável Linear
MVV	Medidor de Variação Volumétrica
PET	Politereftalato de Etileno
PVC	Policloreto de Vinila
RSU	Resíduo Sólido Urbano

## Lista de Símbolos

$F_a$	Resistência de atrito mobilizada ao longo da fibra
$F_t$	Resistência à tração da fibra
$\rho_d$	Massa específica seca do solo
$l/d$	Fator de forma da fibra
$l$	Comprimento da fibra
$d$	Diâmetro da fibra
$G_s$	Massa específica real dos grãos
$e_{máx}$	Índice de vazios máximo
$e_{mín}$	Índice de vazios mínimo
$e$	Índice de vazios
$C_u$	Coefficiente de uniformidade
$C_c$	Coefficiente de curvatura
$D_{10}$	Diâmetro efetivo
$D_{50}$	Diâmetro médio
$c'$	Coesão efetiva do solo
$\phi'$	Ângulo de atrito interno do solo
$E$	Módulo de Young
$p'$	Tensão efetiva normal média
$q$	Tensão desvio
$\Delta u$	Excesso de poropressão
$\Delta \sigma_c$	Acréscimo de tensão confinante
$B$	Parâmetro B de Skempton
$t_f$	Tempo mínimo para ruptura
$\Delta V$ ou $\varepsilon_v$	Varição volumétrica
$\varepsilon_f$	Deformação axial na ruptura
$\varepsilon_a$	Deformação axial
$v$	Velocidade máxima de cisalhamento
$\sigma_d$	Tensão desviadora
$\sigma'_1$	Tensão principal efetiva máxima
$\sigma'_3$	Tensão principal efetiva mínima

*"Escolha uma ideia. Faça dessa ideia a sua vida.  
Pense nela, sonhe com ela, viva pensando nela.  
Deixe cérebro, músculos, nervos, todas as partes  
do seu corpo serem preenchidas com essa ideia.  
Esse é o caminho para o sucesso"*

*Swami Vivekananda, pensador hindu.*

# 1 Introdução

## 1.1 Relevância e Justificativa da Pesquisa

A introdução da embalagem PET no mundo teve início na década de 70, inicialmente nos Estados Unidos e em sequência na Europa. O PET chegou ao Brasil no ano de 1988, mas apenas em 1993 começou a ser utilizado na produção de embalagens. A produção deste material trouxe diversos benefícios ao consumidor e ao produtor, no entanto, junto com estes benefícios vieram grandes problemas, principalmente os relacionados ao meio ambiente, no que diz respeito à adequada disposição final dos resíduos PET. Milhares de toneladas de garrafas PET são produzidas e descartadas anualmente no Brasil e a cada ano que passa, estes números tendem a um maior crescimento. Estima-se que no ano de 2016, devido aos Jogos Olímpicos no Rio de Janeiro, o consumo de PET será de aproximadamente 840 kton, mas espera-se que apenas metade deste valor seja reciclado.

Um outro grave problema é a falta de espaço que os aterros vêm sofrendo, não possuindo local disponível para descarte destes e outros resíduos. O PET é um produto que necessita de grandes espaços para ser disposto, além de ser um material com longo tempo de decomposição, de aproximadamente 100 anos, podendo vir a causar sérios problemas ambientais, como por exemplo, a perda da biodiversidade. A sua disposição final inadequada, diretamente na natureza, pode contribuir para a poluição da água de rios, podendo agravar problemas de enchentes e também a contaminação do lençol freático.

De acordo com a Secretaria de Vigilância Sanitária do Ministério da Saúde, o PET reciclado possui suas limitações na hora de ser reutilizado, pois pode estar previamente contaminado, o que acaba limitando o seu uso. O PET reciclado vem sendo muito utilizado na confecção de roupas, onde estima-se que, no Brasil, 50% da reciclagem de PET ocorre devido à indústria têxtil, de acordo com a ABIPET. As fibras PET, muitas vezes relacionadas ao algodão, atribuem ao tecido algumas

propriedades distintas, como a estabilidade dimensional, que impede que o tecido encolha ou entorte, solidez na cor, resistência e durabilidade com mais qualidade.

A inclusão de material alternativo em pesquisas geotécnicas também é vista como uma potencial utilização para o PET reciclado, reduzindo os problemas encontrados para este resíduo e estimulando investimentos neste ramo de pesquisa. Um solo muito utilizado e com grande potencial para reforço é o solo arenoso, pois são solos que apesar de possuírem uma boa permeabilidade, não possuem uma coesão entre os seus grãos, igual acontece às argilas. A grosso modo, os grãos de areia ficam “soltos” em sua matriz, sem nenhum elemento de agregação entre eles. A importância de reforçar este tipo de solo é avaliar como que, de alguma maneira, o reforço consegue realizar este processo de agregação dos grãos do solo. A utilização da areia possibilita visualizar bem este processo, pois sabe-se que é um solo sem a característica coesiva.

Portanto, este trabalho tem o objetivo de apresentar e interpretar o comportamento do solo arenoso reforçado com fibras de resíduo PET, visando estudar a viabilidade das fibras PET como material de reforço em solo, através de estudo experimental pela caracterização física e mecânica dos compósitos. O uso deste resíduo como material alternativo pode eliminar problemas atuais de disposição de resíduos em lixões, aterros sanitários e até mesmo diretamente na natureza, agregando mais valor ao material, além de poder ser uma boa alternativa visando a aplicação do solo reforçado como base de fundações superficiais, taludes, camadas de aterros sanitários e aterros sobre solos moles.

## **1.2** **Objetivos**

A escolha do tipo de fibra ocorreu pois as fibras PET obtidas diretamente através da reciclagem do resíduo PET ainda não haviam sido estudadas como material de reforço de solos. As fibras utilizadas na presente pesquisa também possuem um diferencial, pelo fato de serem fibras com um baixo título (1,4 dtex), diferente do que comumente é estudado (3,3 dtex). Foi decidido como objetivo principal analisar a influência da inserção de fibras PET, como material de reforço em uma areia, visando a melhoria do novo material com relação às suas propriedades mecânicas, tais como resistência ao cisalhamento, comportamento carga-recalque e mecanismos de ruptura. O programa experimental consistiu em

ensaios de caracterização física da areia e ensaios mecânicos para a areia e misturas, estabelecendo parâmetros e definições que possam vir a ajudar e entender a influência deste material como material de reforço.

De acordo com o principal objetivo, para chegar ao resultado final, tem-se os seguintes objetivos específicos:

- Analisar o comportamento físico e mecânico da areia e dos compósitos areia-fibras PET, em diferentes títulos e comprimentos, através de ensaios triaxiais consolidados isotropicamente drenados (CID), pela obtenção dos parâmetros de resistência no critério de ruptura de Mohr–Coulomb;
- Realizar ensaios de prova de carga em placa em modelo físico reduzido na areia e compósitos areia-fibras PET, visando obter o comportamento carga-recalque dos compósitos;
- Avaliar a influência da inserção de fibras PET na areia para verificação de mudanças no mecanismo de ruptura dos compósitos em simulações de talude em modelo físico reduzido.

### **1.3 Estrutura do trabalho**

Este trabalho é dividido em cinco capítulos, começando com este capítulo introdutório (Capítulo 1), seguido do Capítulo 2, que apresenta toda a revisão bibliográfica sobre o PET e suas características. Também será apresentada uma revisão sobre solos reforçados com resíduo PET e também sobre solos reforçados com outros tipos de fibras, além de apresentar estudos anteriores com ênfase na realização de ensaios de prova de carga em placa.

O Capítulo 3 apresenta detalhadamente o programa experimental realizado nesta pesquisa. Descreve os materiais utilizados, equipamentos e procedimentos a serem seguidos.

O Capítulo 4 apresenta os resultados da caracterização física do solo e resultados dos ensaios triaxiais CID, ensaios de prova de carga em placa e ensaios de simulação de talude, para a areia e compósitos areia-fibras PET.

E por último, o Capítulo 5 apresenta as considerações finais obtidas através das análises dos resultados e recomendações para futuros trabalhos.

## **2** **Revisão Bibliográfica**

### **2.1** **Considerações Iniciais**

No presente capítulo, será apresentada a revisão bibliográfica encontrada sobre solos reforçados com fibras, como alguns conceitos básicos gerais, os principais tipos de fibras existentes e uma revisão de estudos utilizando fibras como reforço, com o objetivo de determinar desde os mecanismos de interação entre solos e fibras até as mudanças no comportamento mecânico dos solos, como a melhoria na resistência ao cisalhamento.

Em sequência serão apresentadas algumas condições gerais para a realização de ensaios de prova de carga em placa, em modelo físico reduzido, além de serem analisados estudos com base nesta metodologia.

Por último, será apresentada uma descrição geral sobre o PET, seu processo de reciclagem e legislação vigente no Brasil, além de pesquisas utilizando este material como reforço de solos. Devido à falta de pesquisas sobre o uso de fibras PET como reforço, procurou-se apresentar pesquisas realizadas utilizando o material PET triturado como reforço.

### **2.2** **Solos Reforçados**

#### **2.2.1** **Contexto Histórico**

A idéia de solo reforçado é uma técnica antiga e pode ser amplamente demonstrada pela natureza, como animais, pássaros e a ação das raízes das plantas. É uma técnica conhecida por ser usada desde o quinto e quarto século antes de Cristo (Jones, 1985). Desde a antiguidade, os homens perceberam que era possível melhorar as características de um solo através da adição de diferentes materiais, obtendo um novo material mais resistente e com maior durabilidade.

Segundo Van Impe (1989), do ponto de vista técnico, o melhoramento do solo é, provavelmente, a técnica mais antiga, se comparado aos métodos comuns em Engenharia Civil.

A idéia principal do reforço de solo é obter uma melhoria nos parâmetros do solo. Este conceito foi desenvolvido primeiramente na década de 60, por um engenheiro francês chamado Henri Vidal. Vidal patenteou uma de suas descobertas, a “Terra Armada”, onde provou que introduzindo um elemento de reforço na matriz do solo, a resistência ao cisalhamento do solo melhoraria.

Atualmente, as técnicas para reforçar o solo estão bem desenvolvidas e tem sido amplamente utilizadas, como por exemplo o uso dos geossintéticos, que não estão sendo aplicados apenas em drenagem e filtração, mas também como reforço de solos. Também foram desenvolvidos diversos outros materiais a serem utilizados como reforço, tais como as fibras de diversos tipos, vidro, borracha moída, dentre outros.

### **2.2.2 Solos Reforçados com Fibras**

Apenas há três décadas atrás que começou a se ter registros de pesquisas que estudavam a utilização de fibras como reforço de solos. De acordo com Gray e Ohashi (1983), os primeiros estudos utilizavam fibras dispostas de maneira aleatória na massa de solo, visando avaliar a influência das raízes das plantas na resistência ao cisalhamento dos solos.

Reforço de solo é definido como uma técnica utilizada para melhorar as características geotécnicas do solo (Ling *et al*, 2003). O reforço consiste em misturar certo material com outro, com o objetivo de melhorar suas propriedades. Diversos tipos de materiais vêm sendo estudados com o objetivo de melhorar as propriedades mecânicas de alguns solos.

Casagrande (2005) explica que as melhorias das propriedades mecânicas de um material, criando assim um novo material, denominado de compósito, pode ocorrer tanto por processos físicos e/ou químicos. Quando se aborda o tema melhoria de solos, normalmente este vem associado a processos químicos de estabilização, enquanto que o termo reforço de solos está associado a processos físicos, como por exemplo, a inserção de fibras na matriz do solo.

De acordo com Budinski (1996), material compósito é a combinação de dois ou mais materiais que possuem propriedades que as matérias componentes não possuem originalmente. Portanto, material compósito é composto de uma matriz e de um elemento de reforço. É muito comum associar, hoje em dia, o termo compósito aos estudos de reforço de solos com fibras, principalmente na utilização de fibras oriundas de materiais recicláveis, evitando assim um maior impacto ambiental ocasionada pela geração em massa de resíduos, agentes diretos nos principais casos de poluição ambiental.

Como as fibras vegetais utilizadas como reforço acabam se degradando com o tempo, materiais sintéticos começaram a surgir, formando compósitos mais resistentes, como o fibroso, feito a partir da mistura de solo e fibras sintéticas, com finalidade para utilização em pavimentos (Homem, 2002; Specht, 2000), aterros sobre solos moles, estabilidade de taludes (Zornberg, 2002), e em fundações superficiais (Casagrande, 2001).

As fibras possuem potencial de aumentar a capacidade do compósito de absorver mais energia, aumentando a resistência do solo no estado pós-fissuração. Esse ganho de resistência ocorre porque a deformação necessária para que apareça fissuras na matriz de solo é muito inferior à elongação das fibras, nas quais não se espera um aumento da tensão de fissuração (Hannant, 1994; Illston, 1994; Taylor, 1994). A inserção de fibras no solo não evita a formação de fissuras, mas tende a controlar a propagação destas, incrementando a resistência à tração da mistura (Taylor, 1994). Hannant (1994) explica que a propagação de fissuras é amortizada porque as fibras mantêm as interfaces das fissuras juntas, o que melhora as propriedades mecânicas do compósito no estado pós-fissuração e a sua ductilidade.

As fibras tendem a reforçar o compósito sobre qualquer modo de carregamento, desde que este induza uma tensão de tração na fibra, melhorando a ductilidade e tenacidade da matriz de solo (Johnston, 1994).

A Figura 2-1 apresenta uma ilustração das forças presentes no compósito no momento em que a fibra é solicitada durante um carregamento.

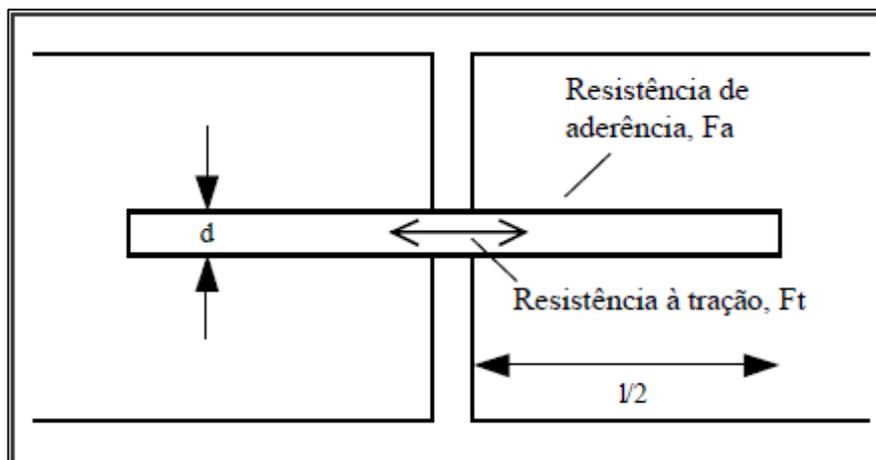


Figura 2-1: Forças componentes do compósito durante um carregamento (Taylor, 1994).

Assim, Illston (1994) e Taylor (1994) propuseram um equilíbrio de forças para o momento em que as fibras são solicitadas, apresentados abaixo pelas equações (2.1) e (2.2).

$$\frac{\pi d^2}{4} \cdot F_t = \pi \cdot d \cdot \frac{l}{2} \cdot F_a \quad (2.1)$$

$$\frac{l}{d} = \frac{F_t}{2F_a} \quad (2.2)$$

O comprimento e o diâmetro (ou título) das fibras, são dois fatores de grande importância, pois mantêm unidas as interfaces das fissuras. A relação entre o comprimento e o diâmetro da fibra (ou fator de forma),  $l/d$ , é proporcional à divisão resultante entre a resistência à tração da fibra ( $F_t$ ) e a resistência da aderência fibra/matriz ( $F_a$ ). A fibra de aço por exemplo, que possui uma alta resistência à tração, deverá ter uma alta relação  $l/d$  ou necessitará de uma resistência de aderência alta o suficiente, para impedir que ocorra o “arrancamento” das fibras antes da resistência à tração ser totalmente mobilizada.

Outras variáveis importantes que influenciam no comportamento do compósito são: o teor de fibra na matriz de solo, as propriedades físicas da fibra e da matriz e a aderência entre solo-fibra (Hannant, 1994). A forma como a fibra é disposta na matriz também influencia no comportamento final do compósito (Johnston, 1994).

### 2.2.2.1 Tipos de Fibras Utilizadas como Reforço

Existem diversos tipos de fibras e estas podem ser classificadas principalmente em três diferentes categorias: naturais, metálicas e poliméricas. As fibras naturais são divididas em três diferentes classes: de origem animal, vegetais e minerais. A seguir será apresentado um pouco sobre cada tipo de fibra. As duas primeiras serão apresentadas apenas para conhecimento, enquanto que as fibras poliméricas (mais especificamente as de PET) serão as fibras estudadas na presente pesquisa.

- Fibras Metálicas

As fibras metálicas são comumente utilizadas na melhoria das propriedades mecânicas dos materiais de construção, sendo utilizadas como reforço. A fibra metálica mais usual são as fibras de aço.

Possuem resistência à tração da ordem de 1100 MPa e seu módulo de elasticidade é de 200 GPa.

A ruptura do compósito ocorre devido ao arrancamento da fibra e não por causa da sua ruptura. Uma das principais desvantagens deste tipo de fibra é que podem apresentar sérios problemas corrosivos, se não forem recobertas com níquel (Taylor, 1994).

- Fibras Vegetais

As fibras vegetais podem ser diversas e são classificadas com base na planta de origem de onde são extraídas, sendo agrupadas em: fibras de caule, como as de linho, juta, cânhamo, bagaço de cana e kenaf; de folha, como a de sisal, rami, bananeira, curauá e abacaxi; de semente, como a de algodão e kapok; e de fruto, como a de coco. De acordo com Young (1994), existem mais de 250.000 espécies de plantas, mas menos de 0,1% destas são comercialmente importantes como fontes de fibra.

As fibras vegetais utilizadas como reforço na formação de compósitos podem ser de bambu, juta, coco, sisal, linho, cana de açúcar e outras (Hannant, 1994). Algumas fibras vegetais possuem elevadas resistências à tração, como por exemplo as de curauá, com resistência à tração de aproximadamente 700 a 1100 MPa e com módulo de elasticidade entre 26 e 46 GPa. Fibras de coco, muito utilizadas em pesquisas, apresentam uma resistência à tração entre 106 e 175 MPa

e módulo de elasticidade entre 4,0 e 6,0 GPa. Percebe-se então que as propriedades mecânicas dessas fibras não são próximas para todas as fibras vegetais, possuindo uma grande variação entre propriedades.

O principal problema das fibras vegetais ocorre devido à sua facilidade de degradação, fazendo com que apresentem uma baixa durabilidade. A exposição das fibras vegetais em ambientes alcalinos causa uma rápida degradação das fibras (Teodoro, 1999).

- Fibras Minerais

As fibras minerais têm como origem as rochas com estrutura fibrosa e são constituídas essencialmente por silicatos. Algumas das fibras minerais mais conhecidas são as fibras de vidro, carbono e amianto. Possuem a vantagem de possuir uma boa aderência à matriz.

As fibras de carbono, devido à alta resistência das ligações entre os átomos de carbono, atingem um módulo de elasticidade de aproximadamente 420 GPa (Taylor, 1994) e resistência à tração em torno de 5500 MPa. As fibras de amianto possuem uma resistência à tração de 1000 MPa e módulo de elasticidade de 160 GPa, mas podem ser tóxicas aos seres humanos, pois possuem partículas que, ao serem liberadas, podem afetar o sistema respiratório. As fibras de vidro possuem uma resistência à tração variável, podendo variar de 1500 a 4500 MPa e módulo de elasticidade de 87 GPa. São altamente susceptíveis ao ataque de álcalis.

- Fibras Poliméricas

As fibras poliméricas são fibras sintéticas, confeccionadas pelo homem e possuem a vantagem de poderem ter a sua estrutura química modificada. Esta vantagem trás diversos benefícios, como a criação de fibras não degradáveis, com boas propriedades mecânicas, quimicamente neutras e não prejudicial à saúde humana.

Podem ser confeccionadas em diversas formas, podendo ser comercializadas desde fibras individuais até fibras em malha, que proporcionam um intertravamento das partículas do solo (McGrown *et al*, 1978; Morel e Gourc, 1997).

Casagrande (2005) divide as fibras poliméricas em quatro diferentes tipos: polipropileno, polietileno, poliamida e poliéster. Esses quatro polímeros podem ser definidos como polímeros termoplásticos, materiais que, com o aumento da temperatura, podem ser fundidos e solidificados diversas vezes, sem ocorrer

alteração na sua composição. Os polímeros termoplásticos são constituídos por séries de longas cadeias de moléculas polimerizadas, apartadas entre si de forma a que possam deslizar umas sobre as outras (Hollaway, 1994). A seguir serão apresentadas algumas características referentes a cada uma destas fibras.

- (i) **Fibras de Polietileno:** possuem um módulo de elasticidade baixo, não são muito aderentes à matriz cimentícia e são altamente resistentes aos álcalis. Uma solução à baixa aderência e módulo de elasticidade tem sido o desenvolvimento do polietileno de alta densidade. As fibras de polietileno também possuem alta durabilidade, mas apresentam maiores deformações de fluência que podem causar consideráveis alongações e deflexões ao longo do tempo, se utilizadas como reforço de um compósito fissurado, sujeito ao constante carregamento de altas tensões (Hannant, 1994);
- (ii) **Fibras de Poliamida:** polímeros contendo longas cadeias de moléculas geralmente possuem baixa resistência e rigidez, uma vez que suas moléculas são espiraladas e dobradas. Entretanto, se estas moléculas forem estendidas e reforçadas durante o processo de manufatura, altas resistências e módulos de elasticidade podem ser alcançados, como é o caso da Aramida (Taylor, 1994). A fibra de poliamida aromática, comercialmente conhecida por Kevlar, é a fibra orgânica de maior sucesso. Existem dois tipos de Kevlar, o Kevlar 29, cuja resistência mecânica é da ordem de 3000 MPa e o módulo de elasticidade médio é de, aproximadamente, 64 GPa, e o Kevlar 49, cuja resistência é a mesma do anterior, mas seu módulo é de 300 GPa (Hollaway, 1994).
- (iii) **Fibras de Polipropileno:** essas fibras possuem uma grande flexibilidade e tenacidade em função de sua constituição. Seu módulo de elasticidade gira em torno de 8 GPa – menor que qualquer outra fibra – e sua resistência à tração é de aproximadamente 400 MPa. Além disso, possuem elevada resistência ao ataque de várias substâncias químicas e aos álcalis (Taylor, 1994). Tais características conferem aos materiais a que

estas fibras são misturadas uma considerável resistência ao impacto.

- (iv) **Fibras de Poliéster:** o poliéster mais conhecido atualmente é o polietileno tereftalato ou PET. Apresenta alta densidade, rigidez e resistência, conferindo tais características às fibras feitas deste material. Essas fibras possuem um aspecto bastante similar às de polipropileno e podem ser utilizadas para as mesmas aplicações (Taylor, 1994).

A Tabela 2-1 apresenta algumas das propriedades dos quatro tipos de fibras poliméricas citadas.

Tabela 2-1: Propriedades das fibras poliméricas  
(Mano, 1991; Hull e Clyne, 1996, Heineck, 2002)

<b>Tipo de fibra polimérica</b>	<b>Resistência à tração (MPa)</b>	<b>Módulo de elasticidade (GPa)</b>
Polietileno	240	1,1
Poliamida (aramida)	3500	128
Polipropileno	400	8
Poliéster (PET)	130-880	4-15

### 2.2.2.2 Mecanismo de Interação Solo-Fibra

A interação solo-fibra possui inúmeras variáveis, dependendo, portanto, de diversos fatores que têm sido amplamente estudados. O comportamento dos solos com e sem reforço foram observados, sendo analisados variações nos parâmetros de resistência e deformabilidade. A seguir serão apresentados resultados de pesquisas com o objetivo de entender os principais mecanismos que governam o comportamento dos compósitos reforçados com diferentes tipos de fibra.

McGown *et al* (1978) avaliou o efeito de diferentes elementos de reforço em um solo de matriz arenosa, nos estados denso e fofo. Os autores observaram que o comportamento de tensão-deformação do solo reforçado está ligado às características de resistência e deformabilidade dos elementos de reforço. Também concluíram que, os reforços extensíveis (baseado na deformabilidade) tem a principal função de aumentar a ductilidade e diminuir a perda de resistência pós pico, acrescentando a resistência mecânica. Já os elementos de reforço não

extensíveis, possuem uma deformação de ruptura menor que a máxima deformação de tração no solo não reforçado, resultando num ganho de resistência mecânica, porém com possibilidade de ocorrer uma ruptura catastrófica, em caso do reforço romper.

Gray e Ohashi (1983) propuseram um modelo teórico para prever o comportamento mecânico de uma areia reforçada com fibras. Foram executados ensaios de cisalhamento direto na areia, nos estados fofo e denso, reforçada com fibras vegetais, sintéticas e metálicas. Os autores concluíram que a inclusão de fibra na matriz de areia aumenta a resistência ao cisalhamento de pico e reduz a queda pós pico. As fibras de menor comprimento comportaram-se como um reforço extensível, logo não ocorreu a ruptura. O aumento do comprimento das fibras também ocasionou o aumento da resistência, mas apenas até um certo comprimento.

Gray e Ohashi (1983) também estudaram a orientação das fibras em relação à superfície de cisalhamento. Na Figura 2-2 apresenta-se os resultados obtidos pelos autores, para os ensaios de cisalhamento direto realizados.

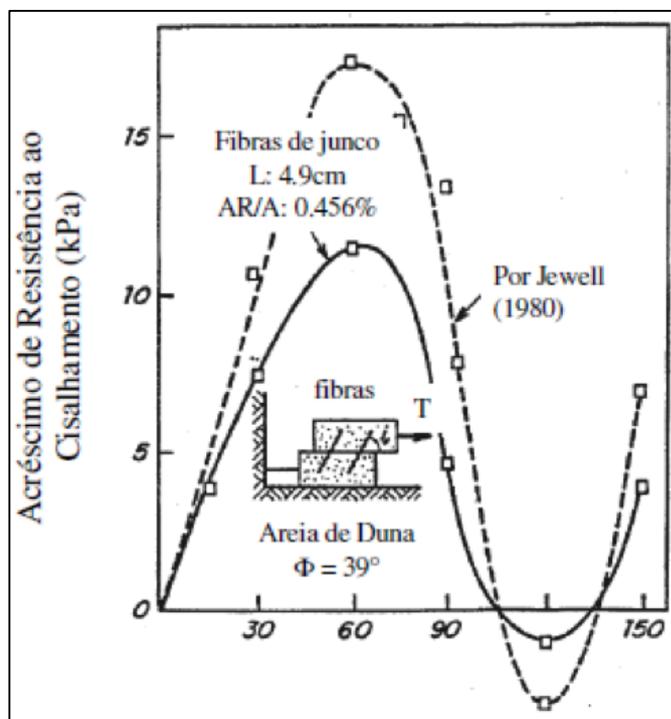


Figura 2-2: Acréscimo de resistência devido à orientação da fibra (Gray e Ohashi, 1983).

Observa-se que a orientação de 60° em relação ao plano de ruptura apresenta um melhor acréscimo na resistência ao cisalhamento, enquanto que a orientação de 120° apresenta uma redução da resistência.

Freitag (1986) observou os efeitos da inclusão aleatória de fibras na resistência à compressão simples de uma argila arenosa compactada. Foram utilizadas três tipos diferentes de fibras sintéticas com diâmetro variável e comprimento de 20 mm. O teor de fibras utilizado foi de 1% em volume. O autor concluiu que a inclusão aleatória de fibras pode resultar num aumento da resistência e da tenacidade. O ganho de resistência para as amostras na umidade ótima foi em torno de 25%.

Gray e Maher (1989) estudaram o comportamento tensão-deformação de misturas solo-fibra, analisando a influência de diversos parâmetros, tanto dos solos quanto das fibras, dispostas aleatoriamente na massa de solo. Concluíram que a distribuição aleatória das fibras não gera plano de fraquezas, que podem ser desenvolvidos em sistemas de reforço orientado, além de manter a resistência isotrópica. Ainda verificaram que o aumento da relação comprimento/diâmetro ( $l/d$ ) da fibra torna mais efetiva a contribuição da fibra no aumento da resistência ao cisalhamento, mas até certo limite.

Shewbridge e Sitar (1989) estudaram o mecanismo de desenvolvimento da zona de cisalhamento de um solo granular arenoso reforçado com diversos tipos de fibras. Foram realizados ensaios de cisalhamento direto em equipamentos maiores que os convencionais. Os autores concluíram que o aumento da resistência depende das propriedades do solo, como graduação, tamanho, forma das partículas e coeficiente de uniformidade da areia, e das propriedades da fibra, tais como teor, módulo de elasticidade e fator de forma da fibra ( $l/d$ ). A resistência diminui com o aumento do tamanho médio e da esferidade dos grãos de areia.

Maher e Ho (1993) estudaram o comportamento de uma argila com diferentes teores de cimento, simulando um material com diferentes valores de coesão. Concluíram que o aumento da coesão reduz a contribuição das fibras no aumento da resistência de pico do solo.

Maher e Ho (1994) estudaram as propriedades mecânicas e hidráulicas de um compósito caulinita-fibra, através da realização de ensaios de compressão não confinada, compressão diametral, flexão e condutividade hidráulica. As fibras utilizadas eram de polipropileno, vidro e celulose. Os autores observaram que a

inclusão aleatória de fibras aumentou significativamente a resistência e a ductilidade do compósito, sendo que este aumento era mais visível em baixos teores de umidade. Para um mesmo teor de fibras, aquelas com menor comprimento acabam sendo mais numerosas dentro da matriz do solo, existindo uma maior possibilidade de estarem presentes na superfície de ruptura, colaborando no aumento da resistência. As fibras de maior comprimento são mais eficazes quando se quer melhorar a ductilidade e a capacidade de absorção de energia, porque após a ruptura, as fibras de menor comprimento são arrancadas mais facilmente do que as de maior comprimento. Os autores também concluíram que a adição de fibra aumentou a permeabilidade da argila, sendo este aumento mais significativo em maiores teores de fibras.

Nataraj *et al* (1996) realizaram diversos ensaios de laboratório em um solo arenoso e em um solo argiloso, ambos reforçados com fibras de polipropileno, distribuídas aleatoriamente na massa de solo. A adição de fibras não causou alterações significativas nos parâmetros de compactação do solo, mas para a areia, ocorreu um aumento da resistência ao cisalhamento, sendo este aumento maior para maiores teores de fibra. Para os dois solos estudados, a inclusão de fibras aumentou a resistência à compressão simples. Também apresentaram maiores valores de CBR (California Bearing Ratio) com a inclusão de fibras.

Teodoro e Bueno (1998) avaliaram o comportamento de dois solos reforçados com fibras de polipropileno através de ensaios triaxiais não drenados e compressão não confinada. Foram utilizados diferentes teores e comprimentos de fibra. Foram executados painéis de compósitos solo-fibra para estudar o padrão de fissuramento deste material quando submetido a variações térmicas. Os autores observaram que a inclusão de fibras ao solo melhora, no geral, sua resistência ao cisalhamento e reduz a queda de resistência pós pico. Para o solo arenoso, observou-se que as envoltórias tendem a bilinearidade na medida que o teor e o comprimento das fibras aumentam. O efeito da inclusão das fibras nos painéis executados com o solo argiloso foi o de reduzir a dimensão das trincas, mas sem evitar o fissuramento.

Montardo (1999), Montardo *et al* (2002) e Consoli *et al* (2002) estudaram os efeitos da inclusão aleatória de fibras sintéticas no comportamento de uma areia cimentada artificialmente e uma areia não cimentada. Os autores concluíram que as fibras relativamente rígidas – vidro e PET – exercem efeito mais visível na

resistência de ruptura, a medida que as fibras mais flexíveis – polipropileno – causam um efeito mais visível no modo de ruptura e no comportamento último. A inserção de fibras PET ou de vidro aumentou a resistência à compressão e a resistência à tração da matriz de areia cimentada, porém as fibras de polipropileno não obtiveram nenhuma variação nestes dois parâmetros. A inserção de fibras de polipropileno na matriz cimentada alterou o comportamento do compósito na ruptura de frágil para dúctil, diferentemente das fibras PET e de vidro, que não alteraram o modo de ruptura. Todas as fibras aumentaram a capacidade de absorção de energia de deformação, sendo este aumento mais acentuado em fibras de maiores comprimentos. As fibras de PET e vidro não afetaram a rigidez inicial do solo, porém esta rigidez é reduzida significativamente com a inclusão de fibras de polipropileno.

Specht (2000) estudou os efeitos da inclusão de fibras poliméricas de diferentes propriedades mecânicas – uma em forma de filamentos e outra fibrilada, tipo *mesh*, formada por pequenos filamentos unidos – nas propriedades de resistência e deformabilidade de um solo residual artificialmente cimentado sob condições de carregamento estático e dinâmico. O autor concluiu que: (1) ambas as fibras aumentaram a ductilidade e tenacidade do compósito; (2) as fibras extensíveis, em forma de filamentos, foram mais efetivas na melhoria das características de pós ruptura do compósito, aumentando de forma expressiva a tenacidade, ductilidade e a vida de fadiga; (3) as fibras de caráter inextensíveis, do tipo fibriladas, foram mais efetivas na redução da deformabilidade e no aumento da resistência de pico; (4) As fibras de maior comprimento foram mais efetivas como reforço. Estruturas de pavimento semi-rígidos foram dimensionadas, onde foi observado uma significativa redução na espessura da camada cimentada, quando se utilizaram reforços fibrosos em forma de filamentos.

Feuerharmel (2000) estudou o comportamento da inserção de fibras de polipropileno, no teor de 0,5% e dois comprimentos diferentes (12 e 36 mm), e cimento, no teor de 7% em relação ao peso seco do material, em três diferentes solos (uma argila, uma areia siltosa e uma areia), através de ensaios triaxiais drenados e ensaios de condutividade hidráulica (estes restritos às argilas). O autor concluiu que: (1) a adição de fibras de polipropileno provoca queda do módulo inicial do solo, isto porque a presença de fibras provoca mudanças na estrutura dos solos. Para as misturas não cimentadas, os solos menos rígidos, argila e areia

siltosa, foram os mais afetados, enquanto que a areia quase não sofreu alteração. Nas misturas cimentadas, as reduções foram bastantes acentuadas para os três solos, sendo as mais expressivas na argila e na areia siltosa; (2) quanto à resistência ao cisalhamento, o comportamento resistente dos solos não cimentados reforçados com fibra pode ser dividido em três etapas: uma etapa inicial, onde o comportamento é controlado basicamente pela matriz de solo; uma etapa intermediária, onde o comportamento do compósito é controlado conjuntamente pela matriz de solo e pelas fibras; e uma etapa final, onde o comportamento do material é comandado apenas pelas fibras; (3) o acréscimo de resistência devido a inserção de fibras de polipropileno em solo não cimentados foi mais expressivo em solos mais granulares; (4) os efeitos observados na variação volumétrica dos solos podem ser bastante distintos e dependem fundamentalmente da forma como ocorre o colapso da matriz e como se distribuem as deformações provocadas pelo cisalhamento na amostra.

Casagrande (2001) e Casagrande e Consoli (2002) observaram o efeito da inserção de fibras de polipropileno distribuídas aleatoriamente em uma areia siltosa, através da realização de ensaios triaxiais adensados drenados. Os resultados mostraram um crescimento constante da resistência com o aumento da deformação axial, caracterizando um comportamento elasto-plástico de enrijecimento. Os autores observaram que as fibras passaram a concluir de forma mais significativa no acréscimo da resistência a partir de 2,5% de deformação axial.

Heineck (2002) analisou o comportamento hidráulico e mecânico de novos materiais geotécnicos compósitos, tentando adequar suas características à utilização em barreiras horizontais impermeáveis. Foram misturadas bentonita e fibras de polipropileno com 24 mm de comprimento em amostras compactadas de solo, cinza, areia e caulim. Uma das muitas conclusões foi que a adição de fibras aumenta os parâmetros de resistência ao cisalhamento ( $c$  e  $\phi$ ) e a resistência ao cisalhamento de pós pico dos materiais compósitos, principalmente a baixas tensões efetivas médias iniciais e após grandes deformações.

Prabakar e Sridhar (2002) utilizaram fibras de sisal com quatro diferentes teores de fibra, 0,25%, 0,5%, 0,75% e 1% em relação ao peso seco do solo, e quatro diferentes comprimentos, 10 mm, 15 mm, 20 mm e 25 mm. Foi estudado o comportamento de um solo reforçado com fibras de sisal dispostas aleatoriamente

no solo. As amostras do compósito foram submetidas a ensaios de compactação e ensaios de compressão triaxial. Os resultados mostraram um significativo melhoramento na tensão desviadora de ruptura e parâmetros de resistência ao cisalhamento ( $c$  e  $\phi$ ) do solo estudado.

Vendruscolo (2003) estudou as propriedades de resistência e deformabilidade de um solo arenoso cimentado e não cimentado reforçado com fibras através de ensaios triaxiais e ensaios de placa. O autor concluiu que o efeito da inclusão de fibras é mais evidente nos maiores comprimentos e teores de fibra, sendo seu efeito mais notável em materiais compósitos de maior densidade. O autor também concluiu que o diâmetro das fibras e a distribuição granulométrica do solo influenciam na resistência de pico do compósito.

Consoli *et al* (2004) avaliou o comportamento de uma areia cimentada e não cimentada reforçada com diversas fibras. Foi observado que a inclusão de fibras de polipropileno de maior comprimento (36 mm) reduziu drasticamente a propagação de fissuras na areia cimentada, mudando a ruptura de frágil para dúctil e aumentando a capacidade de energia absorvida, o que não foi observado para as outras fibras estudadas.

Santos (2004) avaliou o comportamento de uma areia misturada com fibras de diferentes comprimentos sobre a trajetória de tensões  $K_0$ . O autor concluiu que (1) a inclusão de fibras é mais significativa com o aumento das tensões e que a variação do comprimento das fibras tem efeito sobre a trajetória de tensões, sendo maior a influência quanto maior o comprimento; (2) a tensão lateral diminui com a inclusão de fibras, sendo esta redução cada vez mais aparente com o aumento das tensões verticais e proporcional ao comprimentos das fibras; (3) a inserção de fibras ocasionou na modificação do comportamento tensão deformação, principalmente nas tensões iniciais; (4) os valores de  $K_0$  diminuem com a presença das fibras e com o aumento do comprimento destas, para todos os níveis de tensão, mantendo-se praticamente constante no carregamento e crescentes no descarregamento.

Ravishankar e Raghavan (2004) relataram que para um solo laterítico reforçado com fibras de coco o peso específico seco máximo diminuiu com a adição de fibras, porém a umidade ótima do solo aumentou com o aumento do teor de fibras de coco adicionadas ao solo. Os autores também observaram que a porcentagem de absorção de água também aumentou com o aumento do teor de

fibras de coco. A resistência à tração também aumenta quando a quantidade de coco cresce em um solo reforçado na umidade ótima. Para ambos os solos, com e sem reforço, a resistência à tração na umidade ótima foi consideravelmente menor do que a obtida para as amostras secas em estufa.

Casagrande (2005) avaliou o comportamento de solo reforçados com fibras de polipropileno submetidos a grandes deformações, com características adequadas para o emprego em liners de cobertura de aterros sanitários e aterros sobre solos moles. Foram realizados ensaios triaxiais consolidados drenados com diferentes trajetórias de tensões e aplicações de altas tensões em amostras de areia e areia-fibra. Também foram executados ensaios do tipo *ring shear* nas matrizes de areia e bentonita, com e sem reforço, e ensaios de carga em placa sobre espessas camadas de areia compactada, reforçada ou não com fibras. O autor constatou que a adição de fibras de polipropileno ao solo aumenta os parâmetros de resistência ao cisalhamento de pico e também a resistência pós pico das matrizes estudadas após grandes deslocamentos horizontais sem quedas significativas de resistência pós pico no caso da matriz arenosa. Para a matriz de alta plasticidade e altos índices de vazios, o acréscimo de resistência tende a se reduzir com o aumento das deformações cisalhantes. A inclusão de fibras causou um efeito mais visível em baixas tensões efetivas médias iniciais, menores diâmetros, maiores comprimentos e maiores teores de fibras, sendo este efeito mais evidente em misturas mais densas. O comportamento carga-recalque do solo arenoso foi significativamente influenciado pela adição de fibras, causando um aumento na sua capacidade de suporte e alterando os mecanismos de ruptura

Leocádio (2005) avaliou através de ensaios de laboratório o efeito da adição de fibras de sisal em um solo laterítico, visando estabelecer o comportamento mecânico do material. Os ensaios realizados foram Proctor Normal, CBR e ensaio de cisalhamento direto. As fibras de sisal foram distribuídas aleatoriamente na massa de solo, sendo utilizados dois diferentes teores de fibra, 0,25% e 1% em relação ao peso seco do solo, e dois diferentes comprimentos, 10 mm e 25 mm. O autor observou que a adição de fibras de sisal melhorou as propriedades mecânicas do solo laterítico, principalmente a resistência de pico, que ao comparar com o solo puro, teve um grande melhoramento para todos os níveis de tensão normal.

Tang *et al* (2006) estudou os efeitos de fibras curtas de polipropileno na resistência e comportamento mecânico de uma argila cimentada e não cimentada. Para a pesquisa, os autores prepararam 12 grupos de amostras com três diferentes porcentagens de fibra (0,05%, 0,15% e 0,25% em relação ao peso do solo) e duas diferentes porcentagens de cimento (5% e 8% em relação ao peso do solo). Após um tempo de cura de 7, 14 e 28 dias, foram realizados ensaios de compressão simples e cisalhamento direto. Os resultados indicam que a inclusão de fibras de polipropileno como reforço, tanto no solo cimentado quanto no não cimentado, causaram um acréscimo na tensão não confinada, na resistência ao cisalhamento na ruptura e na deformação axial na ruptura. Também se deduziu que as fibras reduziram a rigidez do material e ocorreu uma diminuição na perda de resistência ao cisalhamento pós pico, além de modificar o tipo de ruptura do solo cimentado, tornando-o mais dúctil.

Festugato (2008) avaliou o comportamento mecânico de uma areia fina microrreforçada com fibras de polipropileno. Foram executados ensaios triaxiais com medidas internas de deformações em amostras de 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura. O autor concluiu que os microrreforços proporcionam ao solo um comportamento de endurecimento (*hardening*), sendo este comportamento mais visível a partir de um dado teor de fibras. Também concluiu que as fibras conseguem que a região de estados limite do material seja aumentada com a adição dos microrreforços.

Curcio (2008) estudou o comportamento mecânico e hidromecânico de amostras de solo compactado reforçado com fibras de PET reciclado. Observou-se que o comportamento do compósito em relação à resistência à tração parece ser controlado, inicialmente, unicamente pela matriz de solo. Com o aumento das deformações, o comportamento do material passa a ser controlado tanto pela matriz quanto pelas fibras. A adição de 1% de fibras de PET, favorece o acréscimo da tensão de tração máxima do solo, retarda a abertura de fissuras e reduz a magnitude destas, sem alterar as propriedades desejáveis na compactação e sem influenciar, negativamente, a condutividade hidráulica do solo.

Girardello (2010) estudou o comportamento mecânico de uma areia não saturada, com e sem reforço de fibras de polipropileno, através da realização de ensaios de placa em densidade relativa de 50% e 90%, ensaios triaxiais e ensaios de sucção. Nos ensaios de sucção, a inclusão de fibras não ofereceu nenhuma

influência na magnitude da resistência apresentada devido à sucção. Para os ensaios de placa, a densidade relativa de 90% apresentou um melhor resultado, mas para ambas as densidades, a inclusão aleatória de fibras melhorou o comportamento carga-recalque do material, influenciando também os mecanismos de ruptura. Inicialmente, o comportamento carga-recalque não difere entre o solo não reforçado e o compósito. Esta diferença começa a ser perceptível a partir do momento em que as fibras passam a serem mobilizadas e se tornam mais efetivas como reforço, após certo nível de recalque e de carga aplicada.

Lirer *et al* (2012) avaliou o comportamento de uma areia com pedregulho misturada com fibras de polipropileno. Concluíram que a adição de fibra ao solo confere uma maior influência para baixas tensões confinantes. Para grandes deformações, o comportamento resistente do solo e do compósito são similares, ou seja, a grandes deformações, a adição de fibras em areia com pedregulho não contribui de maneira efetiva à resistência do material.

Palacios (2012) estudou o comportamento de um solo reforçado com fibras de polipropileno no teor de 0,5% em relação ao peso seco do solo submetido a ensaios triaxiais de extensão. O autor concluiu através dos ensaios de extensão que a adição de fibras de polipropileno ao solo não aumenta a resistência à tração do material ainda gera uma queda na resistência. Foi realizada a medição das fibras após os ensaios de extensão e observou-se que as fibras se alongaram, mas não foi possível observar a ruptura em nenhuma delas. Para maiores tensões de confinamento a alongação das fibras aumentaram consideravelmente.

Bolanõs (2013) estudou o comportamento mecânico de um solo argiloso reforçado com fibras de coco verde através de ensaios triaxiais isotropicamente drenados. Os ensaios foram realizados em amostras com teores de fibra moída de 0,5% e 1% e teores de fibra cortada de 0,5%, 0,75%, 1%, 1,25% e 1,5% em relação ao peso seco do solo. O autor observou um aumento na resistência ao cisalhamento dos compósitos solo-fibra, uma vez que se observa um discreto aumento do ângulo de atrito e um expressivo aumento do intercepto coesivo, comparado com os resultados do solo puro.

Tamayo (2015) estudou o comportamento de um solo arenoso reforçado com fibras de coco nos teores de 0,25%, 0,5% e 0,75% em relação ao peso seco do solo e comprimentos de 25 mm e 50 mm através da realização de ensaios triaxiais isotropicamente drenados. O autor observou um incremento na

resistência ao cisalhamento de todas das misturas solo-fibra, observando-se um expressivo aumento no intercepto coesivo das misturas e um discreto aumento do ângulo de atrito, em comparação aos resultados obtidos para a areia pura.

### 2.3 Ensaio de Prova de Carga em Placa

Ensaio de prova de carga em placa em modelo físico reduzido são boas opções para analisar as possíveis condições *in situ* de um solo, em escala reduzida, com aplicação de diferentes estágios de carregamento, permitindo determinar o comportamento e as propriedades de deformação e de ruptura de um solo sob diferentes condições. Segundo Pells (1983), ensaios de placa podem ser classificados de acordo com o material, conforme a forma de execução do ensaio, a localização da placa e o tipo de placa (rígida ou flexível). Os deslocamentos podem ser medidos no centro da placa ou com transdutores de deslocamento em qualquer ponto sobre a placa ou em pontos sobre o solo ao redor da placa.

De acordo com Terzaghi e Peck (1967), o bulbo de pressões gerado no ensaio de carga em placa, geralmente, é representativo das características do solo até dois diâmetros abaixo da placa. Assim sendo, os resultados do ensaio de placa não podem ser extrapolados para elementos estruturais de maiores diâmetros, porque a distribuição de esforços é diferente nas camadas do solo, sobretudo quando este possuiu uma variação entre camadas.

Marsland e Eason (1973) analisaram a argila de Londres através de provas de carga *in situ* e chegaram a conclusão de que, para uma relação entre o diâmetro do buraco e o da placa de 1,5 a 2,0, a capacidade de carga era igual à conseguida na superfície.

Mitchell e Katti (1981) explicam que o aumento no uso de ensaios de placa em campo, ocorre especialmente por ser realizado de maneira mais ágil e por ter uma melhor capacidade em determinar as propriedades de um solo, que ao ser retirado do seu estado natural, perderia a qualidade.

Minkiv *et al* (1981) realizaram ensaios de placa de área de contato circular e quadrada, variando de 0,04 m<sup>2</sup> a 4,0 m<sup>2</sup> em um solo argiloso e em um solo siltoso, estabilizados com cimento. Utilizou-se células de pressão para medir as tensões abaixo das placas. Os autores concluíram que a camada estabilizada redistribuía as tensões e acrescentava capacidade de suporte. Para uma camada cimentada de 1,5

m de espessura, os recalques medidos foram reduzidos cerca de 3 a 6 vezes. Para uma camada cimentada de 2 m de espessura, houve uma diminuição dos recalques de 5 a 11 vezes.

Mellios (1985) realizou ensaios de carga em placa circular de 0,80 m de diâmetro em um solo poroso. O autor observou que, para o estado de baixa compactação do solo, o carregamento parece mais um processo de adensamento do solo do que uma ruptura por cisalhamento de superfícies geometricamente definidas. Como o comportamento foi bastante similar ao do ensaio de adensamento, analogamente, considerou-se tal ensaio como tensão de ruptura à tensão de pré adensamento.

Robertson (1986) afirma que o ensaio de carga em placa possui algumas limitações, como, por exemplo, a trajetória de tensões que não pode ser controlada durante a execução do ensaio, sendo diferente daquela do problema real. As condições de drenagem não podem ser controladas independentemente e não se considera as possíveis futuras modificações das condições do solo.

Cudmani (1994) realizou ensaios de placa com diferentes diâmetros em um solo natural a diferentes profundidades. De acordo com os resultados encontrados, a dispersão dos resultados foi inversamente proporcional ao diâmetro da placa. A dispersão foi produzida pela heterogeneidade do solo e pelo amolgamento do solo durante a preparação das amostras para o ensaio. Também foi comprovado o efeito da profundidade, ou seja, a mesma placa para uma mesma carga apresentou menores recalques para maiores profundidades. As curvas carga-recalque obtidas através dos ensaios de placa não apresentaram uma carga de ruptura definida, comportamento característico de rupturas por puncionamento. Os autores observaram também que a tensão de fluência causada devido aos ensaios de placa coincide com a tensão de pré adensamento, medida no ensaio de compressão confinada e que a relação carga-recalque é praticamente linear até atingir esta tensão de fluência. Também se mostrou adequada a previsão de recalques do solo estudado por meio de procedimentos empíricos, embasados em resultados de provas de carga.

Vendruscolo (1996) realizou ensaios de placa de 0,30 m de diâmetro em camadas de solo residual compactado e de solo tratado com cimento no teor de 5%, ambas camadas com 0,60 m de espessura. Os resultados obtidos comprovaram que existe um aumento expressivo da capacidade de suporte do

solo, além de uma redução significativa dos recalques, quando comparadas ao comportamento carga-recalque do solo puro.

Consoli *et al* (1997) apontaram a eficiência do método dos elementos finitos na previsão do comportamento carga-recalque de fundações superficiais, assentes em camadas superficiais de solo compactado.

Sales (1998) observou através de ensaios de placa, a influência de diferentes camadas estabilizadas com espessuras distintas no comportamento carga-recalque. De acordo com o autor, pode ser feita uma normalização dos ensaios de placa quando os resultados são plotados na forma tensão-recalque relativo para uma mesma relação entre espessura da camada tratada e o tamanho da placa.

Tessari (1998) realizou ensaios de placa sobre cinza pesada de carvão misturada com 5% de cimento em camadas compactadas de 0,15 e 0,30m de espessura. Os carregamentos foram aplicados em placas de 0,30, 0,60 e 0,90m de diâmetro, sendo comparados com resultados de ensaios de placa sem a camada de cinza pesada-cimento. O autor observou que a camada compactada da mistura apresentou um menor recalque e uma maior capacidade de suporte quando comparada com a camada não compactada de solo natural. Quanto maior a relação entre a espessura da camada tratada e o diâmetro da placa ( $H/D$ ), maiores serão as diferenças de recalque e de capacidade de suporte. A ruptura se deu por puncionamento, comprovado pela leitura dos recalques nas bordas da placa e pela formação de trincas ao redor da placa.

Consoli *et al* (1998) estudaram a influência da espessura de camadas de solo reforçado com cimento e o efeito do tamanho de um elemento de fundação no comportamento carga-recalque. Foram utilizados dados de ensaios de placa circular com 0,30 e 0,60m de diâmetro, assentes sobre camadas de solo-cimento de diferentes espessuras, com relação espessura da camada tratada/diâmetro da placa ( $H/D$ ) de 0, 0,5, 1,0 e 2,0. Para todos os ensaios realizados, foi encontrado um mecanismo de ruptura por puncionamento. Os autores concluíram que o efeito do diâmetro da área carregada ( $D$ ) e da espessura da camada tratada superficial ( $H$ ) no espaço que relaciona tensão normalizada versus recalque relativo – razão entre o recalque e o diâmetro da placa –, é desprezível para as relações  $H/D$  avaliadas. Foi proposto um método numérico de interpretação, baseado no processo de ajuste da curva experimental obtida em ensaios de placa, encontrando-se valores representativos do módulo de elasticidade e dos

parâmetros de resistência da camada de solo-cimento, sendo possível estimar o comportamento de elementos de fundação de distintos diâmetros sobre camadas melhoradas de diversas espessuras.

Thomé (1999) analisou o comportamento de fundações superficiais apoiadas em sistema de dupla camada, quando a camada superior é cimentada. Foram construídos aterros experimentais, utilizando misturas de cinza pesada e cal de carbureto na estabilização de um solo residual de arenito. Ensaio de carga em placa foram executados sobre estes aterros. Foi observado que o comportamento de fundações superficiais sobre solos cimentados é controlado pela relação de espessura da camada cimentada e do diâmetro da fundação. O ângulo de atrito e o módulo de elasticidade da camada cimentada não influenciaram os resultados do ensaio de placa.

Casagrande (2001) estudou através da realização de ensaios de placa a influência da adição aleatória de fibras de polipropileno em uma camada superficial de um solo areno-siltoso compactado. O autor observou que a camada compactada reforçada com fibras apresentou um comportamento de caráter mais rígido e mais resistente, obtendo um aumento significativo na capacidade de suporte, além de uma redução considerável dos recalques, quando comparado ao solo puro. Para Consoli *et al* (2003), as fibras permitem a redistribuição das tensões em uma área mais ampla, o que causa o aumento na capacidade de suporte.

Vendruscolo (2003) avaliou o comportamento carga-recalque de fundações superficiais através da influência de camadas compactadas com 0,30m de espessura, de areia estabilizada com cimento e também do reforço desta mistura areia-cimento com fibras de polipropileno através da realização de ensaios de placa circular com 0,30m de diâmetro. O autor observou um aumento da capacidade de suporte, da resistência e da rigidez da camada areia-cimento. Em relação ao modo de ruptura, foi verificado um comportamento frágil. Após alcançar a resistência de pico, a capacidade de carga caiu praticamente para o mesmo valor da capacidade de carga obtida no ensaio para o solo residual. Com a inclusão de fibras na mistura areia-cimento, a capacidade de carga máxima manteve-se praticamente inalterada, mas notou-se um comportamento pós pico evidentemente mais dúctil. Em relação ao mecanismo de ruptura, no ensaio da mistura areia-cimento, observou-se fissuras de tração verticais, que se propagaram da base para o topo da camada, especialmente na borda da placa. Com o reforço

de fibras de polipropileno, dispostas de maneira aleatória na massa de solo-cimento, o mecanismo de ruptura mudou totalmente, onde a ruptura ocorreu pela formação de faixas espessas de cisalhamento ao redor da borda da placa – *shear bands* –, o que permitiu que as tensões se espalhassem por uma área maior na interface da camada subjacente.

Casagrande (2005) realizou ensaios de carga em placa para avaliar a contribuição de fibras de polipropileno na mobilização da resistência para diferentes níveis de densidade de compactação. Os resultados obtidos demonstram que as camadas compactadas com maior densidade apresentaram características de um mecanismo de ruptura generalizada. Para menores densidades, foram observadas características de ruptura localizada, com um levantamento expressivo do solo ao redor da placa após grandes deslocamentos e superfícies de deslizamento em forma de cunha, que se iniciaram junto às bordas da placa. Com a inserção das fibras de polipropileno, foi observado uma melhora efetiva na resposta do solo e a variação da densidade relativa das camadas teve um forte efeito sobre a resistência do compósito solo-fibra, onde se tinha um maior ganho de resistência para maiores valores de densidade da mistura. Segundo o autor, as fibras inibem a propagação das fissuras, distribuindo as tensões por uma área maior. Assim, o acréscimo de resistência devido a adição de fibras no solo se deve à inibição da formação e da propagação de possíveis bandas de cisalhamento.

Donato (2007) através da realização de ensaios de carga em placa circular, com medidas diretas de tensão, avaliou a distribuição de tensões de um solo arenoso reforçado com fibras de polipropileno. O método dos elementos finitos também foi utilizado, com o intuito de simular, numericamente, a distribuição de tensões dentro de câmaras de calibração. Nos ensaios de placa, observou-se que o comportamento carga-recalque da areia e dos compósitos é similar no início do carregamento até o momento em que as fibras começam a serem mobilizadas e se tornam mais efetivas a partir de determinado nível de recalque e carga aplicada. O comportamento do solo foi influenciado pela adição de fibras, aumentando a capacidade de suporte e alterando os mecanismos de ruptura. A inclusão do reforço fibroso provoca uma mudança na distribuição de tensões.

Consoli *et al* (2009) determinou através de ensaios de placa que a inclusão de fibras na areia causa uma mudança considerável no comportamento carga-recalque. As fibras fornecem ao compósito uma rigidez e resistência muito

superior quando comparadas as areias sem reforço. O mecanismo de ruptura também é alterado com a adição de fibras. Para todas as densidades relativas utilizadas, a interação entre os grãos de areia e as fibras dependeu da densidade relativa do material. Na areia não reforçada, fora da área da placa surgem fissuras radiais. Estas não são aparentes quando se reforça o solo com fibras, independente da densidade relativa. Os autores também afirmam que para maiores densidades, o efeito da inclusão de fibras é mais visível. Para todas as densidades relativas estudadas, o compósito areia-fibra apresentou maior rigidez global e maior capacidade de carga. No entanto, o valor do recalque antes do início do ensaio para a areia não reforçada e reforçada com fibra começa a divergir, dependendo da densidade relativa, sendo 50mm para DR=30%, 30mm para DR=50% e aproximadamente zero para DR=90%. O efeito da inserção de fibras na capacidade de carga e na rigidez e a sensibilidade dos efeitos da densidade relativa parecem corroborar com a idéia de que a fibra possui o efeito que tende a suprimir a expansão.

A areia reforçada com fibra revela a capacidade de conservar a resistência – ou até mesmo continuar a aumentar a resistência – à deformação permanente, sugerindo um material muito dúctil. Assim, este material pode ser potencialmente utilizado em outros trabalhos de solo, como terraplenagem, parte da cobertura de *liners* de aterros de resíduos sólidos urbanos, que sofrem enorme diferencial de recalque, bem como em taludes mais suaves de solos orgânicos que sofrem com a excessiva deformação devido à consolidação. Em ambos os casos, este novo geomaterial poderá sofrer grandes deslocamentos diferenciais sem abrir fissuras ou deterioração (Consoli *et al*, 2009).

Girardello (2010) realizou ensaios de placa em uma areia com e sem reforço de fibras sintéticas, visando analisar a contribuição das fibras de polipropileno no mecanismo de ruptura. Foram utilizadas densidades relativas de 50% e 90% para a areia. Após a realização dos ensaios, para cada um destes, foi feita a exumação das camadas para analisar o mecanismo de ruptura obtido. Para a areia sem reforço, observou-se uma ruptura localizada, com fissuras perpendiculares que se iniciavam nas bordas da placa. Para a areia reforçada com fibras de polipropileno, as fissuras foram paralelas à borda da placa, devido justamente à distribuição de tensões causada pela adição de fibras. Este mecanismo também foi observado por Donato (2007).

Sotomayor (2014) avaliou a influência da inserção de fibras de coco como reforço de um solo arenoso através da realização de ensaios de placa circular, em verdadeira grandeza, com 0,30m de diâmetro, visando avaliar o comportamento carga-recalque para o solo puro e misturas solo-fibra. As fibras foram dispostas de maneira aleatória na massa de solo e também como manta. O autor observou, através das curvas carga-recalque, que o reforço de fibras de coco de maneira aleatória obteve uma menor redução dos recalques, mas uma melhor inibição da propagação de fissuras. Para o reforço em manta, obteve-se uma maior diminuição do recalque, uma melhor distribuição das tensões, mas com um maior fissuramento superficial. Ambos os resultados, quando comparados ao solo sem reforço, apresentaram uma maior resistência e redução do recalque.

## **2.4 Polietileno Tereftalato (PET)**

### **2.4.1 Aspectos Gerais do PET**

O Polietileno Tereftalato ou PET, como normalmente é conhecido, é um polímero termoplástico, derivado do poliéster. O que difere um polímero termoplástico é que este ao ser aquecido se deforma, se tornando ainda mais fluido com aplicação adicional de calor, podendo ser moldados e solidificados novamente, mantendo a sua estrutura original. Devido a isto, podem ser reciclados diversas vezes sem perder suas propriedades físicas.

Existe outro tipo de polímero, o termofixo, que diferentemente do termoplástico, não alteram a sua rigidez com o aumento da temperatura. Possui em sua estrutura ligações cruzadas de polímeros, diferentemente dos termoplásticos que são ligados por ramificações. Estas ligações cruzadas impedem os termofixos de serem remodelados, sendo assim polímeros não reciclados.

A Figura 2-3 apresenta a diferença na estrutura dos dois polímeros, mostrando as diferentes ligações de cada um.

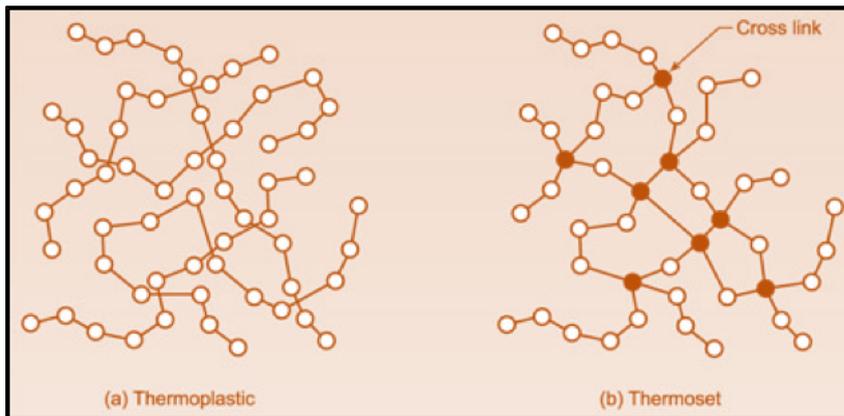


Figura 2-3: Ligações químicas dos polímeros: a) termoplásticos; e b) termofixos.

O primeiro aparecimento do PET ocorreu em 1941, descoberto por dois químicos Britânicos, Whinfield e Dickson, através da reação entre dois monômeros, o ácido tereftálico e o etilenoglicol. O primeiro monômero é um sólido incolor com ponto de fusão próximo aos 140 °C e o segundo é um álcool, líquido em temperatura ambiente com ponto de ebulição de 197 °C (Mano e Mendes, 2001).

Após a Segunda Guerra Mundial, diversas pesquisas sobre o estudo do poliéster para aplicações na indústria têxtil foram impulsionadas pela empresa *DuPont*. Após esse período e devido aos avanços tecnológicos, o uso do PET aumentou consideravelmente, sendo largamente aplicado. Na década de 70, as primeiras garrafas PET começaram a ser criadas nos Estados Unidos e na Europa, mas somente após uma rigorosa análise sobre sua segurança e sobre seu potencial poluidor. O PET chegou no Brasil em 1988 com utilização na indústria têxtil. Apenas nos anos 90 que o PET começou a ser utilizado no mercado de embalagens, principalmente nas de bebidas gaseificadas.

As garrafas PETs revolucionaram o mercado de embalagens pois solucionaram o problema que ocorria no transporte das garrafas de vidro. Isto porque a garrafa PET é uma embalagem com excelentes propriedades mecânicas, transparentes, à prova de água e leve.

A processo industrial para síntese do PET normalmente é dividido em três métodos: (i) pré polimerização; (ii) policondensação; e (iii) polimerização no estado sólido. Nestas etapas, é importante o controle das principais variáveis do processo, pois é de fundamental importância para determinar a estrutura do polímero e as propriedades e usos finais da resina (Soares Júnior, 2010).

A Tabela 2-2 apresenta os dados da resina do PET (Mano e Mendes, 2001).

Tabela 2-2: Dados da resina PET (Mano e Mendes, 2001).

<b>Monômeros</b>	Tereftalato de Dimetila (sólido)
	Etilenoglicol (líquido)
<b>Ponto de fusão</b>	140 °C
<b>Ponto de ebulição</b>	197 °C
<b>Polímero</b>	-(OOC-C <sub>6</sub> H <sub>4</sub> -COO-CH <sub>2</sub> CH <sub>2</sub> ) <sub>n</sub> – Politereftalato de Etileno.
<b>Propriedades</b>	Peso molecular: 40000u.ma
	Densidade: 1,33-1,45 g/cm <sup>3</sup>
	Cristalinidade variável
	Material termoplástico, elevada resistência mecânica, química e térmica
<b>Aplicações</b>	Baixa permeabilidade de gases
	Embalagens de alimentos, produtos farmacêuticos e cosméticos
	Fibras na indústria têxtil
	Indústria eletrônica
	Raio X, fitas magnéticas
<b>Nomes Comerciais</b>	Outros
	Dacron, Mylar, Techster, Terphane, Bidim
<b>No Brasil</b>	Rhodia-Ster (MG), Fibra (SP), Hoechst (SP), Dupont (SP)

Atualmente, devido à excelente relação entre as propriedades mecânicas, térmicas e o custo de produção, o PET é um dos termoplásticos mais produzidos no mundo, com produção mundial no final da década de 90 em torno de  $2,4 \times 10^{10}$  kg. No Brasil, a sua principal aplicação se dá na indústria de embalagens (71%) (Romão *et al*, 2009).

#### 2.4.2 Reciclagem e Impacto Ambiental do PET

Segundo (Romão *et al*, 2009), a partir do ano de 2005, os polímeros começaram a ter uma certa importância na composição dos resíduos sólidos urbanos (RSU), passando a contribuir com 20% do seu total (porcentagem em massa). Além do PET, diversos outros polímeros são encontrados no RSU, como o polietileno de alta, baixa densidade e baixa densidade linear, o polipropileno, o policloreto vinila, conhecido como PVC, e o poliestireno.

A Figura 2-4 apresenta os principais polímeros produzidos no Brasil em 2005. Observa-se que a produção total de PET corresponde a 9,1% dos polímeros produzidos no Brasil. No entanto, a fração de PET gerado no RSU, correspondente aos polímeros, é em média de 20% (Figura 2-5). Isto ocorre porque polímeros como o PVC e o polipropileno são utilizados na fabricação de produtos de longa vida útil, enquanto que o PET é utilizado em produtos de vida útil curta, como as embalagens.

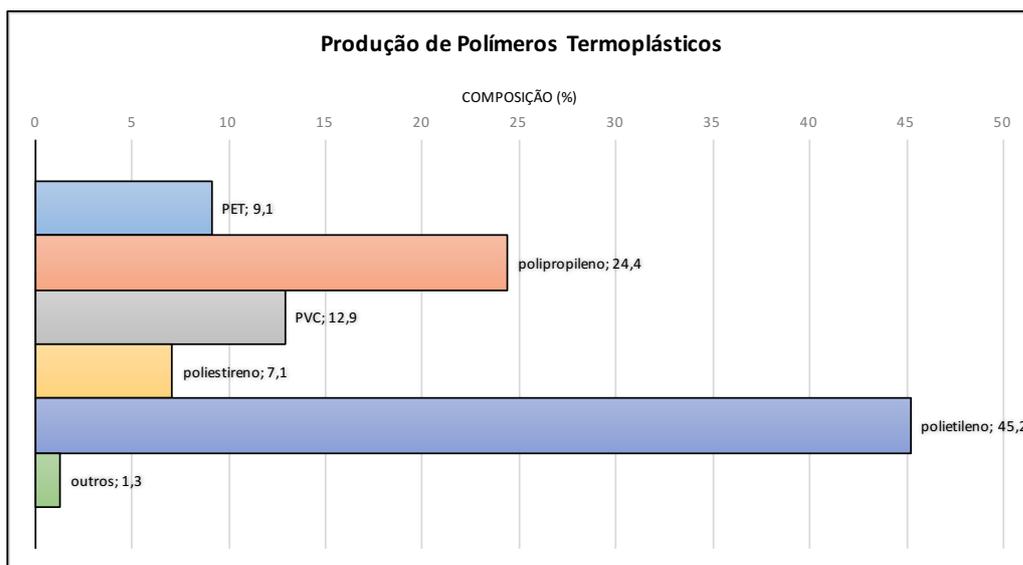


Figura 2-4: Produção dos principais polímeros termoplásticos no Brasil em 2005 (Romão et al, 2009).

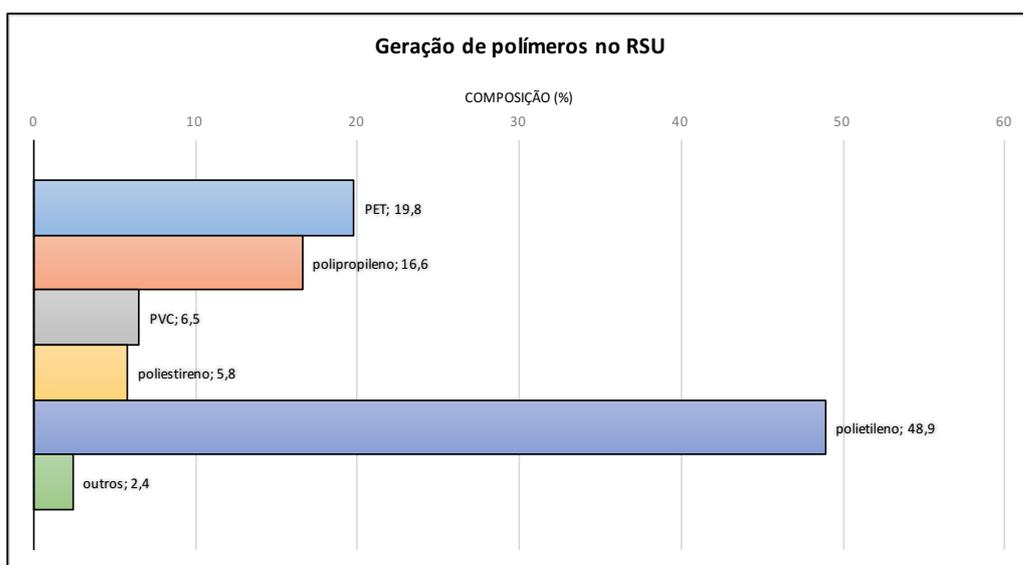


Figura 2-5: Geração no RSU dos principais polímeros termoplásticos no Brasil em 2005 (Romão et al, 2009).

Segundo Romão *et al* (2009) e Spinacé e De Paoli (2005), a reciclagem dos polímeros é dividida em quatro categorias: primária e secundária, conhecidas como reciclagem mecânica, sendo que na primária são utilizados polímeros pré consumo e na secundária, polímeros pós-consumo; terciária, também chamada de reciclagem química; e quaternária, chamada de reciclagem energética.

A principal categoria de reciclagem do Brasil é a reciclagem mecânica, devido a diversos fatores: possui uma mão-de-obra mais barata, tem um baixo investimento para instalação de uma planta de reciclagem e o país tem um grande volume de polímero pós-consumo, diferentemente de países da Europa e Japão, que utilizam as reciclagens químicas e energéticas Spinacé e De Paoli (2005).

Segundo a ABIPET, o volume de PET consumido no ano de 2011 foi de 572.000 toneladas, sendo que 294.000 toneladas deste total foram recicladas, sendo que ao final do ano de 2016, ano de Jogos Olímpicos, espera-se um consumo total de 840.000 toneladas (Figura 2-6). No entanto, é possível perceber através da figura que uma grande porção do PET consumido ainda não é reciclado, permanecendo em aterros sanitários e até mesmo em lixões. Atualmente, o PET é o segundo maior produto reciclado no Brasil, atrás apenas do alumínio.

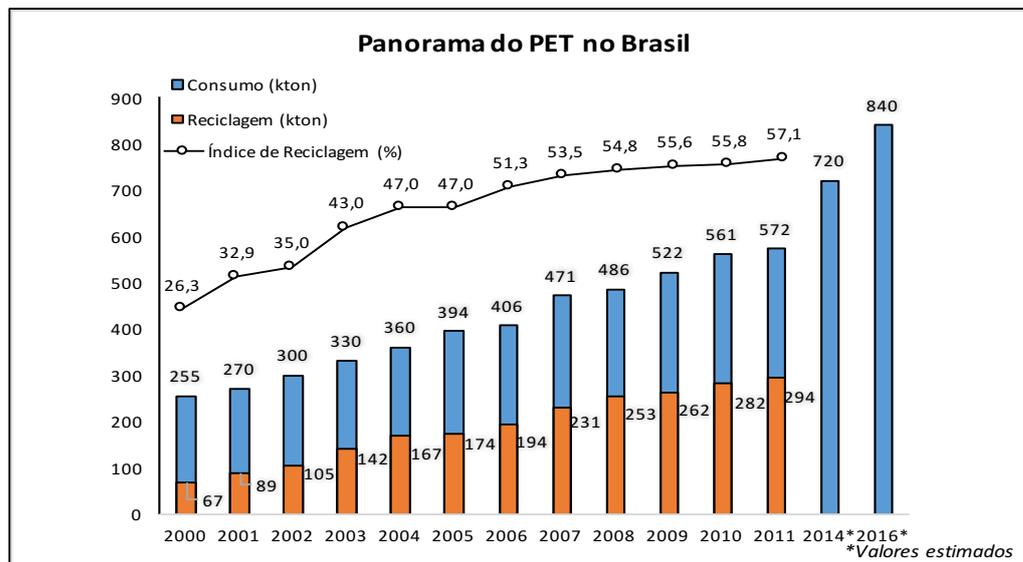


Figura 2-6: Panorama do PET no Brasil (ABIPET, 2013).

Do ponto de vista ambiental, o PET e outros polímeros, são considerados grandes vilões ambientais, principalmente pelo fato de possuírem um longo tempo

de degradação. Outro motivo que os torna um passivo ambiental é a sua disposição final que ocorre muitas vezes de maneira ilegal, sendo dispostos em lixões, rios, mares, encostas e etc. O principal meio de tentar reduzir este problema é justamente através da reciclagem, mas para que se tenha um controle adequado do processo, é necessário a definição do mesmo através de legislações. No Brasil, o PET pós consumo é considerado resíduo sólido e sua disposição final e reciclagem são regidas pela lei nº 12.305, de agosto de 2010, conhecida como Política Nacional de Resíduos Sólidos.

De acordo com a portaria nº 987 de 1998 da Secretaria de Vigilância Sanitária do Ministério da Saúde, a utilização de PET reciclado possui suas limitações, porque poderiam estar previamente contaminados, assim não podendo ser reutilizados em embalagens que entrem em contato com o produto, como bebidas, remédios, alimentos e diversos outros. O PET reciclado é utilizado então como fibra têxtil (41%), mantas de não tecido (16%), cordas (15%), resinas insaturadas (10%), embalagens (9%), cerdas de vassouras e escovas (5%) e outros produtos (4%) Spinacé e De Paoli (2005) (Figura 2-7).

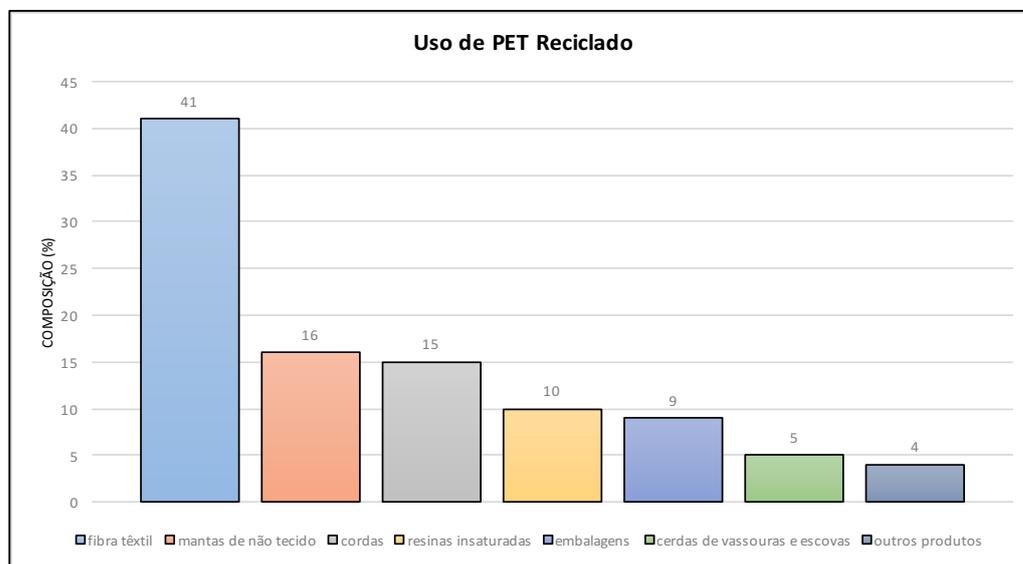


Figura 2-7: Uso final do PET reciclado no Brasil (Spinacé e De Paoli, 2005).

### 2.4.3 Estudos Experimentais com PET

Consoli *et al* (2000) estudou o comportamento mecânico de uma areia cimentada reforçada com resíduo de plástico, calculando os efeitos da inclusão de

fibras de PET distribuídas de maneira aleatória no reforço de solos cimentados artificialmente, formando um compósito solo-cimento-fibra. Foram avaliados os efeitos do teor de fibra, do comportamento da fibra, do teor de cimento e da tensão confinante sobre as propriedades das misturas. Descobriu-se que a inserção de fibras PET aumenta a resistência última e de pico das matrizes de solo com e sem cimento, além de reduzir o comportamento frágil da matriz cimentada. Aparentemente, não alterou a rigidez das misturas estudadas.

Soncim *et al* (2004) sugeriu que o material vindo da reciclagem de resíduo PET poderia ser utilizado como um material alternativo nas obras de reforço de sub-base de pavimentos. A adição de 30% em peso do material, adicionado em um solo considerado inapropriado para utilização em base e sub-base de pavimentos, modificou sua classificação passando a se ter um solo apropriado, segundo a Highway Research Board, instituto de controle e classificação de solos para pavimentação.

Da Silva (2007) estudou o comportamento de solos siltosos reforçados com fibras e observou através de ensaios de CBR que a utilização de fibras PET apresentou uma melhoria na capacidade de suporte do material. Também foi observado que dependendo do teor e do tipo de fibra utilizado, o peso seco aparente do solo compactado pode variar para mais ou para menor. Nas envoltórias de resistência ao cisalhamento, os autores notaram uma tendência, com a adição de fibras, de reduzir a tensão máxima de cisalhamento obtida para baixos níveis de tensão. Entretanto, com o aumento da tensão de confinamento a resistência do compósito solo-fibra tendia a aumentar.

Modro *et al* (2009) avaliou um concreto de cimento Portland contendo resíduo de PET. Os autores observaram que para todos os traços e idades, a resistência mecânica diminuiu com o aumento do volume de PET. Os autores estabeleceram que esta diminuição da resistência à compressão dos traços obtidos com a substituição de agregados minerais por resíduos PET, em relação ao padrão, se relaciona a uma menor interação química entre o polímero, a matriz do cimento e a porosidade residual gerada, mas principalmente devido a menor resistência mecânica intrínseca dos polímeros quando comparados aos agregados minerais, que são mais resistentes mecanicamente. Considerando os resultados obtidos deste estudo, a substituição de agregados minerais por resíduos de PET pode ser aplicada na indústria da Construção Civil, mas apenas em artefatos não

estruturais, ou seja, não limitados por normas específicas. Pelisser *et al* (2012) também estudou a adição de fibras PET em concreto e concluiu que com sua adição, a tensão de flexão e a resistência ao impacto melhoraram, apesar da redução da resistência à compressão.

Meneses (2011) utilizou fibras de PET reciclado com 2mm de largura e 15mm de comprimento, incorporadas ao concreto, visando verificar a resistência mecânica desta mistura em altas temperaturas. Os corpos de prova dos concretos com e sem adição de fibras PET foram ensaiados após exposição às temperaturas: ambiente (30°C), 100°C, 200°C, 300°C, 400°C, 600°C e 900°C. Determinou-se que o concreto perde significativamente resistência mecânica quando exposto a temperaturas maiores que 300°C, mas o uso da fibra PET pode retardar o risco de colapso de estruturas pela formação de uma rede de canais que facilitam a fuga do vapor d'água, reduzindo a poropressão no interior do elemento estrutural.

Silva *et al* (2013) estudou a adição de PET micronizado como agregado de misturas asfálticas. Os ensaios mecânicos foram realizados variando o percentual de PET na faixa de 2,5%, 5,0%, 7,5%, 10% e 12,5% em peso na forma de agregado miúdo e também em uma mistura de referência (sem adição de PET). Os autores determinaram que a inserção de PET como agregado miúdo em percentuais acima de 10% proporciona misturas asfálticas com elevado teor de vazios e baixa resistência mecânica. Entretanto, o incremento de PET nas misturas asfálticas tende a tornar o revestimento menos suscetível a deformações permanentes e conseqüentemente aumenta a vida de fadiga. Concluíram, portanto, que o uso de PET como agregado nas misturas asfálticas devem ser limitadas a um teor máximo de 5,0%, para que seja atendido os valores recomendados das propriedades volumétricas.

Louzada (2015) estudou o comportamento mecânico de três solos diferentes reforçados com PET em pó e triturado. Foram realizados ensaios triaxiais consolidados isotropicamente não drenados, com tensões confinantes de 50 kPa, 150 kPa e 300 kPa, para o solo argiloso com teores de pó de PET de 0, 10, 20 e 30% e de PET triturado de 3,0 e 5,0% por peso de solo seco, e para a areia, tendo as amostras uma densidade relativa de 50% e teor de umidade de 10% e teores de pó de PET de 0, 10 e 20% por peso de solo seco. Para a bentonita, foram realizados ensaios de cisalhamento direto aplicando uma tensão vertical aplicada de 50 kPa e 100 kPa, com teores de pó de PET de 0 e 30% e de PET triturado de

3,0 e 5,0% por peso de solo seco. Conclui-se que o teor de PET e nível de confinamento têm influência sobre o comportamento mecânico final das misturas. Com a utilização de ambos os resíduos, as misturas apresentaram um comportamento satisfatório, aumentando ou mantendo os parâmetros de resistência ao cisalhamento.

Arao (2016) avaliou o comportamento de misturas asfálticas do tipo CBUQ (Concreto Betuminoso Usinado a Quente) adicionadas com garrafas PET trituradas com diâmetro de 10 mm e 2 mm e teores de 0,5% e 1,0%. Substituiu-se o filer convencional (pó de pedra) pelo pó proveniente da moagem das garrafas PET. Foram realizados ensaios mecânicos de estabilidade e fluência Marshall, resistência à tração, módulo de resiliência e de vida de fadiga. O autor concluiu que a adição de PET, tanto em forma de *flake*, como na forma de pó de PET, nas misturas asfálticas foram positivas, principalmente em relação à vida de fadiga. O incremento dos parâmetros de resistência e na vida útil das misturas estudadas foi mais efetivo para o CBUQ com 0,5% de PET triturado com 10 mm de diâmetro e com a substituição de 2,5% do filer por pó de PET.

## **3 Programa Experimental**

### **3.1 Considerações Iniciais**

O programa de ensaios teve como principal objetivo caracterizar e analisar a influência das fibras de polietileno tereftalato (PET) nas propriedades mecânicas de resistência ao cisalhamento e comportamento carga-recalque de um solo arenoso através de ensaios de caracterização, como granulometria, densidade real dos grãos e índice de vazios mínimo e máximo, e ensaios triaxiais consolidados isotropicamente drenados (CID). As amostras utilizadas foram de areia pura e misturas de areia com fibras PET dispostas aleatoriamente, de títulos e comprimentos diferentes. Em sequência foram realizados ensaios de carga em placa e simulação de talude com inclinação de 1:1, em modelo físico reduzido, no compósito que obteve um melhor resultado nos ensaios triaxiais, avaliando o comportamento carga-recalque da areia pura e do compósito solo-fibra, bem como os seus mecanismos de ruptura.

As etapas do programa experimental e a descrição dos materiais e equipamentos utilizados serão descritas neste capítulo, assim como os métodos e execução dos ensaios.

O desenvolvimento deste programa experimental foi realizado no Laboratório de Geotecnia e Meio Ambiente (LGMA), para realização dos ensaios de caracterização e ensaios triaxiais, e no Laboratório de Estruturas e Materiais (LEM) para realização dos ensaios de placa e simulação de talude, ambos situados na Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

## 3.2 Materiais Utilizados

### 3.2.1 Areia

Como a areia é um material inerte e muito utilizado em obras geotécnicas, optou-se por utilizar as fibras PET como reforço de uma areia. As amostras de areia utilizadas neste estudo são procedentes da região Porto das Caixas, localizada no município de Itaboraí, estado do Rio de Janeiro. O material coletado passou pelo processo de caracterização e os resultados serão apresentados posteriormente no próximo capítulo. A Figura 3-1 apresenta a localização do ponto de coleta do solo e a Figura 3-2 uma amostra do mesmo.



Figura 3-1: Localização da areia in situ.



Figura 3-2: Amostra da areia estudada.

### 3.2.2 Fibras

As fibras utilizadas nesta pesquisa são 100% confeccionadas pela indústria têxtil a partir da reciclagem de resíduos constituídos pelo polímero polietileno tereftalato, comumente conhecido como PET. Foram cedidas pela empresa M&G Fibras Brasil Ltda. para a realização desta pesquisa e possuem o nome comercial de Alya Eco. A Figura 3-3 e Figura 3-4 apresenta as fibras PET utilizadas na presente pesquisa.



Figura 3-3: Comparativo entre as duas fibras PET utilizadas no estudo. À esquerda, 3,3 dtex com 56 mm de comprimento; A direita, 1,4 dtex com 38 mm de comprimento.

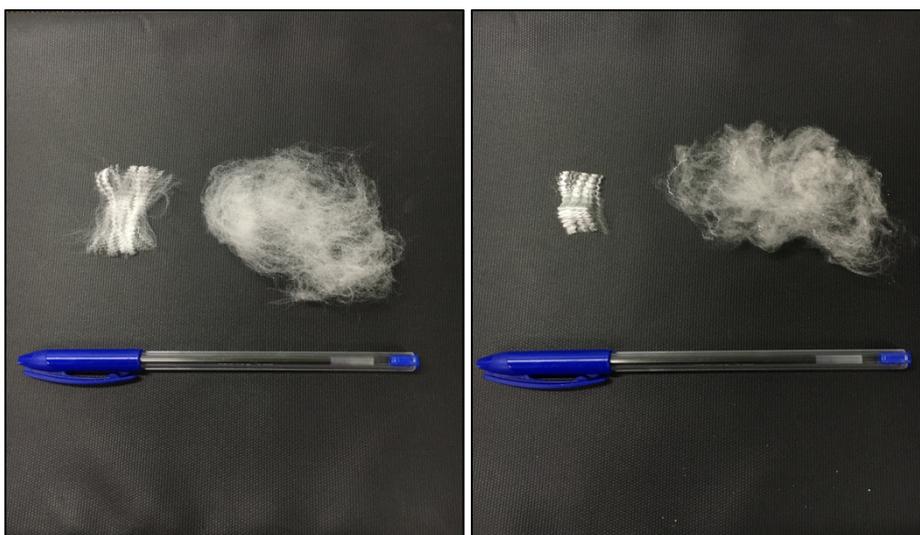


Figura 3-4: (a) Fibra PET de 3,3 dtex com 56 mm; (b) Fibra PET de 1,4 dtex com 38 mm.

A Tabela 3-1 apresenta as principais propriedades mecânicas destas fibras, disponibilizados pelo Grupo M&G.

Tabela 3-1: Propriedades mecânicas das fibras PET (Fonte: M&G Fibras Brasil Ltda.)

Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	Resistência à tração (MPa)	Módulo de Young (MPa)	Alongamento até a ruptura (%)
1,27	81	2800	70

A Figura 3-5 apresenta as etapas do ciclo de reciclagem do PET, desde a produção das garrafas até a sua transformação em fibras.



Figura 3-5: Ciclo do PET (Fonte: M&G Fibras Brasil Ltda.).

Após as garrafas PET serem recolhidas, são enviadas para reciclagem. Passam por um processo de seleção, lavagem, moagem e secagem, resultando num produto denominado *flake*. Este produto é fundido a 300 °C e filtrado, com o objetivo de eliminar resíduos sólidos ainda presentes. Após a exclusão destes resíduos, o PET é granulado, misturado e enviado para um processo de extrusão,

onde se transforma em uma pasta e é armazenado em tambores. Destes tambores, é direcionado para um processo de estiragem onde o produto final resulta nas fibras utilizadas na pesquisa.

Para este estudo, foram selecionadas fibras PET de dois títulos e comprimentos diferentes – 1,4 dtex com 38 mm e 3,3 dtex com 56 mm. O título é a grandeza que representa a espessura dos filamentos das fibras na indústria têxtil, cuja unidade é o dtex (onde 1 dtex = 1g/10000m). Uma fibra com título igual a 3,3 dtex corresponde a um diâmetro de 0,023 mm, enquanto que uma fibra com título de 1,4 dtex corresponde a um diâmetro de aproximadamente 0,0098 mm.

Para a utilização das fibras, foi necessário desfiá-las manualmente e em sequência foram inseridas de maneira aleatória no solo.

### **3.2.3 Água**

A água utilizada na preparação das misturas para realização dos ensaios foi proveniente da rede pública de abastecimento da cidade do Rio de Janeiro. Já para os ensaios de caracterização física foi utilizado água destilada, conforme especificado em normas técnicas.

### **3.2.4 Compósitos Solo-Fibra**

Existem diversos fatores que podem influenciar o comportamento mecânico dos solos compósitos, principalmente aqueles misturados com fibras sintéticas ou vegetais. Podem estar associados tanto às características físicas da fibra – teor, comprimento, diâmetro, orientação, módulo de elasticidade – quanto à matriz do solo - granulometria, índice de vazios, umidade, densidade relativa.

De todos estes fatores citados, o título/comprimento e o teor de fibra são de fundamental importância. Sendo assim, foi definido que para este estudo as fibras seriam dispostas de maneira aleatória no solo, com teor de fibra PET de 0,5% em relação ao peso seco do solo, mas utilizando dois diferentes títulos e comprimentos (1,4 dtex com 38 mm e 3,3 dtex com 56 mm). Para a areia foram escolhidos valores para o teor de umidade de 10% e densidade relativa de 50%.

Os parâmetros para moldagem dos corpos de prova foram fundamentados em outras pesquisas já desenvolvidas (Casagrande, 2005; Palacios, 2012;

Sotomayor, 2014; Tamayo, 2015), onde foram realizados ensaios em compósitos de areia reforçada com fibras de polipropileno, fibras sintéticas com propriedades mecânicas semelhantes às das fibras PET, e fibras de coco, tendo assim uma base de resultados para futuras comparações.

A Tabela 3-2 apresenta os materiais utilizados e suas respectivas nomenclaturas.

Tabela 3-2: Nomenclatura utilizada para o solo e compósitos.

Material	Areia (%)	Fibra (%)	Título (dtex)	Comprimento (mm)	Nomenclatura
Areia	100	-	-	-	A100
Compósito 1	99,5	0,5	1,4	38	F1,4_38
Compósito 2	99,5	0,5	3,3	56	F3,3_56

### 3.3 Métodos e Procedimentos de Ensaio

A seguir são apresentadas as etapas e procedimentos referentes aos ensaios realizados, bem como as normas definidas para cada um destes.

O principal objetivo na realização deste programa experimental foi fundamentado na necessidade de se obter a caracterização física e mecânica do material utilizado, avaliando o seu comportamento em ensaios triaxiais consolidados isotropicamente drenados, onde foram obtidos os parâmetros de resistência, e em ensaios de carga de placa, obtendo-se o perfil de carga-recalque e o modo de ruptura de um talude, a partir do solo puro e das misturas ensaiadas. Com os resultados obtidos foi possível observar a influência das fibras de PET misturadas com o solo e como esse material pode vir a melhorar os parâmetros e comportamento da areia.

Apresentam-se os ensaios de laboratório realizados no presente estudo:

- a) Propriedades físicas e de classificação dos materiais:
  - Análise granulométrica;
  - Densidade real dos grãos;
  - Índice de vazios máximo e mínimo do solo.

b) Propriedades mecânicas:

- Ensaio triaxial consolidado isotropicamente drenado (CID);
- Ensaio de prova de carga em placa (simulação em modelo físico reduzido).

### 3.3.1

#### Ensaio de Caracterização Física

Para a determinação das propriedades físicas das amostras do solo arenoso, foram executados ensaios de caracterização física do material no Laboratório de Geotecnia e Meio Ambiente da PUC – Rio. A areia estudada foi preparada seguindo as normas brasileiras da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT).

As seguintes normas foram utilizadas no preparo e realização dos ensaios:

- NBR 6457/1986 – Amostras de Solos – Preparação para Ensaio de Compactação e Caracterização;
- NBR 7181/1984 – Solo – Análise Granulométrica;
- NBR 6508/1984 - Solo - Determinação da densidade real dos grãos;
- NBR 12004/1990 – Solo – Determinação do índice de vazios máximo de solos não coesivos;
- NBR 12051/1991 – Solo – Determinação do índice de vazios mínimos de solos não coesivos.

As misturas de solo-fibra não foram caracterizadas pois percebe-se, pela literatura existente, que as fibras ao serem inseridas no solo não afetam ou afetam em um nível insignificante os índices físicos do solo puro.

#### 3.3.1.1

##### Análise Granulométrica

Para determinar a curva granulométrica do solo, peneirou-se 1000 gramas do material na peneira #40 (0,425 mm), de acordo com a norma NBR 7181 (ABNT, 1984). O material retido na peneira foi lavado e posteriormente secado por 24h em estufa a 105 °C, realizando-se o peneiramento grosso logo após este período.

Por se tratar de um solo arenoso, não foi necessário realizar o processo de sedimentação, visto que não se tinha a quantidade necessária de finos para a sua realização.

### **3.3.1.2 Densidade Real dos Grãos**

O ensaio para determinar a densidade real dos grãos do solo foi realizado de acordo com instruções da norma NBR 6508 (ABNT, 1984), utilizando o material passante na peneira #40 (0,425 mm).

Utilizou-se 100 gramas deste material, seco em estufa à 105 °C. Em sequência, 30 gramas da amostra do material foram colocadas em 3 picnômetros de 250 ml e foi adicionado água, de modo que todo o solo ficasse submerso. O processo de aeração foi realizado por uma válvula à vácuo, no intuito de retirar todo o ar presente nos vazios do solo. Completou-se o volume restante do picnômetro com água destilada, de maneira lenta, para que não houvesse entrada de ar. Com os picnômetros totalmente preenchidos, estes foram postos em banho-maria para equalizar com a temperatura ambiente, que devido à aplicação do vácuo, diminuiu. Após o equilíbrio da temperatura, pesou-se o conjunto (picnômetro + água + solo). Obtido este valor, o material foi descartado e o picnômetro preenchido com água destilada, pesando-o novamente e obtendo o peso do novo conjunto (picnômetro + água). É importante ressaltar que a temperatura do primeiro conjunto seja a mesma do segundo.

### **3.3.1.3 Índice de Vazios Máximo e Mínimo**

Para a determinação dos índices de vazios máximo e mínimo do solo puro, utilizou-se um funil, um cilindro metálico e uma mesa vibratória. O volume e peso do cilíndrico metálico foram calculados de acordo com as suas dimensões.

O ensaio para determinar o índice de vazio máximo procedeu-se segundo a NBR 12004/1990. Com o auxílio de um funil, despejou-se a amostra do material no cilindro metálico, de tal forma que a altura de queda se mantivesse constante, e o material permanecesse em um estado o mais fofo possível. O funil foi movido seguindo uma trajetória circular, da borda para o centro do molde, construindo camadas de espessuras constantes. O molde foi preenchido até 2 cm acima do

topo e o excesso de material retirado com o auxílio de uma régua biselada. Após este processo se pesou o conjunto.

A determinação do índice de vazio mínimo procedeu-se segundo a NBR 12051/1991. O método de utilização do funil para despejo do solo no cilindro ocorreu igualmente a descrita no ensaio de determinação do índice de vazio máximo. Para este ensaio, dividiu-se o cilindro em 3 camadas e após o preenchimento de cada camada, colocava-se um disco-base e um peso no interior do cilindro, aplicando uma sobrecarga no material. Em seguida o cilindro foi posto em uma mesa vibratória por 1 minuto. Este processo foi repetido 3 vezes, preenchendo o cilindro de 1 a 2 cm acima do topo. O excesso de material foi retirado e o conjunto pesado.

O valor final calculado para cada índice consistiu em uma média de três repetições, realizadas para se ter uma maior precisão no resultado final.

### **3.3.2 Ensaio de Compressão Triaxial**

O ensaio triaxial é o mais comum e versátil teste utilizado para determinar as propriedades tensão-deformação do solo. A forma mais comum de realizar este ensaio é aumentando a tensão axial enquanto mantém-se a tensão confinante constante (Lambe e Whitman, 1969). Os ensaios triaxiais podem ser classificados baseados na consolidação e drenagem, resultando em três diferentes tipos de ensaios (Bishop e Henkel, 1964):

- Ensaio triaxial UU: não consolidado não drenado;
- Ensaio triaxial CU: consolidado não drenado;
- Ensaio triaxial CD: consolidado drenado.

Lambe e Whitman (1969) descrevem o ensaio como: um corpo de prova cilíndrico, envolvido por uma membrana de borracha flexível que impede a passagem do fluido, normalmente água, para os poros do solo, é submetido à uma tensão confinante hidrostática. Em seguida, a tensão axial é acrescida aos poucos, até a falha por cisalhamento da amostra. A Figura 3-6 apresenta um esquema típico de uma câmara triaxial.

Com o objetivo de verificar as propriedades mecânicas dos materiais e misturas estudadas, foram realizados ensaios triaxiais do tipo consolidado

isotropicamente drenado (CID). Os ensaios foram realizados no Laboratório de Geotecnia e Meio Ambiente da PUC-Rio.

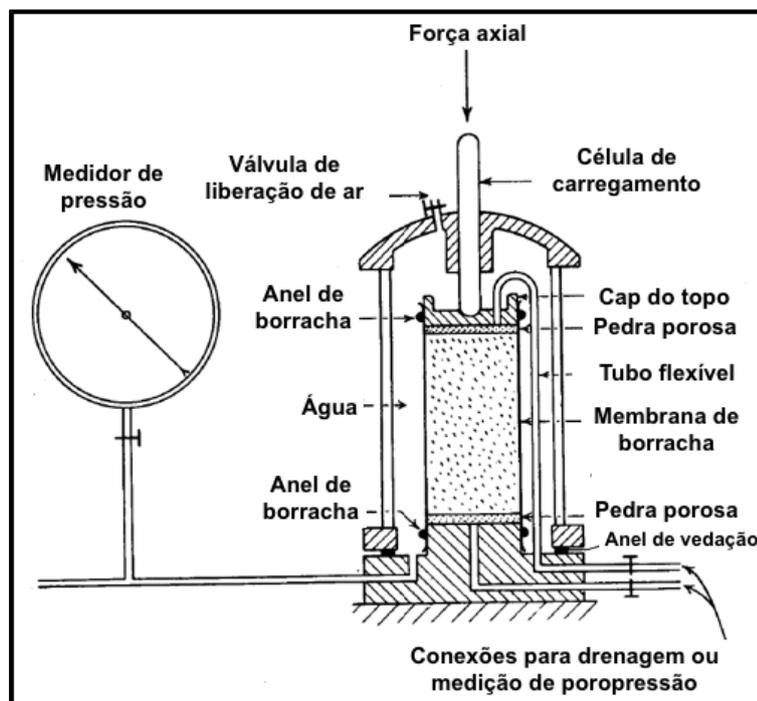


Figura 3-6: Esquema de câmara triaxial (Bishop e Henkel, 1964).

São apresentados os equipamentos utilizados e as etapas do ensaio como a preparação, saturação e cisalhamento do corpo de prova.

### 3.3.2.1 Equipamentos Utilizados

O equipamento utilizado para os ensaios triaxiais é da marca *Wykeham-Ferrance*, com velocidade de deslocamento controlada e capacidade de até 10 toneladas. O ajuste das velocidades de deslocamento do pistão é determinado através da seleção adequada dos pares de engrenagens e respectivas marchas. A câmara triaxial utilizada foi construída para corpos de prova com diâmetro de 1,5” e seu corpo é feito de acrílico com suporte de pressão confinante máxima de 1000 kPa (Figura 3-7).

A célula de carga empregada no ensaio é do fabricante ELE International Ltda., com capacidade máxima de 500 kN e exatidão de 0,1 kN. Os LVDT's utilizados para medir os deslocamentos são da marca *Wykeham-Ferrance* com

curros de 25 mm e exatidão de 0,01 mm. Para medir as pressões na câmara, no medidor de variação de volume e das poropressões, foi utilizado um transdutor de pressão da marca *Schaevitz*, com variação de  $\pm 2,0$  kPa e capacidade máxima de 1700 kPa. Para gravação dos dados obtidos pelos transdutores foi utilizado um sistema de aquisição de dados constituído pelo hardware QuantumX de oito canais, da empresa alemã HBM, e pelo software CatmanEasy. Este sistema monitora continuamente e em tempo real todos os dados referentes às diferentes fases do ensaio.

As variações do volume são adquiridas através de medidores de variação volumétrica (MVV), fabricados na PUC-Rio, seguindo o modelo do Imperial College. A Figura 3-7 apresenta todos os equipamentos que compõem o sistema triaxial.

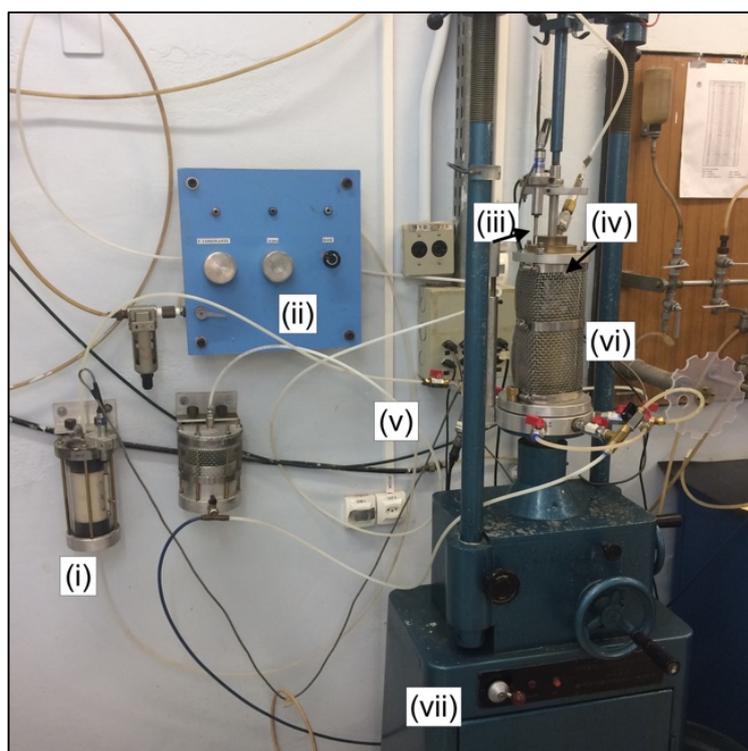


Figura 3-7: (i) medidor de variação de volume; (ii) painel de controle de pressões; (iii) LVDT; (iv) célula de carga ; (v) transdutor de pressão; (vi) câmara de acrílico com grades; (vii) sistema de engrenagens para aplicação da velocidade de cisalhamento.

### 3.3.2.2 Preparação dos Corpos de Prova

Para o preparo dos corpos de prova da areia e compósitos, foi realizado o processo de moldagem diretamente no molde tripartido (Figura 3-8). A compactação foi realizada manualmente, dividindo o molde em 3 camadas iguais. Os parâmetros utilizados tanto para a areia quanto para as misturas, foram os apresentados anteriormente, com teor de umidade de 10% e densidade relativa igual à 50%.



Figura 3-8: Molde tripartido.

Para determinar a massa dos materiais a ser utilizada na compactação, mediu-se as dimensões do molde tripartido e calculou-se o seu volume. Com este valor, os dados obtidos nos ensaios de caracterização da areia (densidade dos grãos e índice de vazios máximo e mínimo) e os parâmetros de modelagem previamente definidos (teor de umidade, densidade relativa e teor de fibras), obteve-se a quantidade necessária de solo, fibra e água para moldagem dos corpos de prova. A Figura 3-9 ilustra todos os processos da moldagem dos corpos de prova.

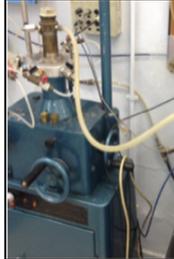
Moldagem dos corpos de prova da areia					
					
1. Coloca-se a pedra porosa e papel filtro na base do equipamento e em seguida ajusta-se a membrana. Para vedação é inserido os o-rings.	2. O molde tripartido é fixado com o auxílio de uma abraçadeira.	3. Veda-se as possíveis saídas de ar com fita silver tape e aplica-se vácuo, processo necessário na pré inserção do material dentro do mole.	4. Após inserido o material, se coloca o papel filtro, pedra porosa e o topo (cap), respectivamente, e ajusta-se a membrana ao redor do cap, fixando-a com ajuda dos o-rings.	5. Desmontam-se todos os equipamentos necessários na moldagem do corpo de prova.	6. A câmara de acrílico é inserida e o ensaio está pronto para iniciar.

Figura 3-9: Processo de moldagem dos corpos de prova para ensaio triaxial.

### 3.3.2.3 Processo de Saturação dos Corpos de Prova

O processo de saturação dos corpos de prova da areia pura e compósitos solo-fibra foi realizado através da percolação de água pela amostra e por contrapressão. No caso da percolação, a diferença de pressão imposta entre a base e o topo foi de 5 kPa, com o sentido da percolação da base para o topo. No processo de saturação por contrapressão, a tensão confinante aplicada no corpo de prova excedia a contrapressão em 10 kPa, o que minimizou possíveis efeitos de adensamento e permitiu o fluxo de água pelo topo e base.

Para determinar o grau de saturação do corpo de prova, utilizou-se o parâmetro  $B$  de Skempton, descrito pela equação (3.1):

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

Onde:

$\Delta u$  : excesso de poropressão gerado;

$\Delta \sigma_c$  : acréscimo de tensão confinante aplicada.

O valor aceitável do parâmetro B para os corpos de prova de areia pura e compósitos foi considerado aceitável quando este era igual à 0,95 ou superior.

### 3.3.2.4 Cálculo da Velocidade de Cisalhamento

Após a saturação dos corpos de prova, iniciava-se a fase de adensamento isotrópico e durante este processo os dados referentes à variação de volume foram coletados pelo programa.

Em posse destes dados, plotou-se o gráfico variação volumétrica ( $\Delta V$ ) vs raiz quadrada do tempo ( $\sqrt{t}$ ). Segundo Head (1998), deve-se prolongar o trecho reto inicial até o ponto onde se encontra com o prolongamento horizontal do trecho final, trecho o qual representa a estabilização da variação volumétrica ou fim da consolidação. O ponto de interseção destas duas retas prolongadas representa a raiz quadrada de  $t_{100}$  ( $\text{min}^{0,5}$ ), no eixo x. Com este valor é possível calcular a velocidade de cisalhamento. A Figura 3-10 apresenta um exemplo de como obter  $t_{100}$ .

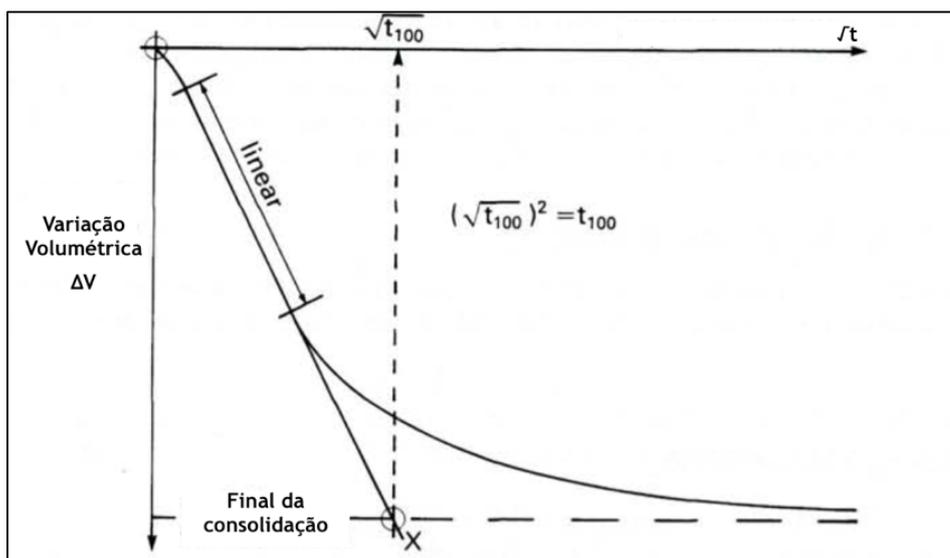


Figura 3-10: Exemplo de gráfico para obtenção de  $t_{100}$ .

Para ensaios triaxiais drenados, utiliza-se a equação (3.2, sugerida por Head, (1998):

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

Onde:

$v$ : velocidade máxima de cisalhamento [mm/min];

$L$ : altura do corpo de prova [mm];

$\varepsilon_f$ : deformação axial estimada na ruptura [%];

$t_f$ : tempo mínimo para ruptura [min].

O valor de  $t_f$  para ensaios triaxiais CID é equivalente à 8,5 vezes o valor de  $t_{100}$ . Porém, se o valor encontrado for menor que 120 minutos, Head (1998) propõe utilizar um determinado valor mínimo, igual a estes 120 minutos.

Ao ser definido uma velocidade de cisalhamento muito lenta para aplicação da compressão axial, garante-se a total drenagem da água do corpo de prova, sem criar excessos de poropressão.

Todos os valores encontrados de  $t_f$ , tanto para a areia pura quanto para os compósitos, foram menores do que 120 minutos. Assim adotou-se  $t_f = 120$  minutos. Para a deformação axial na ruptura foi adotado um valor de 5%, sendo assim a velocidade máxima de cisalhamento ( $v$ ) calculada foi a mesma para todos os ensaios (0,032 mm/min) e a velocidade adotada igual a 0,030 mm/min.

### 3.3.2.5 Cisalhamento

Definida a velocidade de cisalhamento, ajustou-se o par de engrenagens que controlam a velocidade no equipamento triaxial. Para os cálculos, foi adotado uma deformação máxima igual a 18%.

Para os ensaios triaxiais, as variantes de tensão  $q$  (tensão desviadora) e  $p'$  (tensão efetiva) foram calculadas pela formulação proposta por Lambe e Whitman (1969), apresentadas abaixo pelas equações (3.3 e (3.4. Para definição dos parâmetros de resistência do solo, utilizou-se os valores encontrados pela

envoltória de resistência,  $\alpha'$  e  $a'$ , obtida no espaço  $p' \times q$ , para calcular os parâmetros de resistência no espaço do critério de ruptura Mohr - Coulomb ( $\varphi'$  e  $c'$ ), definidos pelas equações (3.5 e (3.6 abaixo:

$$q = \frac{(\sigma'_1 - \sigma'_3)}{2} \quad (3.3)$$

$$p' = \frac{(\sigma'_1 + \sigma'_3)}{2} \quad (3.4)$$

$$\tan(\alpha') = \sin(\varphi') \quad (3.5)$$

$$a' = c' \cdot \cos(\varphi') \quad (3.6)$$

Onde:

$\alpha'$ : inclinação da envoltória de resistência no espaço  $p' \times q$ ;

$a'$ : intercepto com o eixo  $q$  da envoltória de resistência no espaço  $p' \times q$ ;

$\varphi'$ : inclinação da envoltória de resistência no espaço  $\sigma \times \tau$  (Mohr-Coulomb);

$c'$ : intercepto da envoltória de resistência no espaço  $\sigma \times \tau$  (Mohr-Coulomb).

### 3.3.3

#### Ensaio de Prova de Carga em Placa e Simulação de Talude

Os ensaios de placa e simulação de talude em modelo físico reduzido foram realizados no Laboratório de Estruturas e Materiais (LEM) da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Seu principal objetivo foi avaliar a mudança ocasionada no comportamento carga-recalque de uma areia ao inserir as fibras PET na sua matriz. Adicionalmente, quis-se verificar como que essas mesmas fibras influenciariam no mecanismo de ruptura de um talude, com inclinação estipulada de 1:1.

Além de se verificar o comportamento carga-recalque do solo, também se mediu os deslocamentos verticais ocorridos no entorno da placa, com os transdutores de deslocamento a 5 cm, 7,5 cm e 10 cm da borda da placa, com o intuito de avaliar o comportamento ao redor da placa e o modo de ruptura, para o solo e compósito, que poderia ser: generalizado, localizado ou por puncionamento. Também foram medidos os deslocamentos horizontais do talude, para analisar o seu comportamento de acordo com o acréscimo de carga, sendo os transdutores de deslocamento posicionados no topo, no centro e na base do talude.

Para a execução dos ensaios, dividiu-se estes em 3 etapas: moldagem do solo dentro da caixa de ensaio, aplicação de carga para medição dos recalques e exumação pós ensaio. A areia foi misturada manualmente com água para atingir o teor de 10% de umidade estipulado e, quando se utilizava fibra PET, a mistura também foi realizada manualmente. A exumação após os ensaios ocorreu, inicialmente, com a retirada de solo próximo ao acrílico. Após deixar a superfície de contato entre o acrílico e o solo dentro da caixa de ensaio livre, retirou-se o acrílico e deu-se início ao processo de exumação. Para os ensaios com solo puro, tudo ocorreu da maneira planejada, não encontrando dificuldades no processo. Nos ensaios com a mistura solo-fibra, teve-se que realizar o processo cuidadosamente, porque na hora de cortar o solo, algumas fibras eram puxadas juntamente com o solo e desintegravam o perfil, dificultando a visualização das deformações.

### **3.3.3.1 Caixa de Ensaio**

Para a realização dos ensaios, foi construída uma caixa de ensaio com quatro chapas de madeira de alta densidade e uma chapa de acrílico resistente. A caixa foi dimensionada segundo o critério de que o bulbo de tensões gerado pelo ensaio de placa somente representa as características do solo até dois diâmetros abaixo da placa (Terzghi e Peck, 1967). Assim, para simular um meio contínuo e sem interferência das paredes laterais e do fundo, definiu-se dimensões para a caixa de ensaios de 80 cm de comprimento x 60 cm de largura x 45 cm de espessura. Devido as chapas de madeira de alta densidade com espessura de 3 cm e o acrílico com espessura de 2 cm, o espaço útil utilizado da caixa foi de 74 cm x 40 cm x 40 cm. A placa de aço utilizada era rígida e possuía 10 cm de diâmetro e

2,54 cm de espessura. Pensando em evitar um problema de flambagem das paredes, foi adicionado um reforço lateral composto por perfis de aço, fornecendo uma maior rigidez ao aplicar o carregamento. Para se ter uma altura adequada para a realização dos ensaios, foram utilizados suportes como apoio, além de reforçar a chapa de madeira inferior da caixa de ensaio.

A Figura 3-11 apresenta o esquema proposto para a construção da caixa e a Figura 3-12 apresenta o modelo reduzido finalizado. A Figura 3-13 apresenta o esquema dos dois ensaios a serem realizados.

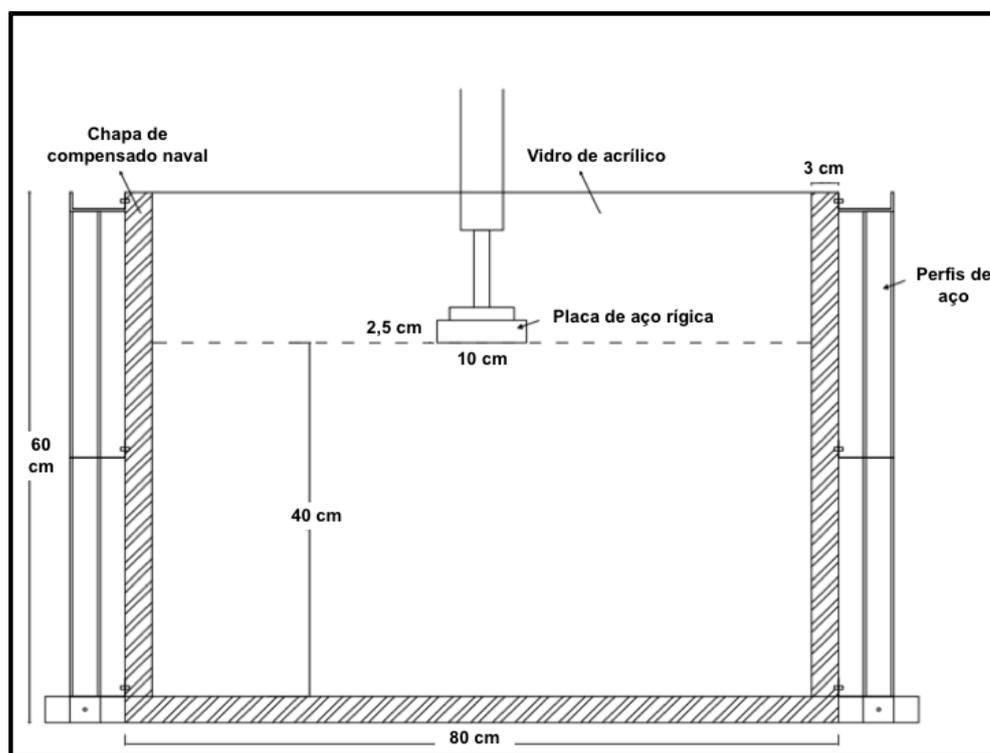


Figura 3-11: Esquema da caixa para ensaios de prova de carga em placa.



Figura 3-12: Caixa utilizada como modelo reduzido para realização dos ensaios.

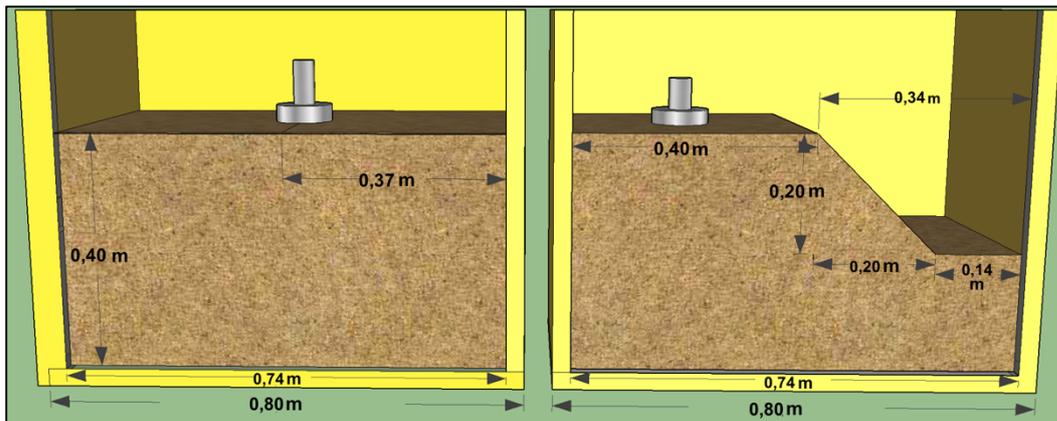


Figura 3-13: Esquema dos ensaios de prova de carga em placa (esquerda) e simulação de talude (direita).

Para a realização dos primeiros ensaios de placa, com e sem fibra PET, na moldagem, para se obter a densidade relativa definida de 50%, dividiu-se as paredes internas em 4 camadas de 10 cm cada. Assim, foi possível calcular a quantidade de material necessário para cada camada, respeitando a densidade relativa estipulada. A Figura 3-14 apresenta as divisões das camadas para um melhor controle.



Figura 3-14 - Divisões da caixa por camadas para controle da densidade relativa.

Caso a areia ficasse abaixo deste nível de controle, se teria uma densidade relativa acima dos 50% definidos, sendo necessário repetir o processo. Caso contrário, uma compactação adicional seria necessária para nivelar o material. Ao final de cada camada, acrescentou-se areia tingida com tinta azul para se ter uma melhor visualização das deformações obtidas na exumação pós ensaio. Sotomayor (2014) realizou o mesmo procedimento em sua pesquisa e comprovou que a tinta não é diluída pela umidade das camadas de areia.

Já para a realização dos ensaios de simulação de talude, com e sem fibra PET, utilizou-se o mesmo esquema utilizado nos ensaios de carga em placa, mas adaptando-o de tal maneira que fosse possível moldar o talude manualmente, com a utilização de chapas de alumínio dimensionadas e moldadas para facilitar o processo.

### **3.3.3.2 Transdutores de Deslocamento**

Para medir os deslocamentos obtidos durante a realização dos ensaios de carga em placa, foram utilizados três transdutores de deslocamento do tipo *Gefran PY2F* com curso de 100 mm. Para os ensaios de simulação de talude, foram utilizados dois transdutores de deslocamento do tipo *Gefran PY2F* com curso de 50 mm e um transdutor de deslocamento do tipo *Gefran PY2F* com curso de 25 mm. Todos estes transdutores passaram previamente por um processo de

calibração, realizados no Laboratório de Estruturas e Materiais da PUC-Rio, para garantir a exatidão dos resultados.

Para cada transdutor de deslocamento utilizado no ensaio de prova de carga em placa, foi concebido um número de identificação e uma posição fixa, conforme Figura 3-15 e Figura 3-16 abaixo.

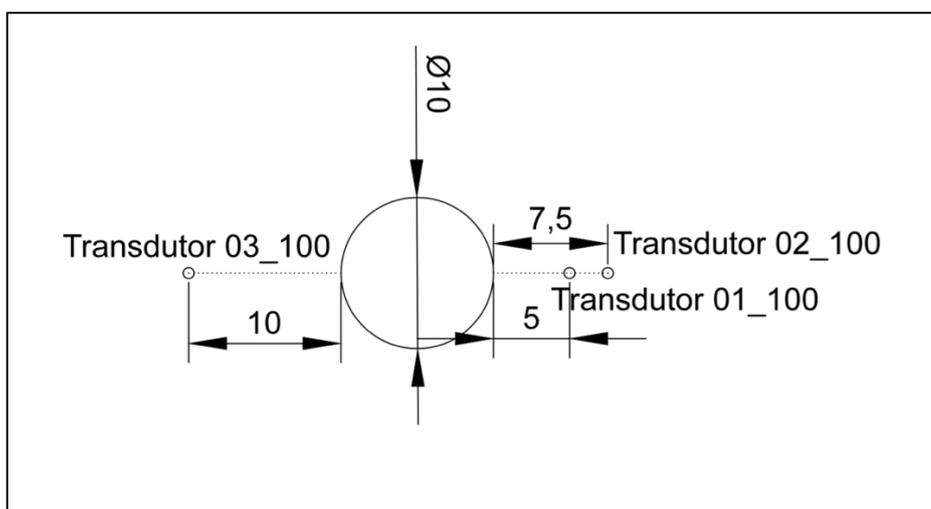


Figura 3-15: Esquema do posicionamento dos transdutores de deslocamento no ensaio de prova de carga em placa.

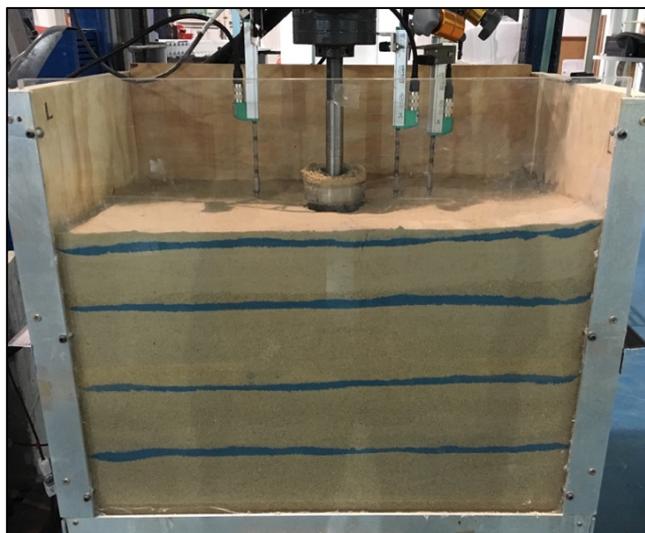


Figura 3-16: Posicionamento dos transdutores de deslocamento durante a realização do ensaio de prova de carga em placa.

Para os ensaios de simulação do talude, os transdutores de deslocamento foram posicionados e identificados conforme Figura 3-17 e Figura 3-18. A placa foi situada à uma distância de aproximadamente 13,5 cm da borda do talude, com o objetivo de simular um caso onde a aplicação de carga fosse crítica.

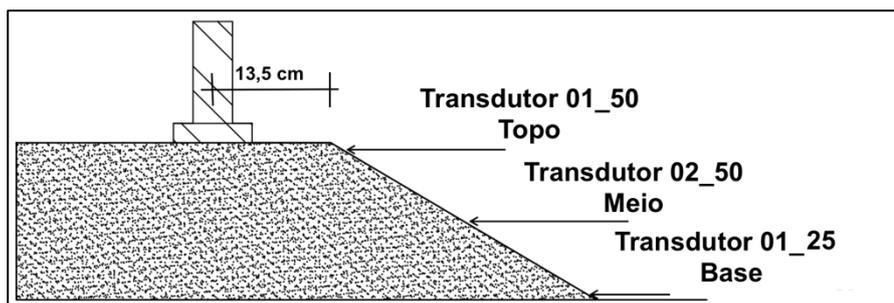


Figura 3-17: Esquema do posicionamento dos transdutores de deslocamento na simulação do talude.

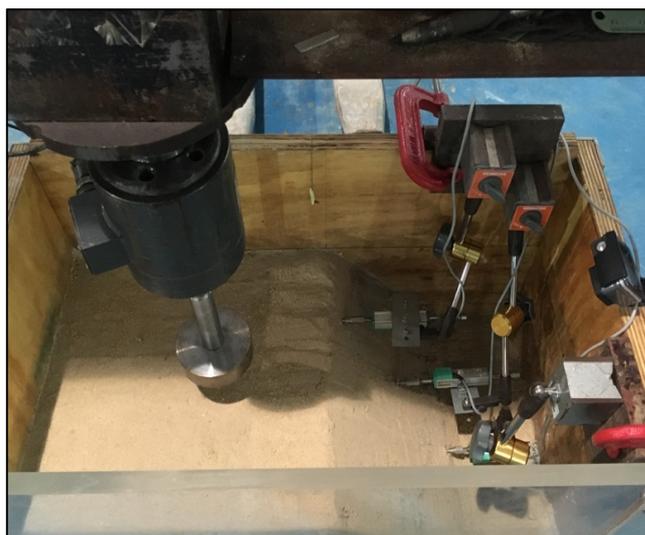


Figura 3-18: Posicionamento dos transdutores de deslocamento durante a realização da simulação do talude.

### 3.3.3.3

#### Sistema de Carregamento e Aquisição de Dados

Para realização dos ensaios e aplicação das cargas, utilizou-se uma placa rígida circular de aço de 10 cm de diâmetro e 2,54 cm de espessura. A placa foi acoplada em um sistema de carregamento *MTS*, composto por um quadro de reação universal acoplado com atuador servo hidráulico e uma célula de carga de 100 kN, com controlador *FLEX TEST 60* e *HPU Silent Flo*, modelo 505.120-G2.

O deslocamento da placa foi monitorado por um sistema de aquisição de dados interno conectado ao atuador que media diretamente o deslocamento da célula de carregamento. Um outro sistema de aquisição de dados externo *HBM Quantum X – MX1615* estava conectado diretamente aos transdutores de

deslocamento. O software utilizado para leitura dos dados foi o *catman Easy*. Não foi necessário colocar transdutor de deslocamento sobre a placa, pois como esta estava acoplada ao sistema de carregamento, sabia-se que a rotação do atuador não iria ocorrer. A Figura 3-19 apresenta uma visão geral do pórtico utilizado para os ensaios de placa e simulação de talude.



Figura 3-19 - Sistema de carregamento utilizado para realização dos ensaios de prova de carga em placa.

A aplicação de carga ocorreu de forma controlada, com uma velocidade de 0,2 kN/s. Após acrescentar a carga, esperava-se a estabilização das leituras obtidas pelos transdutores de deslocamento e aplicava-se novamente a carga, de 0,2 kN em 0,2 kN.

## 4 Resultados e Discussões

### 4.1 Considerações Iniciais

Neste capítulo serão apresentados os resultados e análises dos ensaios realizados na presente pesquisa, para as amostras de areia e compósitos areia-fibras PET. Com os resultados é possível compreender e visualizar melhor o comportamento mecânico das misturas e como a adição de fibras PET podem influenciar os parâmetros de resistência do solo.

### 4.2 Ensaio de Caracterização Física

#### 4.2.1 Índices Físicos

Os índices físicos estão relacionados com as três fases do solo – líquida, sólida e gasosa – e são quantificados através do peso e volume. A densidade real dos grãos é um índice físico que relaciona a massa e volume dos grãos do solo. O índice de vazios é definido pela relação entre o volume de vazios com o volume de sólidos.

A Tabela 4-1 apresenta os resultados encontrados. É possível observar que os valores encontrados podem ser definidos, como esperado, para uma areia.

Tabela 4-1: Índices Físicos da areia.

<b>Índices físicos</b>	<b>Areia</b>
Densidade Real dos Grãos, $G_s$	2,65
Índice de Vazios Máximo, $e_{máx}$	0,93
Índice de Vazios Mínimo, $e_{mín}$	0,67
Índice de Vazios, $e$	0,80
Massa Específica seca do solo, $\rho_s$ ( $g/cm^3$ )	1,47

### 4.2.2 Análise Granulométrica

O ensaio de granulometria tem por finalidade determinar as frações constituintes do solo e a partir destas, classificar o material. A Figura 4-1 apresenta a curva granulométrica obtida para a areia.

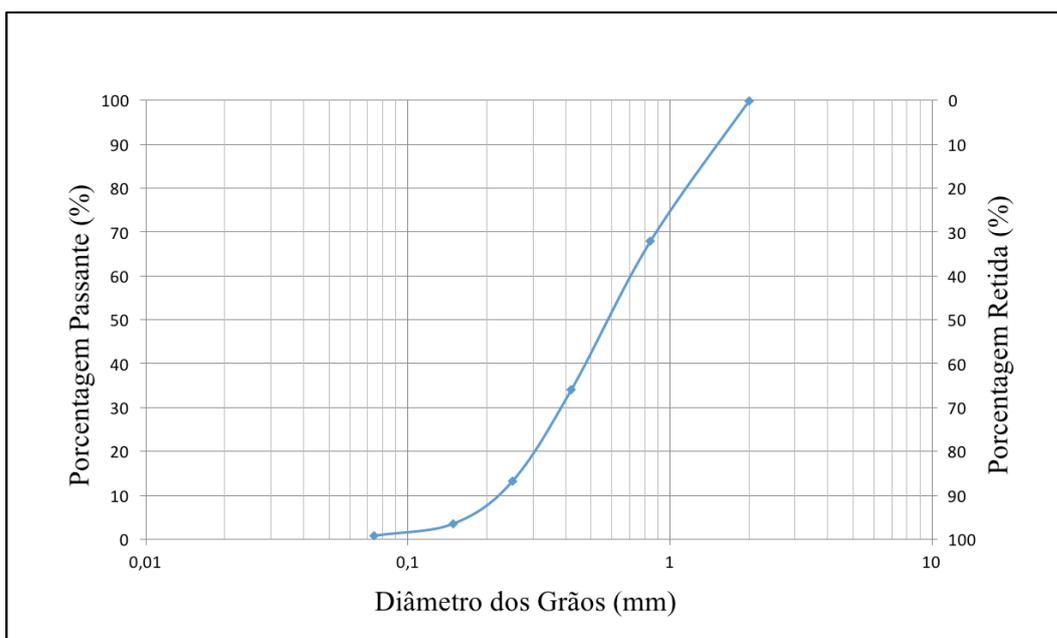


Figura 4-1: Curva granulométrica da areia

A Tabela 4-2 apresenta os índices obtidos através da curva granulométrica, como o coeficiente de uniformidade,  $CU$  e o coeficiente de curvatura,  $C_c$ .

Tabela 4-2: Índices obtidos da curva granulométrica.

Índice Granulométrico	Areia
Coeficiente de Uniformidade, $CU$	2,9
Coeficiente de Curvatura, $C_c$	1,0
Diâmetro efetivo, $D_{10}$	0,24 mm
Diâmetro médio, $D_{50}$	0,59 mm

De acordo com o Sistema Unificado de Classificação dos Solos – SUCS, os materiais arenosos (S) com menos de 5% de finos e  $CU < 6$  e/ou  $1 > C_c > 3$ , como a areia em questão, é classificado como SP, ou seja, uma areia mal graduada.

### 4.3 Ensaio Triaxial CID

Neste item serão apresentados os resultados obtidos através dos ensaios triaxiais CID realizados por compressão axial, onde a tensão confinante é mantida constante e a tensão axial incrementada em intervalos de tempo. Foram realizados ensaios em amostras de solo puro e compósitos solo-fibra com teor de fibra PET de 0,5%, calculados em relação ao peso seco do solo. As tensões efetivas aplicadas em todos os casos foram de 50, 100 e 150 kPa.

Os gráficos de tensão desviadora vs deformação axial e variação volumétrica vs deformação axial, em conjunto com as trajetórias de tensões e parâmetros de resistência ao cisalhamento, também serão apresentadas neste item, além da análise da influência das fibras no comportamento ao cisalhamento do solo.

#### 4.3.1 Tensão Desviadora e Variação Volumétrica vs Deformação Axial

Na Figura 4-2 e Figura 4-3 são apresentadas as curvas tensão desviadora ( $\sigma_d$ ) e variação volumétrica ( $\epsilon_v$ ) vs deformação axial ( $\epsilon_a$ ) referentes aos ensaios triaxiais CID em compressão axial para a areia (A100), nas tensões confinantes de 50, 100 e 150 kPa.

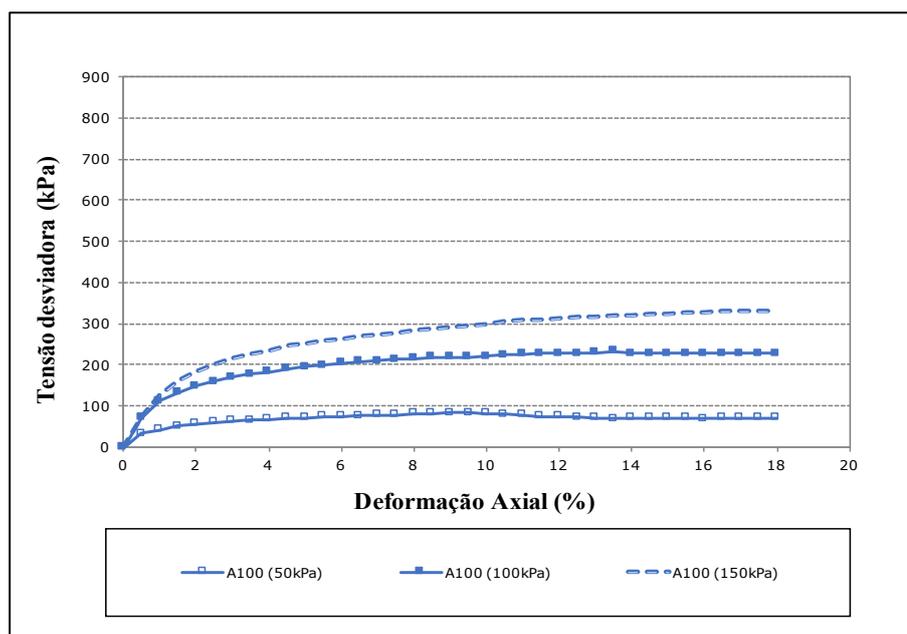


Figura 4-2: Curvas tensão desviadora vs deformação axial para a areia (A100).

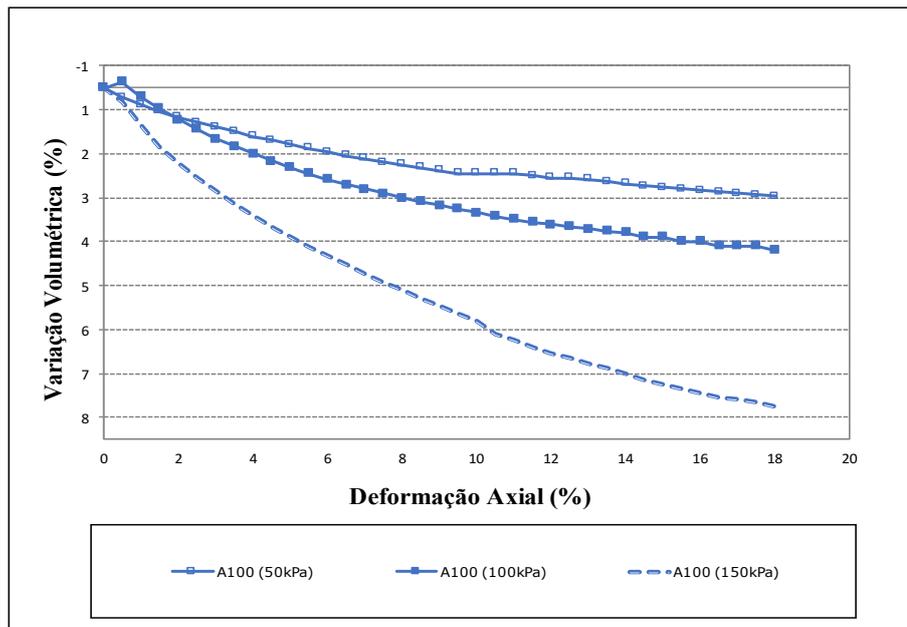


Figura 4-3: Curva variação volumétrica vs deformação axial para a areia (A100).

Percebe-se que a areia possui um comportamento dúctil, sem a presença de um pico definido e com característica de contração. O aumento da tensão confinante também é acompanhado de um aumento na resistência da areia, onde a curva tensão-deformação para cada nível de tensão começa a ter um comportamento constante a partir de diferentes valores de deformações axiais. Para a tensão de 50 kPa, a curva tende a ser constante aproximadamente em 5% de deformação axial, enquanto que para as tensões de 100 kPa e 150 kPa tem-se valores de 7% e 13%, respectivamente.

Na Figura 4-4 e Figura 4-5 são apresentadas as curvas tensão desviadora ( $\sigma_d$ ) e variação volumétrica ( $\epsilon_v$ ) vs deformação axial ( $\epsilon_a$ ) referentes aos ensaios triaxiais CID em compressão axial para o compósito 1 (0,5% de fibras com 1,4 dtex e 38 mm de comprimento), nas tensões confinantes de 50, 100 e 150 kPa.

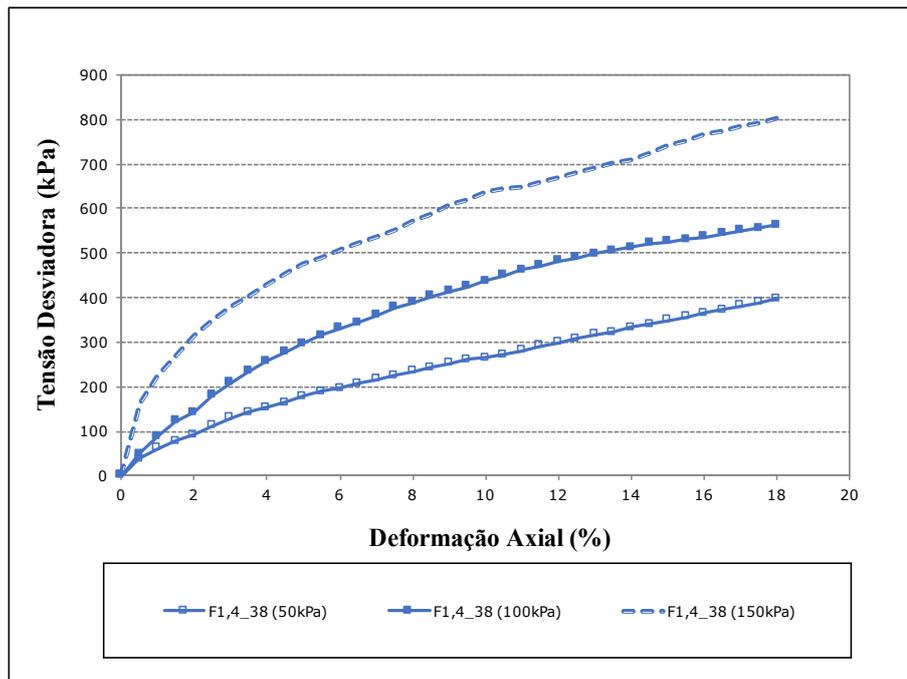


Figura 4-4: Curva tensão desviadora vs deformação axial para areia-fibras PET (F1,4\_38).

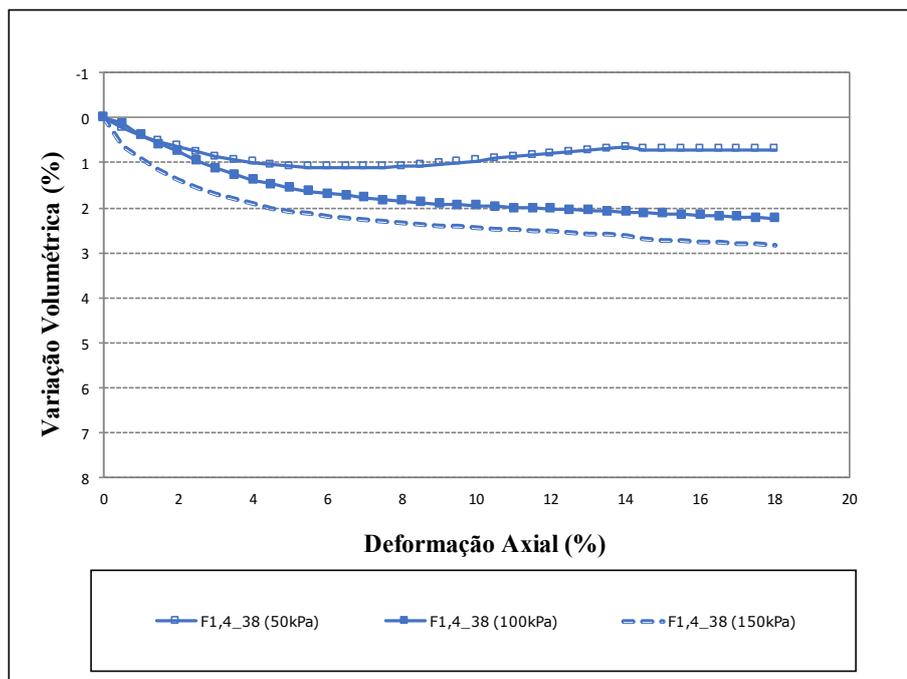


Figura 4-5: Curva variação volumétrica vs deformação axial para areia-fibras PET (F1,4\_38).

A inserção das fibras PET de 1,4 dtex resulta em um acréscimo da resistência do compósito, onde tem-se um comportamento crescente até a deformação axial máxima estipulada, de 18%, também sem apresentar pico. Igualmente à areia, também apresenta um comportamento de contração. Pode-se notar uma mudança no comportamento das curvas no início dos ensaios, na faixa

da deformação axial entre os valores de 0% e 0,5%, onde é possível notar uma mudança na trajetória destas, independente da tensão efetiva. A partir da deformação axial de 2%, é possível perceber um comportamento paralelo entre as curvas.

Na Figura 4-6 e Figura 4-7 são apresentadas as curvas tensão desviadora ( $\sigma_d$ ) e variação volumétrica ( $\varepsilon_v$ ) vs deformação axial ( $\varepsilon_a$ ) referentes aos ensaios triaxiais CID em compressão axial para o compósito 2 (0,5% de fibras com 3,3 dtex e 56 mm de comprimento), nas tensões confinantes de 50, 100 e 150 kPa.

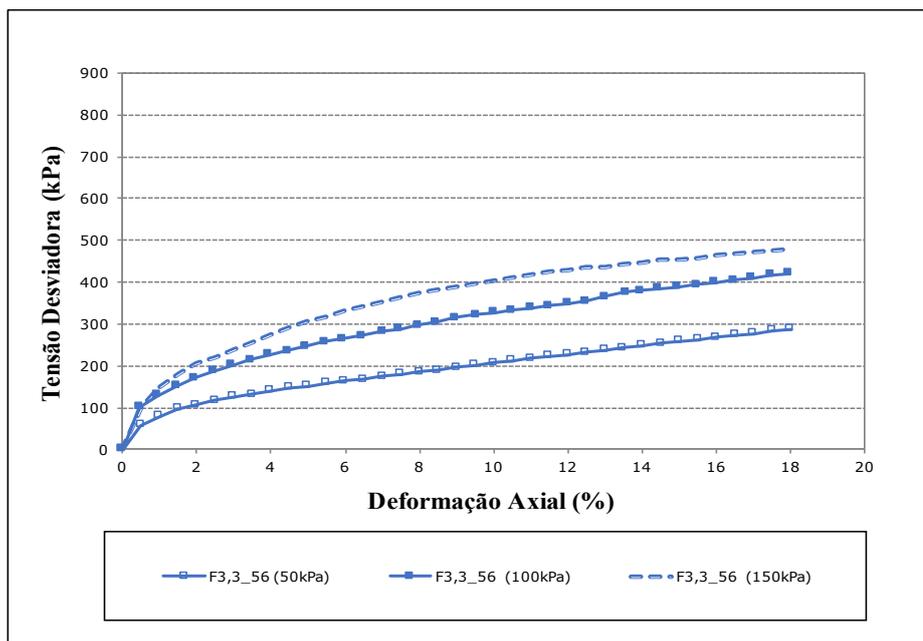


Figura 4-6: Curva tensão desviadora vs deformação axial para areia-fibras PET (F3,3\_56).

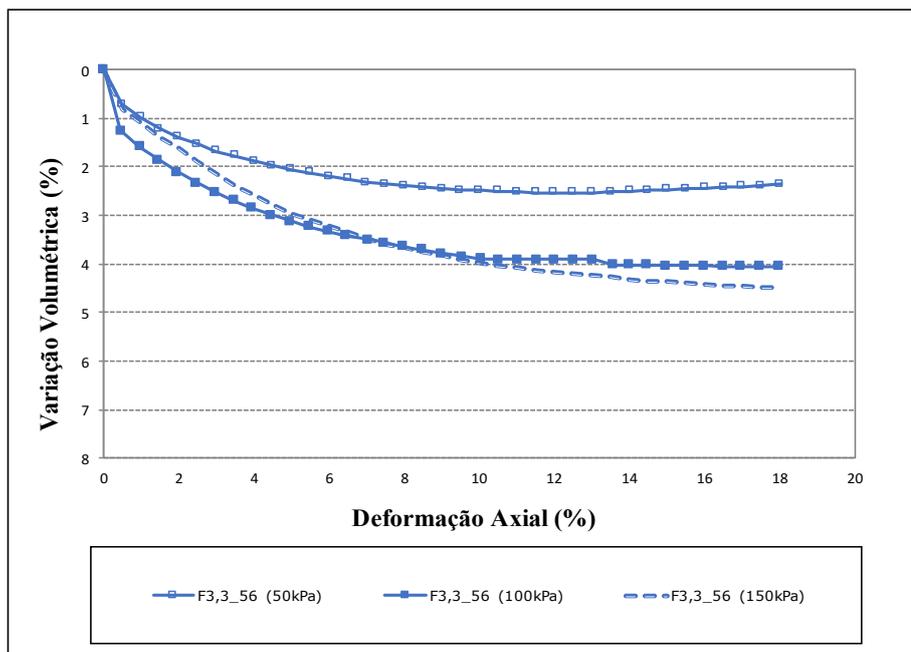


Figura 4-7: Curva variação volumétrica vs deformação axial para areia-fibras PET (F3,3\_56).

A adição de fibras PET de 3,3 dtex à matriz arenosa também resulta em um ganho de resistência do compósito. Igualmente encontrado para a areia e para a fibra PET de 1,4 dtex, tem-se um comportamento crescente do material, sem a presença de um pico definido, apresentando um comportamento de contração. Tem-se um comportamento crescente para todas as tensões efetivas estudadas e também se consegue observar uma mudança no comportamento das curvas a partir de uma deformação axial de 0,5% e um paralelismo entre curvas na deformação axial de 2%.

#### 4.3.2 Influência da Adição de Fibra PET

Na Figura 4-8 e Figura 4-9 serão apresentadas e comparadas as curvas tensão desviadora ( $\sigma_d$ ) e variação volumétrica ( $\epsilon_v$ ) vs deformação axial ( $\epsilon_a$ ) referentes aos ensaios triaxiais CID realizados para a matriz de areia pura e as duas misturas areia-fibras PET.

Percebe-se que a inclusão de fibras PET provoca um aumento na resistência conforme a tensão efetiva aumenta. Nota-se um incremento na resistência ao cisalhamento para as misturas com fibras ao comparar com o solo não reforçado, sendo este acréscimo maior com a diminuição do título (ou diâmetro) da fibra.

Este maior ganho de resistência para as fibras PET de menor título (1,4 dtex) pode ser explicado devido ao fato de como serem fibras mais finas e menores em comprimento, tem-se uma maior quantidade de filamentos dentro da matriz do solo, se comparado às fibras PET de 3,3 dtex. Assim, é mais provável a presença destas fibras mais finas passando pela superfície de ruptura do solo, o que acaba resultando neste aumento no ganho de resistência.

Nas curvas de variação volumétrica, nota-se uma tendência de contração para todas as amostras em função do aumento da tensão confinante. A mistura com fibra PET de 1,4 dtex com 38 mm de comprimento apresentam uma tendência de menor contração se comparado ao solo não reforçado, enquanto que a mistura com fibra PET de 3,3 dtex com 56 mm de comprimento apresenta uma tendência de maior contração em relação ao solo não reforçado, com exceção da amostra F3,3\_56 sob tensão confinante de 150 kPa, onde também tende a contrair menos que a areia pura.

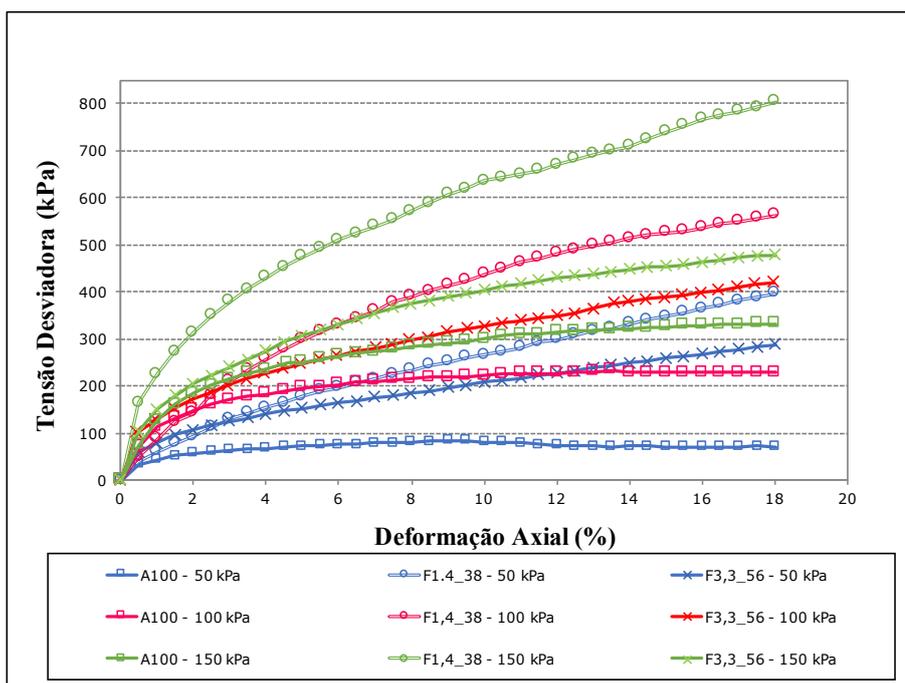


Figura 4-8: Curva tensão desviadora vs deformação axial para areia pura e misturas.

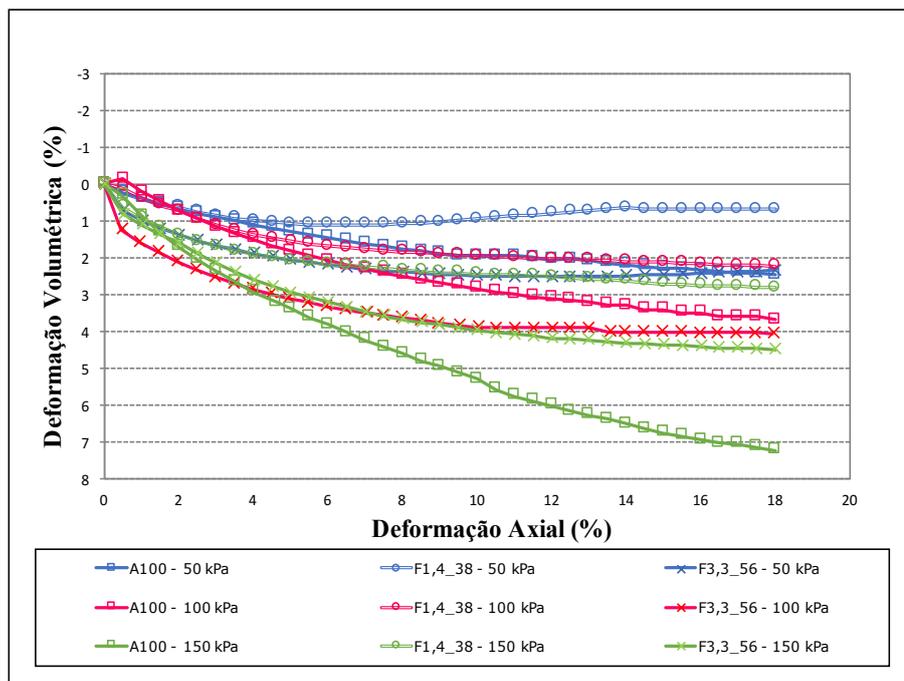


Figura 4-9: Curva variação volumétrica vs deformação axial para areia pura e misturas.

É possível perceber que desde o início dos ensaios, para uma deformação axial de aproximadamente 0,5%, tem-se o ponto de inflexão de todas as curvas obtidas, onde a resistência do material deixa de ser controlada apenas pela matriz arenosa e começa a ser influenciada pela presença da fibra PET, sendo perceptível a diferença de comportamento entre as curvas tensão vs deformação axial do compósito solo-fibra, e que a contribuição da adição de fibras PET permanece visível até a deformação axial limite, estipulada em 18%.

A partir de um certo ponto, aproximadamente na deformação axial de 2%, nota-se um comportamento paralelo entre as curvas tensão-deformação da mistura reforçada com fibra PET, onde as curvas se apresentam sempre crescentes para os compósitos areia-fibras PET, para todas as tensões confinantes estudadas. Este fator ocorre devido à existência de uma taxa de acréscimo de resistência única em relação à deformação axial, a partir do momento em que as fibras são mobilizadas. O mesmo foi observado por (Casagrande, 2005), quando estudou fibras de polipropileno.

### 4.3.3 Trajetórias de Tensões e Parâmetros de Resistência ao Cisalhamento

São apresentadas e comparadas as trajetórias de tensões e parâmetros de resistência ao cisalhamento obtidas através dos ensaios triaxiais CID. As trajetórias estão plotadas no espaço  $p'$  x  $q$  e todas foram obtidas para uma deformação axial de 18%. Os parâmetros apresentados estão de acordo com o critério de ruptura de Mohr-Coulomb.

A Figura 4-10 apresenta a trajetória para a areia pura (A100). Os parâmetros obtidos são valores esperados para uma areia, de acordo com a literatura.

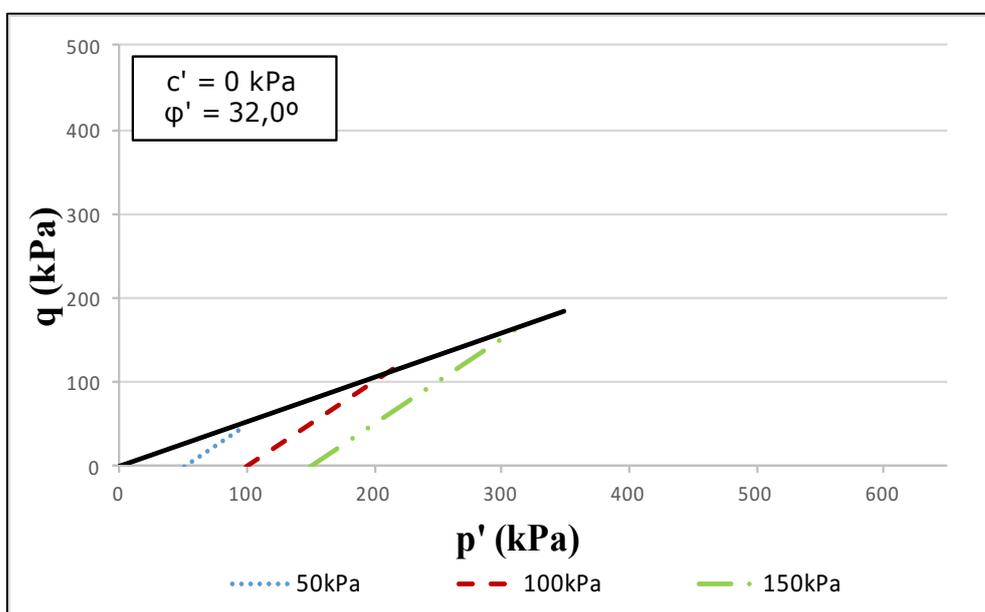


Figura 4-10: Trajetória de tensões e parâmetros de resistência para areia pura (A100).

A Figura 4-11 apresenta a trajetória para o compósito 1 (0,5% de fibras com 1,4 dtex e 38 mm de comprimento). Nota-se que a adição de fibras causa um aumento tanto no intercepto coesivo quanto no ângulo de atrito interno da matriz arenosa.

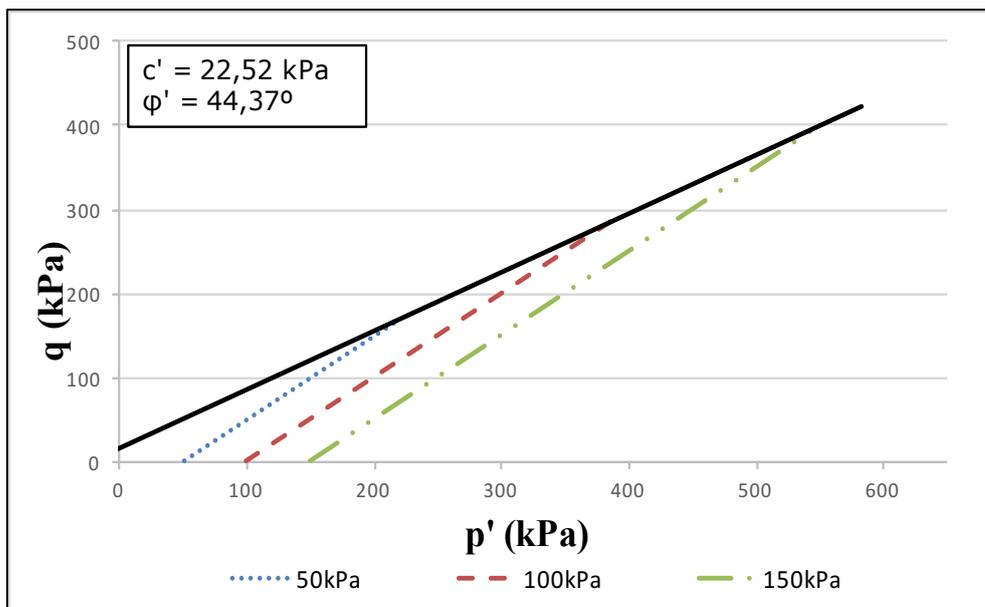


Figura 4-11: Trajetória de tensões e parâmetros de resistência para compósito 1 (F1,4\_38).

A Figura 4-12 apresenta a trajetória para o compósito 2 (0,5% de fibras com 3,3 dtex e 56 mm de comprimento). Também se encontra melhorias, com o aumento do intercepto coesivo e uma leve redução do ângulo de atrito interno.

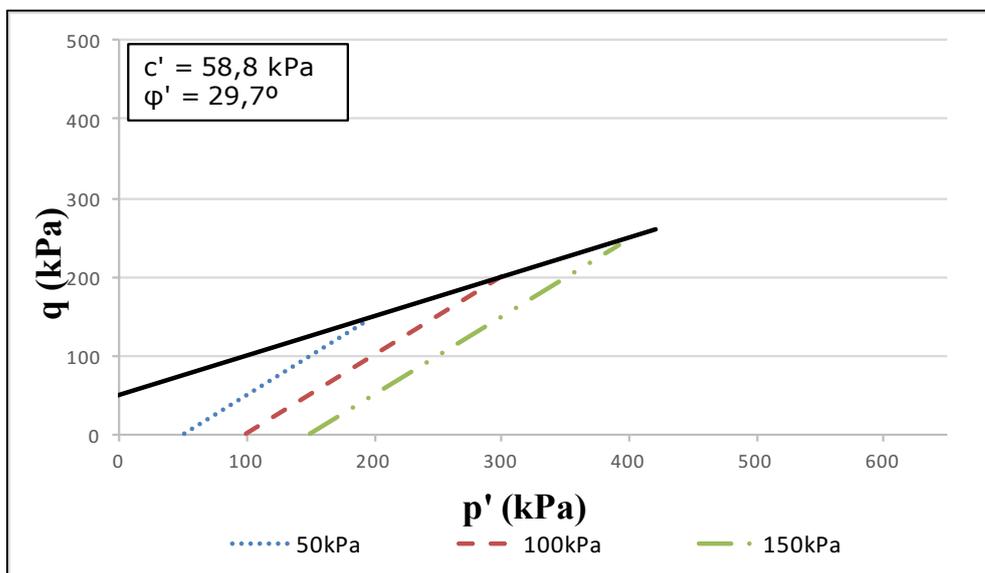


Figura 4-12: Trajetória de tensões e parâmetros de resistência para compósito 2 (F3,3\_56).

A Figura 4-13 apresenta uma comparação entre as três trajetórias de tensões encontradas.

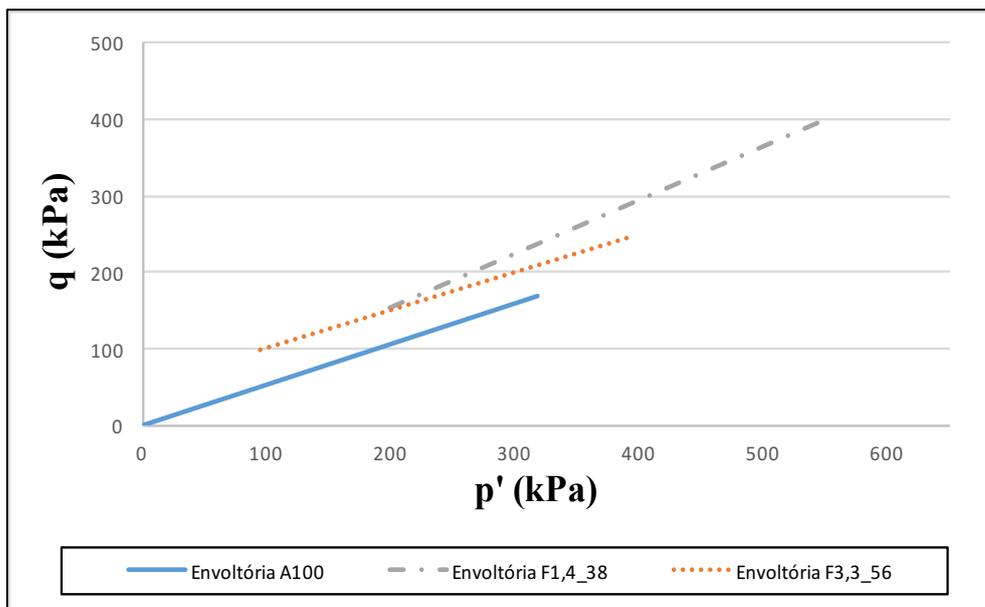


Figura 4-13: Comparação entre trajetórias de tensões da areia e compósitos.

A adição de fibras PET provocou um aumento no intercepto coesivo do material nas duas diferentes misturas. Para a mistura com fibras de menor diâmetro (1,4 dtex) ocorreu um aumento no ângulo de atrito, enquanto que para a mistura com fibras de maior diâmetro (3,3 dtex), o ângulo de atrito sofreu uma pequena redução. Mesma com esta pequena redução do ângulo de atrito encontrada para as fibras PET de 3,3 dtex, obteve-se um ganho na resistência ao cisalhamento do compósito, que pode ser comprovado pela curva apresentada na figura acima. Ao misturar o solo com a fibra de maneira aleatória, era visível a formação de um emaranhado de fibras entre os vazios do solo, causando um efeito de ancoragem entre grãos. Este efeito pode ser compreendido principalmente pelo aumento do intercepto coesivo, comprovado pelos resultados obtidos.

Assim como observado por Casagrande (2005), percebe-se uma tendência de que para baixas tensões de confinamento, a trajetória de tensão do compósito apresenta um comportamento diferente ao da areia, caracterizado pelo aumento ou redução do ângulo de atrito e aumento de coesão. Já para maiores tensões de confinamento, as trajetórias da areia e da areia-fibra PET apresentam um comportamento similar, com ângulo de atrito equivalentes, porém com intercepto coesivo elevado para o compósito, o que caracteriza uma bilinearidade das envoltórias de resistência da areia-fibra PET.

A Tabela 4-3 apresenta um resumo dos parâmetros de resistência encontrados para a areia pura e misturas areia-fibras PET.

Tabela 4-3: Resumo dos parâmetros de resistência encontrados para a areia e compósitos estudados.

Material	$c'$ (kPa)	$\phi'$ (°)
A100	0	32
F1,4_38	22,5	44,4
F3,3_56	58,8	29,7

#### 4.3.4 Energia de Deformação Absorvida

A energia de deformação absorvida pela areia e misturas areia-fibras PET (0,5% de fibras com 1,4 dtex e 38 mm de comprimento e 3,3 dtex e 56 mm de comprimento) foi calculada para a deformação axial de 18% através dos ensaios triaxiais de compressão realizados.

A Figura 4-14 apresenta os dados de energia absorvida para a areia e misturas areia-fibra, para os diferentes níveis de tensão utilizados nos ensaios triaxiais.

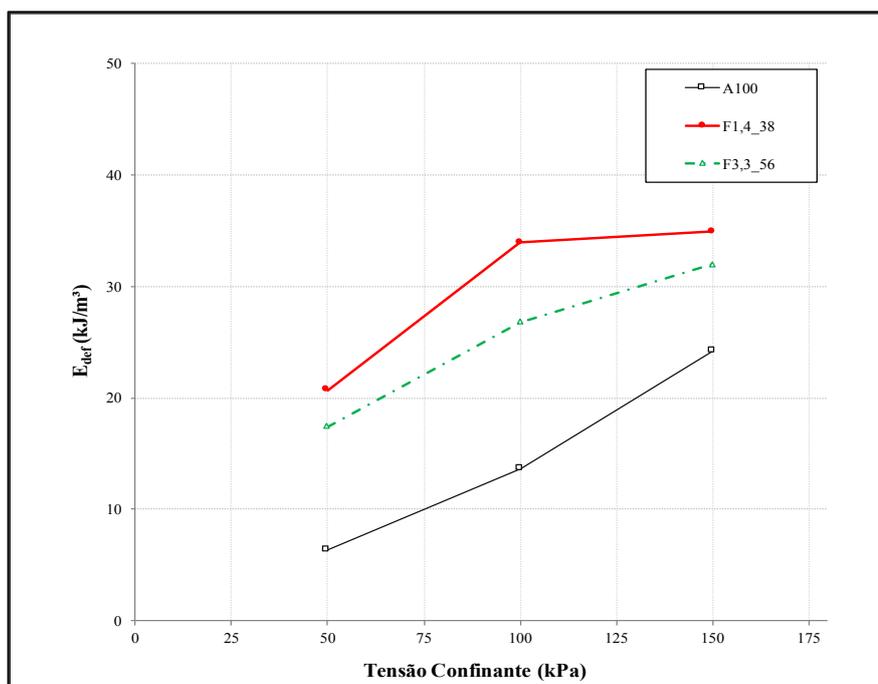


Figura 4-14: Energia de deformação absorvida nos ensaios triaxiais de compressão realizados para a areia e misturas areia-fibras PET.

A inclusão de fibras PET à matriz de areia tem influência positiva na tenacidade para todos os níveis de tensão estudados. Observa-se também que, em todos os níveis de tensão, a taxa de aumento da energia de deformação absorvida não é linear. O compósito com fibras de 1,4 dtex com 38 mm de comprimento apresentam um maior aumento da energia de deformação do que o compósito com fibras de 3,3 dtex com 56 mm de comprimento, mas os dois compósitos, ao serem comparados com a areia, apresentam uma maior taxa de aumento da energia de deformação absorvida.

A Tabela 4-4 apresenta os resultados encontrados para a energia de deformação absorvida para a areia e misturas areia-fibras PET.

Tabela 4-4: Resultados da energia de deformação absorvida da areia e misturas areia-fibras PET estudadas.

$\sigma_c'$	Areia	F1,4_38	F3,3_56
	$E_{def18\%}$ (kJ/m <sup>3</sup> )	$E_{def18\%}$ (kJ/m <sup>3</sup> )	$E_{def18\%}$ (kJ/m <sup>3</sup> )
50	6,32	20,69	17,4
100	13,65	33,92	26,77
150	24,22	34,89	31,98

#### 4.3.5 Alongamento Médio das Fibras

Para se ter uma melhor compreensão de como as fibras PET se comportam dentro da matriz da areia, foram realizadas medições do comprimento das fibras, extraídas dos corpos de prova, após a execução dos ensaios triaxiais de compressão axial. Os resultados apresentados representam uma média de 50 medições de fibras, escolhidas e retiradas aleatoriamente do interior do corpo de prova, após a realização dos ensaios. A Figura 4-15 apresenta a média da variação dos comprimentos das fibras para cada nível de tensão, para o compósito 1 (0,5% de fibras com 1,4 dtex e 38 mm de comprimento).

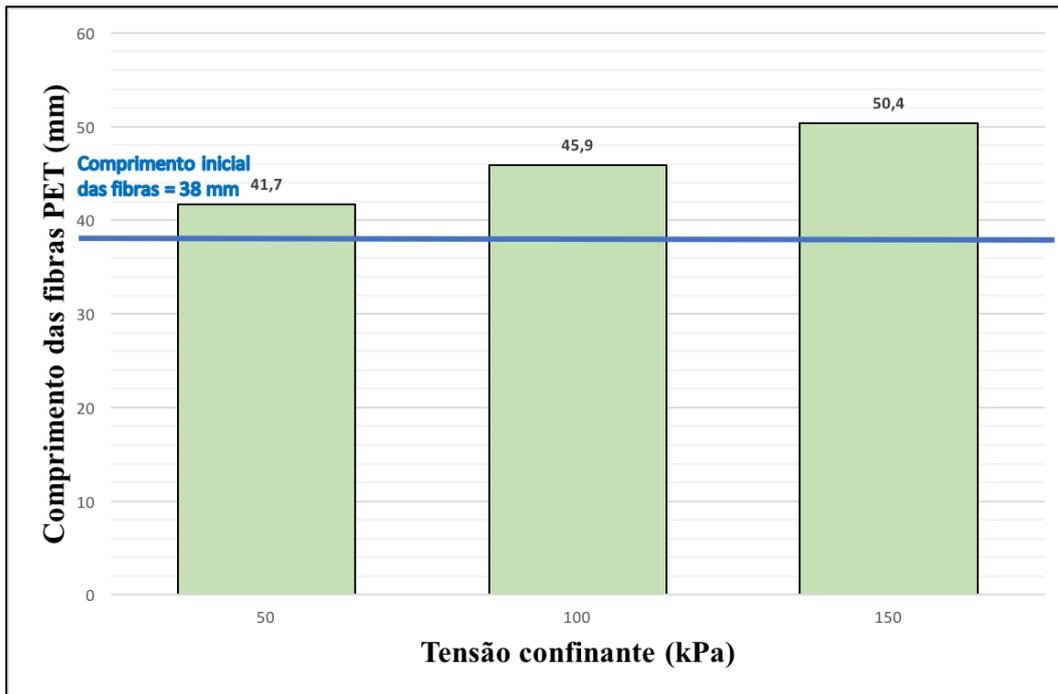


Figura 4-15: Comprimento médio final das fibras PET para o compósito 1 (F1,4\_38) após execução dos ensaios triaxiais.

É possível analisar que as fibras se alongaram em todos os ensaios realizados, agindo significativamente dentro da matriz de areia e contribuindo para o aumento da resistência do material compósito. O alongamento médio das fibras PET na mistura 1 atingiu, para a tensão de 150 kPa, um valor de 32,6% do seu comprimento inicial (38 mm), sendo encontrados comprimentos mínimo e máximo de 43,4 mm e 61,69 mm, respectivamente e um desvio padrão (DP) de 3,71. Para a tensão de 50 kPa foi encontrado comprimento mínimo de 38,35 mm e máximo de 56,54 mm e DP de 3,78. Para a tensão de 100 kPa, os comprimentos mínimo e máximo foram 39,46 mm e 55,58 mm, respectivamente e um DP de 3,71.

As fibras PET do compósito 2 (0,5% de fibras com 3,3 dtex e 56 mm de comprimento) também apresentaram um alongamento médio superior ao seu comprimento inicial (56 mm), sendo este alongamento, para a tensão confinante de 150 kPa, igual à 21%. Os comprimentos mínimo e máximo encontrados foram iguais a 60,45 mm e 79,72 mm, respectivamente e um desvio padrão de 4,66. Apesar das fibras de 38 mm terem obtido um alongamento médio maior que as fibras de 56 mm, as duas fibras PET contribuíram de maneira efetiva para o aumento da resistência do material compósito.

Segundo Casagrande (2005), as fibras tendem a sofrer grandes deformações plásticas de tração, sendo solicitadas sucessivamente após estágios de alongamento e consequente ruptura. Foi possível observar que quanto maior a tensão de adensamento, maior foi o alongamento médio encontrado para as fibras, independente do comprimento inicial destas. Em nenhum dos ensaios triaxiais realizados foi possível observar a ruptura, apesar de terem sido encontradas poucas fibras com o comprimento final menor que o inicial, mas para maiores tensões efetivas, é possível que as fibras possam vir a se romper.

#### **4.4**

#### **Ensaio em Modelo Físico Reduzido**

Neste item serão apresentados os resultados obtidos através dos ensaios de prova de carga em placa e de simulação de talude. Foram realizados ensaios em amostras de solo puro e compósito solo-fibra com teor de fibra PET de 0,5% calculados em relação ao peso seco do solo, utilizando fibra de 1,4 dtex com 38 mm de comprimento, pois apresentou melhor resultado nos ensaios triaxiais.

Os recalques medidos e as cargas aplicadas serão apresentados em um gráfico carga x recalque. Também serão apresentados os gráficos para as leituras observadas pelos transdutores de deslocamento, além da análise da influência das fibras no comportamento do solo e os diferentes mecanismos de ruptura encontrados para cada ensaio.

##### **4.4.1**

##### **Ensaio de Carga em Placa**

###### **4.4.1.1**

###### **Areia**

Na Figura 4-16 é apresentado a curva carga vs recalque referente ao ensaio de placa realizado na areia (A100). Os ensaios foram conduzidos até o limite de deslocamento do sistema utilizado.

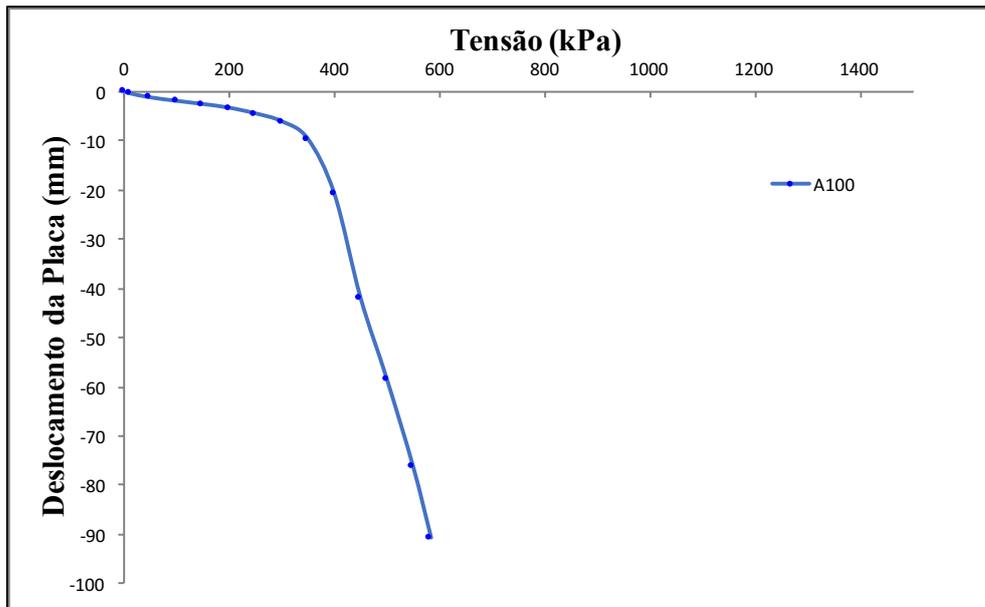


Figura 4-16: Comportamento carga-recalque para a areia (A100).

A carga máxima registrada para o ensaio com a areia foi de 584,16 kPa com um recalque medido de 90,74 mm. As leituras dos transdutores ao redor da placa são apresentadas na Figura 4-17.

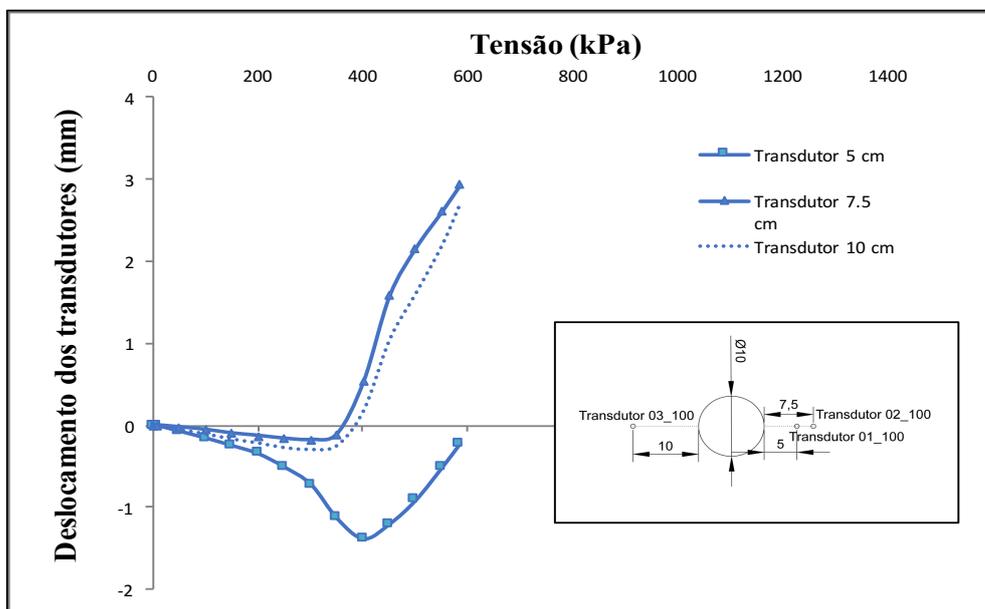


Figura 4-17: Leituras dos transdutores de deslocamento ao lado da placa para ensaio de placa na areia (A100)

De acordo com Vesic (1973), o tipo de ruptura irá ocorrer dependendo da compressibilidade relativa do solo. Nota-se que, inicialmente, o solo abaixo dos

transdutores sofreu um recalque à medida que a carga aumentava, mas posteriormente, foi possível notar um visível levantamento da areia nas bordas. Este fenômeno corrobora com a teoria da ruptura localizada, onde se tem a formação de uma cunha junto às bordas da fundação e uma notável tendência de levantamento do solo ao redor da fundação, que ocorre devido aos grãos de areia que começam a se “empurrar” (Figura 4-18).

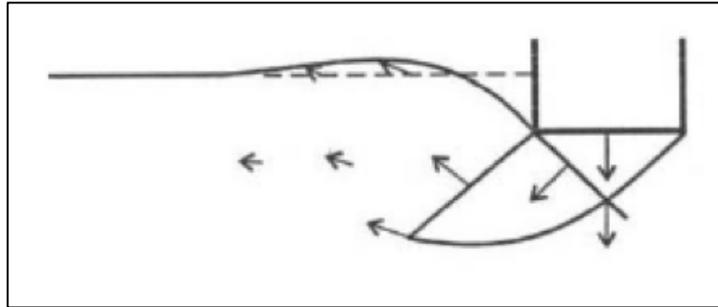


Figura 4-18: Campo de deslocamento da ruptura localizada (Lopes, 1979).

A Figura 4-19 apresenta as fissuras obtidas para o ensaio de placa na areia. A Figura 4-20 apresenta o corte realizado no solo após a execução do ensaio, com o objetivo de analisar as deformações obtidas no solo.



Figura 4-19: Fissuras encontradas na areia após a realização do ensaio de placa.

É possível notar que as fissuras originadas no ensaio da areia aparecem radialmente à placa.

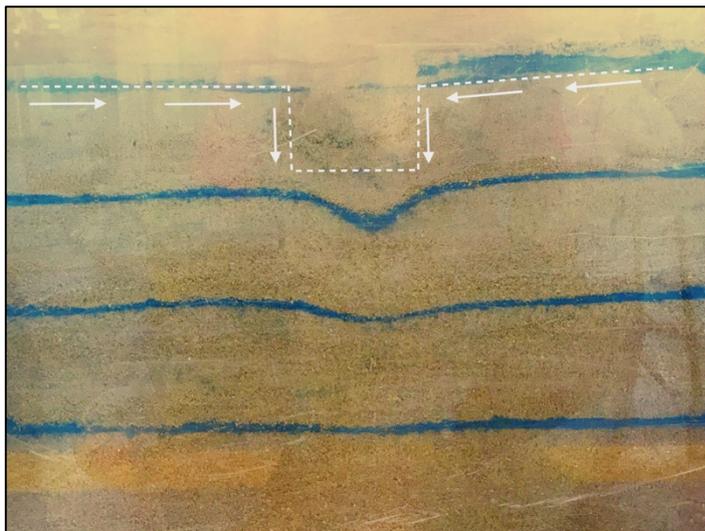


Figura 4-20: Exumação após ensaio de placa na areia.

Na exumação da areia, notou-se que a primeira camada de tinta azul foi levada pela placa à medida que esta se deslocava. Isto ocorreu porque foi colocada areia azul apenas no eixo da placa. Para os ensaios seguintes, este procedimento foi corrigido. É visível que as deformações não afetaram a última camada de areia azul, o que era esperado, tendo em conta que o bulbo de tensões previsto era cerca de duas vezes o diâmetro da placa. Também percebe-se um pequeno levantamento do solo no entorno da placa, característica de uma ruptura localizada.

#### **4.4.1.2 Compósito Areia-Fibra PET**

A Figura 4-21 apresenta a curva carga vs recalque referente ao ensaio de placa realizado para o compósito areia-fibra (0,5% de fibras com 1,4 dtex e 38 mm de comprimento). Os ensaios também foram conduzidos até o limite de deslocamento do sistema utilizado.

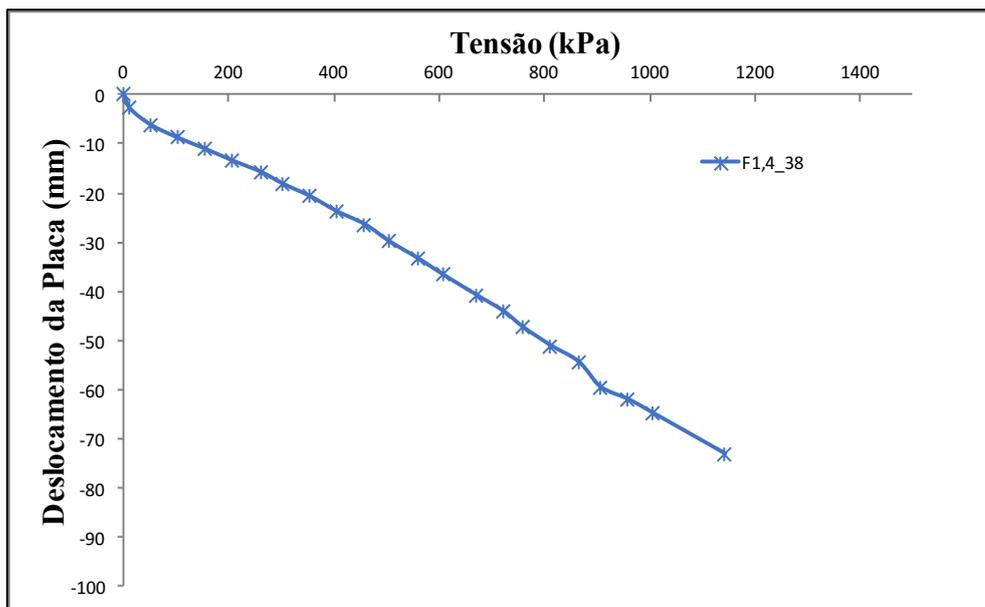


Figura 4-21: Comportamento carga-recalque para o compósito solo-fibra PET (F1,4\_38).

A carga máxima registrada para o ensaio com a mistura foi de 1141,64 kPa com um recalque medido de 73,11 mm. As leituras dos transdutores ao redor da placa são apresentadas na Figura 4-22.

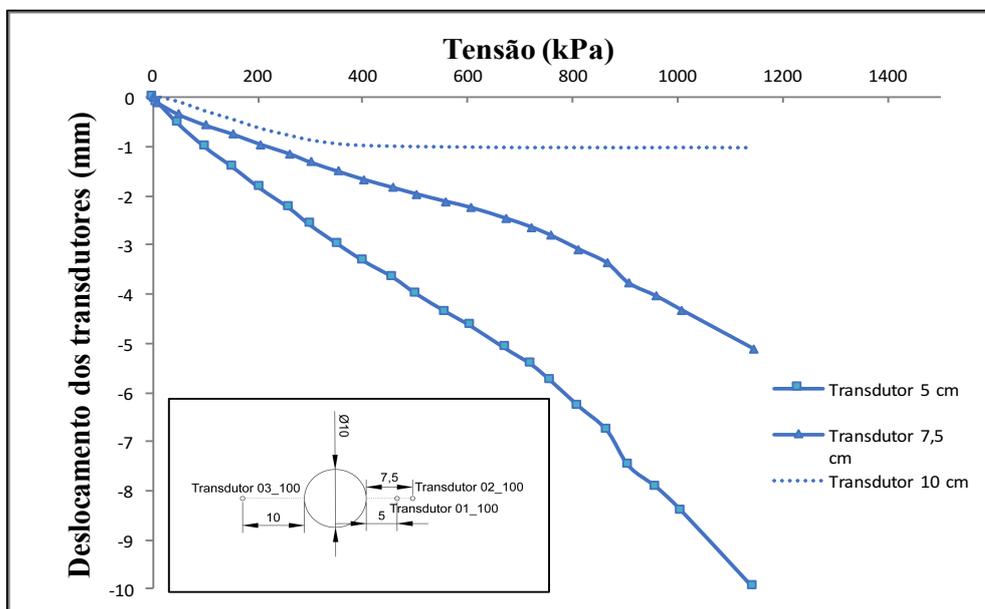


Figura 4-22: Leituras dos transdutores de deslocamento ao lado da placa para ensaio de placa no compósito areia-fibra PET.

É possível analisar e definir, através das leituras realizadas pelos transdutores de deslocamento, que para o compósito solo-fibra, ocorre uma

ruptura por punção, onde o movimento vertical da fundação é acompanhado pela compressão do solo imediatamente abaixo, e a penetração da fundação se dá pelo cisalhamento vertical em torno da fundação. O solo ao redor, praticamente não participa do processo (Figura 4-23).

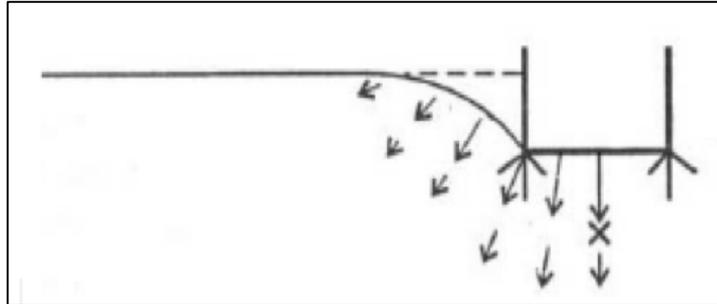


Figura 4-23: Campo de deslocamento da ruptura por punção (Lopes, 1979).

A Figura 4-24 apresenta as fissuras obtidas para o ensaio de placa no compósito solo-fibra. A Figura 4-25 apresenta o corte realizado no solo após a execução do ensaio, com o objetivo de analisar as deformações obtidas na mistura.



Figura 4-24: Fissuras encontradas na mistura areia-fibra PET após a realização do ensaio de placa.



Figura 4-25: Exumação após ensaio de placa na mistura areia-fibra PET.

Diferentemente do encontrado no ensaio de placa na areia, observa-se a formação de fissuras circulares no compósito areia fibras-PET, concentradas no entorno da placa. Esse efeito é ocasionado devido às fibras que ocasionam em uma distribuição mais uniforme das tensões aplicadas.

Na exumação da mistura, se teve dificuldade de realizar o processo devido à aderência que a fibra tinha com os grãos de areia na hora de realizar o corte. Como não era esperado deformações na quarta camada de areia, optou-se por não colocar esta última camada de areia azul e aproximou-se mais a terceira camada da segunda camada. Nota-se que devido à uma maior distribuição da tensão no solo, a terceira camada, mesmo mais próxima da superfície, sofreu apenas uma leve deformação.

#### 4.4.1.3 Influência da Adição de Fibras PET

A adição de fibras PET à matriz da areia gera uma mudança expressiva no comportamento carga-recalque, sendo capaz de suportar quase o dobro de carga com um menor recalque, se comparado à areia pura. Também foi observado que a adição de fibras à matriz de areia ocasiona uma mudança no tipo de ruptura do solo, onde encontrou-se uma ruptura localizada para a areia e uma ruptura por puncionamento no compósito areia-fibras PET.

A Figura 4-26 apresenta um comparativo entre as curvas carga-recalque obtidas para a areia e para o compósito solo-fibra.

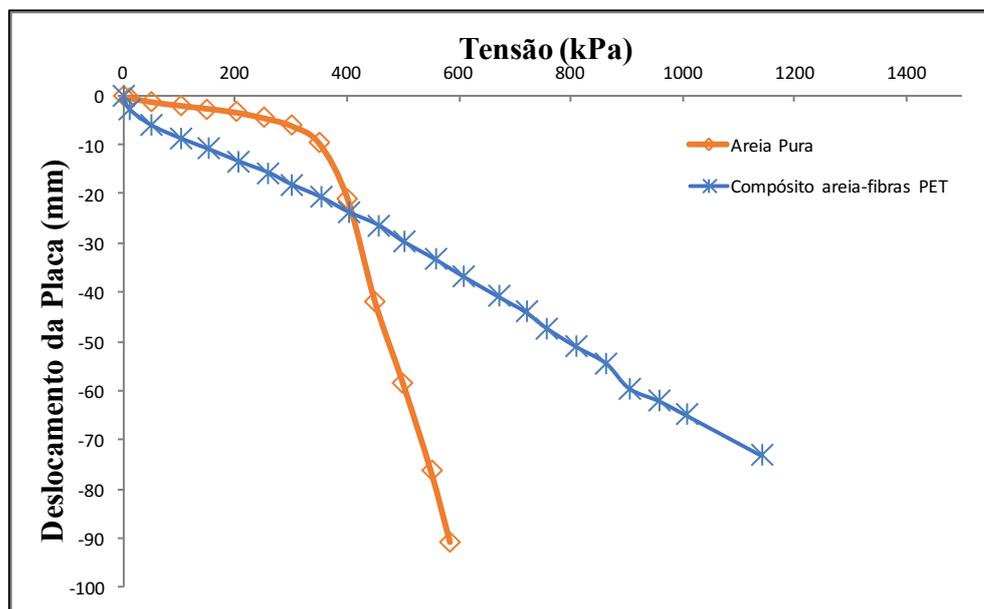


Figura 4-26: Curvas carga-recalque obtidas para os ensaios de placa.

Nota-se que a areia possui um menor deslocamento do que a mistura de areia com fibra até os 400 kPa. Segundo Sotomayor (2014), isto pode ser causado devido à uma maior compactação da areia sem fibra no momento da conformação das últimas camadas. Outra possível explicação se deve ao volume que as fibras proporcionam ao compósito, o que dificultou o processo de compactação da mistura areia-fibra PET, possuindo um índice de vazios inicial maior. Com a aplicação de carga, a placa vai se “acomodando” inicialmente até o momento em que ocorre o assentamento desta e então se começa a ter as características reais do compósito.

Após essa tensão de 400 kPa, é visível a mudança no comportamento da curva carga-recalque, ou seja, é neste instante em que as fibras começam a agir. Ou seja, depois de atingida a tensão de ruptura da areia, o compósito areia-fibra ainda resiste às tensões atuantes, sempre com resistência crescente.

Analisando os dados obtidos, observa-se que a fibra utilizada na mistura diminui o recalque, se comparado à areia quando submetida a maiores solicitações de tensões, atingindo uma redução no recalque medido de até 60%, se comparado

à matriz arenosa. Isto ocorre porque as fibras distribuem melhor as tensões atuantes.

Sotomayor (2014) obteve um resultado próximo ao encontrado, mas para o reforço do solo com fibra de coco dispostas em manta. O fato da fibra PET utilizada na presente pesquisa ser mais fina e mais volumosa pode ser uma explicação para este comportamento. Para um mesmo teor, a fibra PET se comportou mais como um geossintético do que de maneira aleatória.

A Tabela 4-5 apresenta uma comparação entre os recalques encontrados para tensões acima de 400 kPa entre a areia e o compósito areia-fibra.

Tabela 4-5: Comparação entre recalques para tensões acima de 400 kPa para a areia e areia-fibra.

Tensão (kPa)	Recalque		Redução do recalque (%)
	Areia	Areia-Fibra	
400	20,92	23,64	-13%
450	41,98	26,39	37%
500	58,46	29,75	49%
550	76,4	33,33	56%
584	90,74	34,88	62%

A Figura 4-27 faz uma análise dos perfis da areia e areia-fibras PET após o término dos ensaios de placa, juntamente com a variação das posições dos transdutores de deslocamento, o recalque final e a carga máxima, sendo possível visualizar também a mudança do tipo de ruptura em cada ensaio.

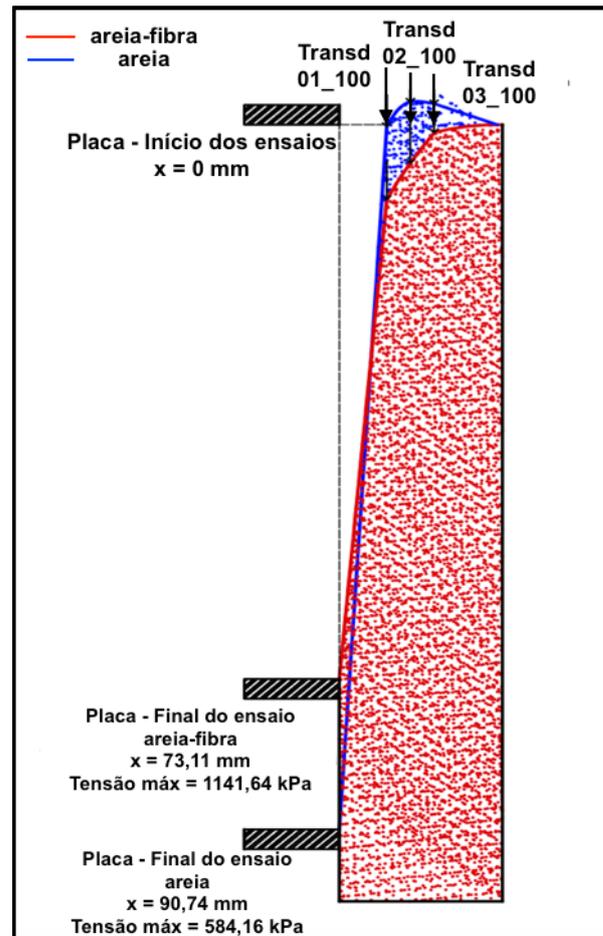


Figura 4-27: Comparação entre os perfis de areia e areia-fibra após o término dos ensaios de placa.

Para o ensaio de prova de carga em placa realizado na areia, observa-se o levantamento do solo ao redor da placa, típico de uma ruptura localizada. No perfil da areia-fibra é possível observar que o solo ao redor não participa do processo, recalando à medida que a carga é acrescida, típico de uma ruptura por punção.

Uma possível explicação para a mudança de ruptura entre os ensaios de placa na areia e na mistura areia-fibra pode estar ligado à maneira como os grãos de areia se unem as fibras, gerando uma certa coesão aparente ao solo, produzindo um acréscimo na resistência ao deslocamento da areia. Assim, a tensão aplicada que era transmitida diretamente para a areia, pode ser dissipada e transmitida na massa do compósito areia-fibra, prevenindo a ruptura localizada.

#### 4.4.1.4 Comparação dos Resultados Obtidos com a Literatura Existente

Dentre todas as pesquisas apresentadas previamente, que estudaram sobre solo reforçado com fibras submetido a ensaio de carga em placa, as que mais se assemelham ao presente trabalho são as pesquisas feitas por Casagrande (2005) e Sotomayor (2014).

A seguir, apresentam-se todas as variáveis de cada estudo que podem vir a influenciar nos resultados de um trabalho sobre solos reforçados com fibras. São elas: (i) equipamentos utilizados; (2) solo utilizado para a pesquisa; (3) fibras utilizadas como reforço. Todas essas variáveis são apresentadas na Tabela 4-6. Nas quatro pesquisas foram utilizados os mesmos parâmetros para moldagem dos ensaios, como densidade relativa de 50%, teor de umidade de 10%, teor de fibra de 0,5% e espessura das camadas de 0,1 m.

Tabela 4-6: Características dos equipamentos.

Estudo	Dimensões da Caixa de Ensaio	Diâmetro da Placa (m)	Sistema de reação (kN)	Tipo de Solo	Tipo de Fibra	Comprimento da Fibra (mm)	Diâmetro da Fibra (dtex)
Casagrande (2005)	1,9x1,9x0,8	0,3	250	areia fina	polipropileno	24	3,3
Sotomayor (2014)	1,4x1,4x1,2	0,3	250	areia grossa	coco	50	não especificado
Senez (2016)	0,8x0,4x0,45	0,1	100	areia média	PET	38	1,4

A seguir, apresenta-se a Figura 4-28 que mostra as curvas carga-recalque da areia sem reforço e com reforço dos estudos citados anteriormente.

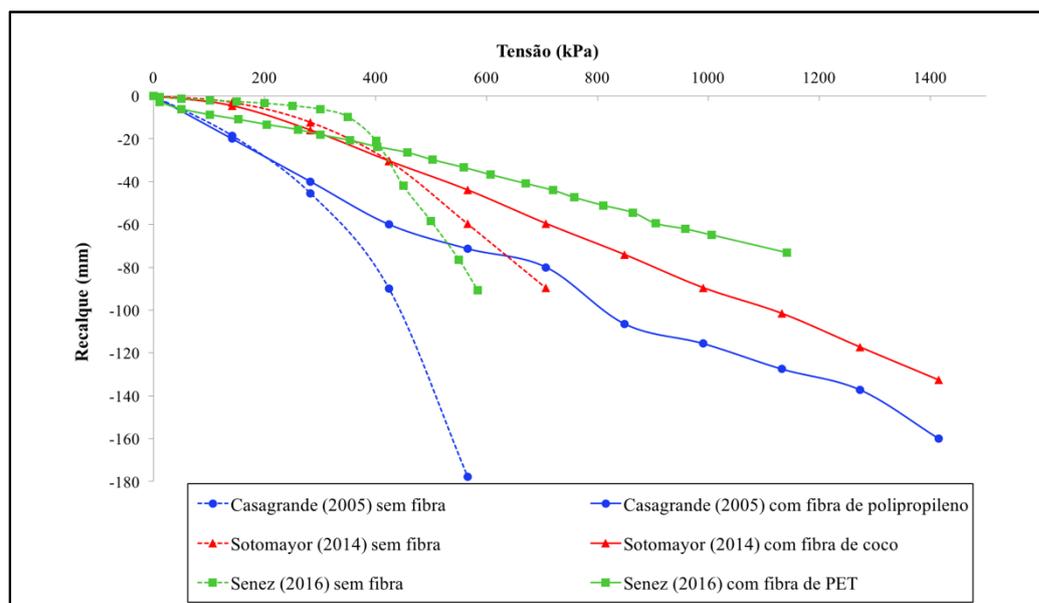


Figura 4-28: Comparação dos resultados obtidos com outros estudos existentes.

Percebe-se que para todos os estudos, a adição aleatória de fibra à matriz arenosa é eficaz no objetivo de reduzir os recalques, quando comparado ao solo não reforçado.

Todas as curvas apresentam uma tendência parecida, ao serem submetidas a grandes carregamentos. As curvas dos ensaios realizados na areia, para todos os estudos, apresentaram um comportamento similar de ruptura localizada. Para o compósito areia-fibras PET, observa-se uma tendência entre as curvas, sendo estas sempre crescentes e quase paralelas. Eventuais diferenças podem ser explicadas pela variabilidade dos materiais utilizados em cada pesquisa. O diâmetro da placa utilizado na presente pesquisa é menor do que todos os outros, o que pode causar um melhor comportamento resistente e mais rígido do compósito. O comprimento das fibras utilizadas também é um fator importante na resistência ao cisalhamento do compósito. O tipo de solo é outro fator que pode vir a causar diferenças, visto que a areia grossa possuía uma maior resistência ao deslocamento do que a areia média e fina. A diferença encontrada no início do ensaio, quando comparada com as demais pesquisas, apresentando um comportamento menos rígido, pode ter ocorrido devido à uma falta de compactação da mistura.

Os mecanismos de ruptura localizada para a areia sem reforço e ruptura por puncionamento para a areia com reforço de fibra PET confirmam os resultados obtidos por Casagrande (2005) e Sotomayor (2014), os quais apresentaram a mesma resposta reforçando a areia com fibras de polipropileno e fibras de coco.

Ressalta-se que, mesmo se tratando de um modelo físico reduzido, onde as dimensões utilizadas para a realização dos ensaios são menores do que as das demais pesquisas, observou-se um comportamento similar entre as curvas, apresentando uma tendência e um paralelismo entre elas. Portanto, a redução da escala não é uma variável que influencia no resultado final.

#### 4.4.2 Ensaio de Simulação de Talude

A Figura 4-29 apresenta as leituras horizontais medidas pelos transdutores de deslocamento para a areia e para o compósito areia-fibras PET.

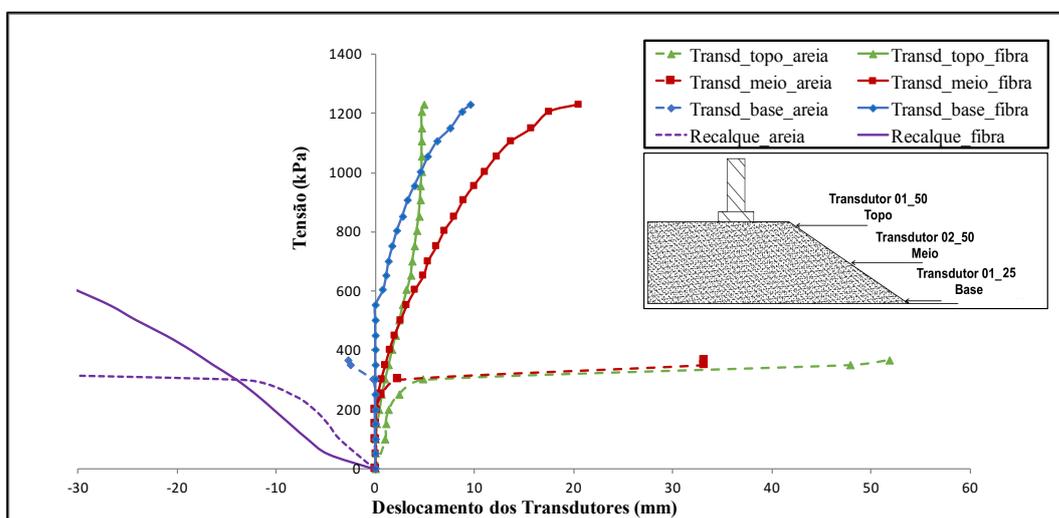


Figura 4-29: Leituras dos transdutores de deslocamento horizontal para as simulações de talude na areia e no compósito areia-fibras PET.

Percebe-se uma mudança no comportamento do solo, onde os deslocamentos horizontais medidos para o compósito areia-fibra foram reduzidos significativamente mesmo com um maior acréscimo de carga. As leituras obtidas no ensaio da areia para o transdutor do topo foram maiores que as leituras do meio e da base, o que condiz com a superfície de ruptura formada no solo, pois ao romper, o solo no topo do talude sofreu um levantamento. Percebe-se também que o transdutor disposto na base do talude sofreu deslocamento contrário aos outros transdutores. Isso ocorre, pois, ao romper, o solo transpassou o nível do transdutor da base, permanecendo sobre o mesmo e impossibilitando a sua real leitura.

O talude simulado com o compósito areia-fibra PET sofreu ruptura a tensões mais elevadas, suportando aproximadamente três vezes mais carga que a simulação realizada com a areia. Analisando os dados obtidos, percebe-se que o talude da mistura sofreu um “embarrigamento” no meio da sua superfície, sendo este ponto o de maior deslocamento medido.

Observa-se que as deformações horizontais no compósito só começam a ocorrer aproximadamente a partir da tensão de 300 kPa, que é a mesma tensão onde ocorre a ruptura da areia. Assim, pode-se afirmar que quando o solo não suporta mais as cargas aplicadas e tenderia a romper, as fibras começam a agir, “segurando” o talude e impedindo que ocorra a sua ruptura. Também é possível observar um paralelismo entre as curvas de deslocamento horizontal tanto da base quanto do meio do talude. O topo do talude no início do ensaio aparentava um deslocamento similar ao do meio do talude, mas após atingir a tensão de aproximadamente 550 kPa, praticamente estabilizou as suas leituras, se deslocando lentamente em relação aos outros pontos de medição.

Na Figura 4-30 e Figura 4-31 pode-se observar as fissuras encontradas para o ensaio de placa em talude na areia e no compósito areia-fibra PET, respectivamente. A placa foi situada a aproximadamente 13,5 cm do topo do talude, com o objetivo de simular um evento mais crítico.



Figura 4-30: Fissuras encontradas na areia após a realização da simulação de talude.

Observam-se fissuras radiais à placa, com profundidade e largura considerável, para o ensaio da areia. Devido ao comportamento da areia durante a simulação, percebe-se uma tendência do solo em romper a partir do escorregamento em cunha do talude.



Figura 4-31: Fissuras encontradas no compósito areia-fibra PET após a realização da simulação de talude.

Para o ensaio realizado no compósito, nota-se fissuras circulares ao redor da placa e fissuras na superfície do talude, que ocorrem devido à uma melhor distribuição das tensões no solo, além do seu “embarrigamento”, na região central do talude.

São apresentados os resultados obtidos das exumações, após a realização dos ensaios de simulação de talude. Na Figura 4-32, é mostrada a exumação do ensaio da areia. É possível observar a formação de uma superfície de ruptura, consequência da carga aplicada e do levantamento sofrido pelo talude.



Figura 4-32: Exumação após ensaio de simulação de talude na areia.

A Figura 4-33 apresenta a exumação do ensaio no compósito solo-fibra. Foi encontrado alguma dificuldade em realizar o processo, pois as fibras no momento do corte “puxavam” o solo e era necessário ter cuidado na exumação e o processo teve de ser feito lentamente. Nota-se uma possível superfície de ruptura, sugerindo a formação de uma ruptura circular. Também percebe-se que a carga aplicada no ensaio do compósito foi muito mais elevada que no ensaio da areia, onde as camadas azuis se aproximam mais uma da outra, fato que não é visível na simulação de talude da areia.



Figura 4-33: Exumação após ensaio de simulação de talude no compósito areia-fibra PET.

Para se ter uma melhor visualização do ocorrido ao final das simulações, montou-se um esquema com os dados obtidos no instante final dos ensaios, apresentado pela Figura 4-34. Por se trabalhar com medidas pequenas, na casa do milímetro, a visualização das leituras na escala real acaba sendo dificultada, logo, optou-se por montar o esquema com a escala ampliada em dez vezes.

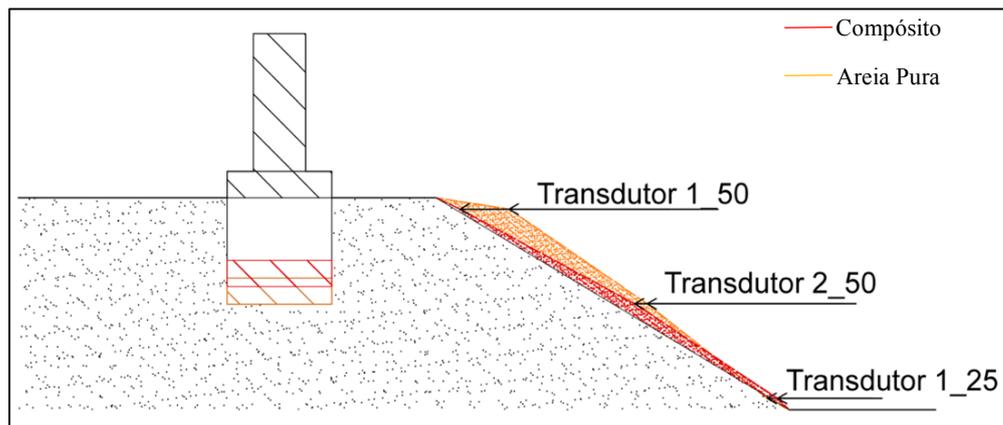


Figura 4-34: Instante final das simulações de talude para a areia e o compósito areia-fibra PET. Escala ampliada 10x.

Através deste esquema ampliado, consegue-se entender melhor o que foi apresentado pelo gráfico com as leituras horizontais dos transdutores de deslocamento. No ensaio da areia, o topo sofre um levantamento devido à formação de fissuras radiais à placa na sua superfície, o que não ocorre no ensaio realizado para o compósito areia-fibra PET, que sofre o efeito de “embarrigamento”, que agora pode ser melhor visualizado. Ressalta-se que para a mesma tensão de ruptura do talude na simulação da areia, o compósito não apresentou ruptura, apenas deformações. A ruptura apenas veio a ocorrer no final do ensaio, quando a carga já era de aproximadamente três vezes a carga máxima aplicada no ensaio da areia.

## 5 Conclusão

### 5.1 Conclusões Gerais

Neste capítulo final, serão apresentadas as conclusões obtidas através dos resultados apresentados e analisados nos capítulos anteriores. São apresentadas as principais conclusões relacionadas à adição de fibras PET sobre o comportamento mecânico da areia reforçada, tanto em relação à resistência ao cisalhamento, quanto ao comportamento carga-recalque e mecanismos de ruptura do solo. A influência da adição de fibras PET ao solo gera um novo material geotécnico, com características próprias, o que pode ser observado pela melhora do comportamento do compósito.

- A adição de fibras PET de menor título, 1,4 dtex, provocou um aumento no intercepto coesivo e no ângulo de atrito do material, e consequentemente na resistência do material. Já a adição de fibras PET de maior título, 3,3 dtex, provou um grande aumento do intercepto coesivo e uma leve redução do ângulo de atrito do material, mas também apresentando aumento na resistência do material. Para os títulos de fibras avaliados, quanto menor o título das fibras, maior foi o ganho de resistência mecânica. A adição de fibras aleatoriamente distribuídas na matriz arenosa promove um efeito de ancoragem, observado como um aumento do intercepto coesivo;
- As fibras de 1,4 dtex apresentaram um maior alongamento médio para todos os níveis de tensão de adensamento estudados. Para a tensão de 150 kPa, o alongamento encontrado foi equivalente à 32,6% do seu comprimento inicial (38 mm), enquanto que as fibras de 3,3 dtex apresentaram um alongamento de 21%;
- A energia de deformação absorvida aumenta com a inclusão de fibras PET ao solo, elevando a tenacidade do mesmo. A mistura com fibras PET de 1,4 dtex e 38 mm de comprimento apresentou melhores

resultados, porém, as duas misturas, ao serem comparadas com a areia, exibiram um aumento da energia de deformação absorvida;

- O comportamento resistente do solo reforçado pode ser definido em três etapas distintas: a primeira etapa, onde inicialmente o comportamento do material é controlado basicamente pela matriz arenosa, uma segunda etapa, onde o comportamento do material é controlado em conjunto, tanto pela fibra quanto pela matriz de solo, e uma terceira e última etapa, onde o comportamento do material é controlado apenas pelas fibras;
- A adição de fibras PET à matriz arenosa colabora para um aumento na resistência do solo, diminuindo os recalques medidos em até 60%;
- O reforço de fibras PET dispostos de maneira aleatória no solo acarreta em uma mudança do mecanismo de ruptura do solo, onde no ensaio de placa realizado para a areia sem reforço, se obteve características de ruptura localizada, enquanto que para o compósito solo-fibra, foi obtido uma ruptura por puncionamento. As fibras começam a se mobilizar em um estado de pós-fissuração da matriz arenosa, quando esta não consegue mais resistir às cargas aplicadas;
- A inibição da propagação de fissuras nas zonas mais afastadas ao redor da placa comprova que as fibras dispostas aleatoriamente na matriz do solo distribuem as tensões em uma área maior, evitando a concentração de tensões na área de carregamento. As fibras trabalham por tração, o que causa o efeito de “travar” os grãos do solo e impedir a propagação das fissuras. Para maiores solicitações de carga, a mobilização das fibras impede a propagação das fissuras e reduz os recalques;
- Os deslocamentos horizontais medidos na simulação de talude para o compósito areia-fibras PET foram reduzidos significativamente quando comparados com as leituras obtidas para a simulação de talude da areia. Para o mesmo nível de carga, enquanto a areia sofreu uma ruptura, o compósito apenas sofreu deformações. A ruptura no compósito só aconteceu quando a carga aplicada era de aproximadamente três vezes a carga máxima da areia. Foi possível observar a formação de uma superfície de ruptura circular no compósito, além do embarrigamento do talude, efeito causado pela melhor distribuição de tensões no solo;

- Os resultados obtidos foram satisfatórios, satisfazendo os objetivos desta dissertação, onde a areia reforçada com fibras PET possui propriedades adequadas para possíveis empregos em *liners* de cobertura de aterros sanitários, aterros sobre solos moles e reforço de taludes, aprimorando a diminuição das deformações diferenciais excessivas ocasionadas nestas obras geotécnicas e também aplicação em obras com o objetivo de controlar a erosão. A pesquisa tem contribuição com relação à relevância e à originalidade, por utilizar fibras de garrafas PET recicladas, com possibilidade de eliminar problemas atuais de disposição final de resíduos, dando um fim mais nobre a este material.

## 5.2 Sugestões para Futuros Trabalhos

Com o desenvolver do programa experimental, novas perguntas passam a ser questionadas, mas devido ao cronograma definido previamente para a realização dos ensaios, não foi possível a obtenção destas respostas, portanto, em virtude disso, serão apresentadas algumas possíveis sugestões para futuras pesquisas, com o objetivo de ampliar e compreender melhor o comportamento das fibras PET como material de reforço em trabalhos futuros:

- Analisar o comportamento mecânico de outros tipos de solo reforçado com fibras PET, utilizando outros teores, diâmetros e comprimentos, em diferentes densidades relativas;
- Realizar ensaios triaxiais de extensão em misturas similares ao da presente pesquisa, verificando outros tipos de comportamento;
- Desenvolver modelos constitutivos para análise numérica (utilizando o método de elementos finitos), reproduzindo o comportamento de solos reforçados com fibras PET, o que é de fundamental importância para a simulação de obras geotécnicas, em especial aterros sobre solos moles e cobertura de aterros sanitários;
- Utilizar células de tensão total nos ensaios de placa de carga em modelo físico reduzido, distribuídas nas diferentes camadas para avaliar a

influência do reforço nesses pontos, e fazer comparações com as tensões estimadas pela teoria de elasticidade;

- Realizar outros ensaios de simulação de talude, variando a sua proporção, com o objetivo de analisar possíveis mudanças no comportamento do compósito;
- Realizar ensaios dinâmicos e cíclicos em misturas com fibra PET, visando a sua aplicação em pavimentação.

## 6

### Referências bibliográficas

ABIPET. **Indústria do PET no Brasil**. Associação Brasileira da Indústria do PET, São Paulo, 2013.

ABIPET. **Nono censo da reciclagem do PET no Brasil**. Associação Brasileira da Indústria do PET, São Paulo, 2013.

ARAO, M. **Avaliação do comportamento mecânico de misturas asfálticas com a inserção de Polietileno Tereftalato (PET) triturado**. Dissertação de Mestrado, DEC, PUC – Rio, Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6457**: Amostras de solos – Preparação para ensaios de compactação e caracterização. Rio de Janeiro/RJ, 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7181**: Solo – Análise granulométrica. Rio de Janeiro-RJ, 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6508**: Solo – Determinação da densidade real dos grãos. Rio de Janeiro/RJ, 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 12004**: Solo – Determinação do índice de vazios máximo de solos não coesivos. Rio de Janeiro-RJ, 1990.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 12051**: Solo – Determinação do índice de vazios mínimo de solos não coesivos. Rio de Janeiro-RJ, 1991.

BISHOP, A. W.; HENKEL, D. J. **The measurement of soil properties in the triaxial test**. Edward Arnold Ltd, 2nd ed, p.9-10, 1964.

BOLAÑOS, R. Z. **Comportamento mecânico de um solo argiloso reforçado com fibras de coco**. Dissertação de Mestrado, DEC, PUC – Rio, Rio de Janeiro, 2013.

BUDINSKI, K.G. **Engineering materials, properties and selection**. 5ed. New Jersey: Prentice Hall International, 653p., 1996.

CASAGRANDE, M.D.T., **Estudo do comportamento de um solo reforçado com fibras de polipropileno visando o uso como base de fundações superficiais**. Porto Alegre, 2001, 95p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) -Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da UFRGS.

CASAGRANDE, M.D.T.; CONSOLI, N. **Estudo do comportamento de um solo residual areno-siltoso reforçado com fibras de polipropileno**. Solos e Rochas, São Paulo, ABMS/ABGE, v.25, n.3, p.223-230, 2002.

CASAGRANDE, M.D.T., **Comportamento de solos reforçados com fibras submetidas a grandes deformações**. Porto Alegre, 2005, 4-5 p. Tese (Doutorado em Engenharia) – programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da UFRGS.

CONSOLI, N.C.; SCHNAID, F.; MILITITSKY, J.; VENDRUSCOLO, M.A. **Design of shallow foundations on structured and compacted soils based on plate loading tests and finite element analysis**. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SOIL MECHANICS AND FOUNDATION ENGINEERING, 14, Hamburgo. Proceedings. Rotterdam: A.A. Balkema, p. 783-784, 1997.

CONSOLI, N.C.; SCHNAID, F.; MILITITSKY, J. **Interpretation of plate load tests on residual soil site**. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, New York, v.124, n.9, p. 857-867, 1998.

CONSOLI N.C.; MONTARDO J.P.; PRIETTO, P.D.M. **Comportamento mecânico de uma areia cimentícia reforçada com resíduos plásticos**. São Paulo, 2000. Seminário Nacional sobre reuso/reciclagem de resíduos sólidos industriais SMA/ São Paulo. 2000.

CONSOLI, N.C.; MONTARDO, J.P.; PRIETTO, P.D.M.; PASA, G. **Engineering behavior of a sand reinforced with plastic waste**. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, New York, v.128, n.6, p. 462-472, 2002.

CONSOLI, N.C.; CASAGRANDE, M.D.T.; PRIETTO, P.D.M.; THOMÉ, A. **Plate load test on fiber-reinforced soil**. Journal Of Geotechnical And

Geoenvironmental Engineering, Reston - Virginia - USA, v. 129, n. 10, p. 951-955, 2003.

CONSOLI, N. C.; MOTARDO, J. P.; DONATO, M.; PRIETTO, P. D. M. **Effect of material properties on the behaviour of sand-cement-fibre composites**. Ground Improvement, ISSMGE, v.8 n.2, p.77-90, 2004.

CONSOLI, N. C.; CASAGRANDE, M. D. T.; TOMHÉ, A; DALLA ROSA e FAHEY. P **Effect of relative density on plate loading tests on fiber-reinforced sand**. Geotechnique 59, (2009). No. 5, 471-476.

CUDMANI, R.O. **Estudo do comportamento de sapatas assentes em solos residuais parcialmente saturados através de ensaios de placa**. Porto Alegre, 1994. 150p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola de Engenharia, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da UFRGS.

CURCIO, D. S., **Comportamento hidromecânico de compósito solo-fibra**. Rio de Janeiro, 2008. 169p. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola de Engenharia, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da UFRJ.

DA SILVA, C.C. **Comportamento de solos siltosos quando reforçados com fibras e melhorados com aditivos químicos e orgânicos**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2007.

DONATO, M. **Medidas diretas de tensão em solo reforçado com fibras de polipropileno**. Porto Alegre, 2007. 162p. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola de Engenharia, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da UFRGS.

FESTUGATO, L.; **Análise do comportamento Mecânico de um solo micro reforçado com fibras de distintos índices aspecto**. Porto Alegre, 2008, 111 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da UFRGS.

FEUERHARMEL, M.R. **Comportamento de solos reforçados com fibras de polipropileno**. Porto Alegre, 2000. 131p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da UFRGS.

FREITAG, D.R. **Soil randomly reinforced with fibers.** Journal of Geotechnical Engineering, New York, v.112, n.8, p. 823-826, 1986.

GIRARDELLO, V. **Ensaio de placa em areia não saturada reforçada com fibras.** Porto Alegre, 2010. 141p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da UFRGS.

GRAY, D.H.; OHASHI, H. **Mechanics of fiber reinforcement in sand.** Journal of Geotechnical Engineering, New York, v.109, n.3, p.335-353, 1983.

GRAY, D.H.; MAHER, M.H. **Admixture stabilization of sands with random fibers.** INTERNATIONAL CONFERENCE ON SOIL MECHANICS AND FOUNDATION ENGINEERING, 12., 1989, Rio de Janeiro, Proceedings. Rotterdam: A.A. Balkema, v.2, p.1363-1366, 1989.

HANNANT, L. **Polymers and polymers composites.** In: J.M. ILLSTON. Construction materials: their nature and behavior. 2ed., London: J.M. Illston/E & FN Spon, p.359-403, 1994.

HEAD, K. H. **Manual of soil laboratory testing: effective stress test.** Wiley, 2nd ed., v.3, West Sussex, Inglaterra, p.227, 1998.

HEINECK, K.S. **Estudo do comportamento hidráulico e mecânico de materiais geotécnicos para barreiras horizontais.** Porto Alegre, 2002. 251p. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da UFRGS.

HOLLAWAY, L. Polymers and polymer composites. In: **Construction materials; their nature and behavior.** London: J. M. Illston/E. & F.N. Spon, 2ed., p.321-358, 1994.

HOMEM T.R. **Comportamento de misturas asfálticas porosas com ligantes modificados por polímeros e adição de fibras.** Porto Alegre, 2002. 109p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da UFRGS.

HULL, D., CLYNE, T.W., **An introduction to composite materials.** Cambridge University Press, 1996.

ILLSTON, J.M. **Construction materials; their nature and behavior.** 2ed. London: E & FN Spon, 518p., 1994.

- JOHNSTON, C.D. **Fiber-reinforced cement and concrete**. In: Advances in concrete technology. 2ed. Ottawa: V.M. Malhorta, p.603-673., 1994.
- JONES, C.J.F.P. **Earth reinforcement and soil structure**. Butterworths advanced series in geotechnical engineering. 1985.
- LAMBE, T. W. & WITHMAN, R. V. **Soil mechanics**. John Wiley & Sons, Inc. Editorial, New York, 582 p. 1969.
- LEOCADIO, G. A. S. **Reforço de solo laterítico com fibras de sisal de distribuição aleatória, tratadas superficialmente com EPS reciclado**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP), Ouro Preto, 2005.
- LING, I.; LESHCHINSKY, D.; TATSUOKA, F. **Reinforced soil engineering: advances in research and practice**. Marcel Dekker Inc.; 2003.
- LIRER, S; FLORA, A; CONSOLI, N.C. **Experimental evidences of the effect of fibers in reinforcing a sandy gravel**. Geotech Geol Eng (2012) 30:75-83.
- LOPES, F.R. **The undrained bearing capacity of piles and plates studied by the Finite Element Method**. Tese de Doutorado – University of London, London, 1979.
- LOUZADA, N.S.L. **Experimental study of soils reinforced with crushed polyethylene Terephthalate (PET) residue**. Dissertação de Mestrado, DEC, PUC – Rio, Rio de Janeiro, 2015.
- MAHER, M.H.; HO, Y.C. **Behavior of fiber-reinforced cemented sand under static and cyclic loads**. Geotechnical Testing Journal, Philadelphia, v.16, n.3, p.330-338, 1993.
- MAHER, M.H.; HO, Y.C. **Mechanical properties of Kaolinite/fiber soil composite**. Journal of Geotechnical Engineering, New York, v.120, n.8, p. 1381-1393, 1994.
- MANO, E.B., **Polímeros como materiais de engenharia**, São Paulo, 1991.
- MANO, E.B., MENDES, L.C. **Introdução a polímeros**. 2nd ed., Ed Edgard Blucher Ltda, p.118, 2001.
- MARSLAND, A.; EASON, B.J. **Measurements of displacement in the ground below loaded plates in deep boreholes**. In: BRITISH

- GEOTECHNICAL SOCIETY SYMPOSIUM ON FIELD INSTRUMENTATION, 1973, Butterworths. Proceedings. p.304-317, 1973.
- MCGOWN, A.; ANDRAWES, K.Z.; AL-HASANI, M.M. **Effect of inclusion properties on the behavior of sand.** Géotechnique, London, v.28, n.3, p.327-346, 1978.
- MELLIOS, G.A. **Provas de carga em solos porosos.** In: SEMINÁRIO DE ENGENHARIA DE FUNDAÇÕES ESPECIAIS, 1985, São Paulo. Anais ... São Paulo: ABMS/ABEF, v.2, p.73-102, 1985.
- MENESES, I.A. **Avaliação de concreto com adição de fibras de PET submetido a altas temperaturas.** Dissertação de Mestrado, Universidade Federal Do Rio Grande Do Norte, Natal, 2011.
- MINKOV, M.; EVSTATIEV, D.; KARACHOROV, P. **Stress and deformations in stabilized loess.** In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SOIL MECHANICS AND FOUNDATION ENGINEERING, 10, 1981, Stockholm. Proceedings... Rotterdam: A.A. Balkema, 3v, v.2, p.193-197, 1981.
- MITCHELL, J.K.; KATTI, R.K. **Soil improvement. State-of-the-art report.** In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SOIL MECHANICS AND FOUNDATION ENGINEERING, 10., 1981, Stokholm., Proceedings. Rotterdam: A. A. Balkema, v.4, p.261-317, 1981.
- MODRO, N.L.R.; MODRO, N.R; OLIVEIRA. A.P.N. **Avaliação de concreto Portland contendo resíduos de PET.** Revista Matéria, V.14, n. 1, PP. 725-736, 2009.
- MONTARDO, J.P. **Comportamento mecânico de compósitos solo-cimento-fibra: estudo do efeito das propriedades dos materiais constituintes.** Porto Alegre, 1999. 130p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da UFRGS.
- MONTARDO, J.P.; CONSOLI, N.C.; PRIETTO, P.D.M. **Comportamento mecânico de compósitos solo-cimento-fibra: estudo do efeito das propriedades dos materiais constituintes.** Solos e Rochas, São Paulo, ABMS/ABGE, v.24, n.3, p.191-209, 2002.

MOREL, J.C.; GOURC, J.P. **Mechanical behaviour of sand reinforced with mesh elements**. Geosynthetics International, Minnesota, v.4, n. 5, p.481-508, 1997.

NATARAJ, M.S.; ADDULA, H.R.; MCMANIS, K.L. **Strength and deformation characteristics of fiber reinforced soils**. INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ENVIRONMENTAL GEOTECHNOLOGY, 3., San Diego, 1996. Proceedings. Pennsylvania: Technomic Publishing Co., Inc, v.1, p.826-835, 1996.

PALACIOS, M.A.P. **Comportamento de uma areia reforçada com fibras de polipropileno submetida a ensaios triaxiais de extensão**. Dissertação de Mestrado, DEC, PUC – Rio, Rio de Janeiro, 2012.

PELISSER, F.; MONTEDO, O.R.K.; GLEIZE, P.J.P.; ROMAN, H.R. **Mechanical properties of recycled PET fibers**. Materials Research, v.15, n.4, p.679-686, 2012.

PELLS, P.J.N. **Plate loading tests on soil and rock**. In: EXTENSION COURSE ON IN-SITU TESTING FOR GEOTECHNICAL INVESTIGATIONS, 1983, Sydney. Proceedings ... Rotterdam: A. A. Balkema, p.73-85, 1983.

RAVISHANKAR, A.U., RAGHAVAN, K.S. **Coir stabilized lateritic soil for pavements**. Proceedings of the Indian Geotechnical Conference, Ahmedabad, India, pp. 45–52, 2004.

ROBERTSON, P.K. **In situ testing and its application to foundation engineering**. Canadian Geotechnical Journal, Ottawa, v.23, p.537-588, 1986.

ROMÃO, W.; SPINACÉ, M.A.S.; DE PAOLI, M.A. **Poli (Tereftalato de Etileno), PET: uma revisão sobre os processos de síntese, mecanismo de degradação e sua reciclagem**. Polímeros: Ciência e Tecnologia, v.19, n.2, p.121-132, 2009.

SALES, L.F.P. **Estudo do comportamento de fundações superficiais assentes em solos tratados**. Porto Alegre, 1998. 129p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da UFRGS.

SANTOS, A.P.S. **Comportamento de misturas solo-cimento-fibra sob compressão confinada com medição de tensão lateral**. Porto Alegre,

2004. 125p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da UFRGS.

SHEWBRIDGE, E.; SITAR, N. **Deformation characteristics of reinforced sand in direct shear**. Journal of Geotechnical Engineering, New York, v.115, n.8, p.1134-1147, 1989.

SILVA, J.A.A.; RODRIGUES, J.K.G.; LUCENA, L.C.; LUCENA, A.E.; PATRICIO, J.D. **Estudo da utilização do politereftalato de etileno (PET) para compor as misturas asfálticas dos revestimentos rodoviários**. 42ª Reunião Anual de Pavimentação e 16º Encontro Nacional de Conservação Rodoviária. Gramado, 2013.

SOARES JÚNIOR, A.B. **Produção do Poli (tereftalato de etileno) Modificado com Glicerol e Derivados**. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Química, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2010.

SONCIM, S.P.; JUNIOR, G.B.A.; ALMEIDA M.O.; JUNIOR, M.J.F.; ALMEIDA, S.G.; VIDAL, F.X.R. **Resíduo da reciclagem de PET (Polietileno Tereftalato) como material alternativo na construção de reforço de subleitos de rodovias**. Congresso Brasileiro de Ciência e Tecnologia e Resíduos e Desenvolvimento Sustentável 2004, Florianópolis, Livro de Resumos, São Paulo.

SOTOMAYOR, J. M. G. **Avaliação do comportamento carga-recalque de uma areia reforçada com fibra de coco submetida a ensaios de placa em verdadeira grandeza**. Dissertação de Mestrado, DEC, PUC – Rio, Rio de Janeiro, 2014.

SPECHT, L.P. **Comportamento de misturas de solo-cimento-fibra submetidos a carregamentos estáticos visando à pavimentação**. Porto Alegre, 2000. 130p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da UFRGS.

SPINACÉ, M.A.S.; DE PAOLI, M.A. **A tecnologia de reciclagem de polímeros**. Revista Quim. Nova, v.28, n.1, p.65-72, 2005.

TAMAYO, J. R. A. **Análise do comportamento mecânico de um solo arenoso reforçado com fibras de coco**. Dissertação de Mestrado, DEC, PUC – Rio, Rio de Janeiro, 2015.

CAI, Y.; TANG, C.; SHI, B.; GAO, W.; CHEN, F. **Strength and mechanical behavior of short polypropylene fiber reinforced and cement stabilized clayey soil.** Journal of Geotextiles and Geomembranes v.25, p.194–202, 2006.

TAYLOR, G.D. **Materials in construction.** 2ed. London: Longman Scientific & Technical, 284p., 1994.

TEODORO, J.M. **Resistência ao cisalhamento de solos reforçados com fibras plásticas.** São Paulo, 1999. 108p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola de São Carlos/ USP.

TERZAGHI, K.; PECK, R. B. **Soil mechanics in engineering practice.** 2.ed. New York: John Wiley and Sons, 1967.

TESSARI, M.A. **Ensaio de placa em camadas de cinza pesada de carvão tratados com cimento.** Porto Alegre, 1998. 82p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da UFRGS.

THOMÉ, A. **Comportamento de fundações superficiais apoiadas em aterros estabilizados com resíduos industriais.** Porto Alegre, 1999. 238p. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da UFRGS.

VAN IMPE, W.F.V. **Soil improvement techniques and their evolution.** Rotterdam, A.A. Balkema, 125 p., 1989.

VENDRUSCOLO M.A. **Análise numérica e experimental do comportamento de fundações superficiais assentes em solo melhorado.** Porto Alegre, 1996. 141p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da UFRGS.

VENDRUSCOLO, M.A. **Comportamento de ensaios de placa em camadas de solo melhoradas com cimento e fibras de polipropileno.** Porto Alegre, 2003. 224p. Tese (Doutorado em Engenharia) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da UFRGS.

VESIC, A.S. **Bearing capacity of deep foundations in sand.** Highway Research Record, n.39, p.112-153, 1963.

VIDAL, H. **The principle of reinforced earth.** High Res Rec; 282:1–16.

YOUNG, R.A. **Fibers (Vegetable)**. In: Kirk-Otthmer encyclopedia of chemical Technology, Hoboken: J. Wiley & Sons, 1994. 4. Ed. V. 10, p.727-744.

ZORNBERG, J.G. **Discrete framework for limit equilibrium analysis of fibre-reinforced soil**. Géotechnique, London, v.52, n.8, p.593-604, 2002.