



Miguel Angel Parodi Palacios

**Comportamento de uma Areia Reforçada com Fibras de
Polipropileno Submetida a Ensaio Triaxiais de Extensão**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientadora: Michéle Dal Toé Casagrande

Co-orientador: Nilo Cesar Consoli

Rio de Janeiro
Maio de 2012



Miguel Angel Parodi Palacios

**Comportamento de uma Areia Reforçada com Fibras de
Polipropileno Submetida a ensaios Triaxiais de Extensão**

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

Prof^a. Michéle Dal Toé Casagrande

Orientadora

Departamento de Engenharia Civil - PUC-Rio

Prof. Nilo Cesar Consoli

Co-orientador

Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Prof. Silvrano Adonias Dantas Neto

Universidade Federal do Ceará

Prof. Tácio Mauro Pereira de Campos

Departamento de Engenharia Civil - PUC-Rio

Prof. José Eugenio Leal

Coordenador Setorial do Centro

Técnico Científico - PUC-Rio

Rio de Janeiro, 03 de Maio de 2012.

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

Miguel Angel Parodi Palacios

Graduou-se em Engenharia Civil pela Universidade Ricardo Palma (Lima–Peru) em 2007. Trabalhou em projetos e obras no Peru no período 2006–2009. Ingressou no mestrado na Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro em 2010, desenvolvendo Dissertação na linha de pesquisa de Geotecnia Experimental aplicada a solos reforçados.

Ficha Catalográfica

Parodi Palacios, Miguel Angel

Comportamento de uma areia reforçada com fibras de polipropileno submetida a ensaios triaxiais de extensão / Miguel Angel Parodi Palacios; orientadora: Michéle Dal Toé Casagrande ; co-orientador: Nilo Cesar Consoli. – 2012.

101 f. : il. (color.) ; 30 cm

Dissertação (Mestrado)–Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil, 2012.

Inclui bibliografia

1. Engenharia civil – Teses. 2. Mistura solo-fibra. 3. Solo reforçado. 4. Ensaio triaxiais de extensão. 5. Resistência à tração. 6. Parâmetros de resistência. 7. Fibras de polipropileno. I. Casagrande, Michéle Dal Toé. II. Consoli, Nilo Cesar. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Civil. IV. Título.

CDD: 624

Dedico esta Dissertação aos meus pais
Carlos Hernan e Ana Lucia,
minha imensa gratidão e eterno amor
por tudo que sempre fizeram por min;
e aos meus irmãos Luis e Jose
pelo companheirismo, apoio e força;
a todos os familiares pelo carinho e incentivo.
Tudo o que sou devo a vocês.

Agradecimentos

Expresso a minha gratidão sincera a minha orientadora Michéle Dal Toé Casagrande pelos ensinamentos e as orientações dela recebidos desde o início do meu estudo e da minha pesquisa no mestrado até a conclusão desta dissertação e principalmente por sua amizade durante estes anos de convívio.

Ao professor Nilo Cesar Consoli pela disponibilidade de nos enviar a areia empregada na presente dissertação e pelas sugestões e recomendações nas diferentes etapas da pesquisa.

Ao professor Tácio Mauro Pereira de Campos pelas sugestões e orientações quanto à montagem do equipamento e a metodologia dos ensaios realizados no presente trabalho.

À Taíse Carvalho e Monica Moncada pela ajuda, auxílio e disposição fornecida sempre quando precisei no laboratório de geotecnia e meio ambiente da PUC-Rio.

Ao corpo docente do departamento de Engenharia Civil da PUC-Rio pelo ensino ministrado nas diferentes matérias as quais me serviram muito no aperfeiçoamento profissional. Obrigado professores, guardo muito respeito e admiração por cada um de vocês.

Ao professor Marco Antonio Hernandez Aguilar da Universidade Ricardo Palma (Lima-Peru), por ter acreditado em mim sempre, pelos primeiros ensinamentos da mecânica dos solos e por ter contribuído na minha formação em Geotecnia.

Á Jackeline Castañeda, pela sua ajuda, orientação e amizade

desinteressada desde minha chegada ao Rio de Janeiro até o final do mestrado.

A todos os amigos e colegas pelos momentos agradáveis de convivência dentro e fora da PUC-Rio, obrigado por fazer destes dois anos uma das maiores experiências da minha vida.

À Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, pela oportunidade de estudar nesta prestigiosa instituição.

À Química Suíza Peru. na pessoa do Eng. Milan Pejnovic, pelo fornecimento das fibras de polipropileno utilizadas nos ensaios realizados no presente estudo.

À CAPES, pelo apoio financeiro prestado para a concretização deste trabalho.

Resumo

Palacios, Miguel Angel Parodi; Casagrande, Michéle Dal Toé; Consoli, Nilo Cesar. **Comportamento de uma Areia Reforçada com Fibras de Polipropileno Submetida a Ensaio Triaxiais de Extensão**. Rio de Janeiro, 2012. 101 p. Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

O presente trabalho permite avaliar o comportamento de um solo reforçado e não reforçado com fibras de polipropileno (teor de 0.5% em relação ao peso seco do solo) submetido a ensaios triaxiais de extensão, bem como a influência da adição de fibras na resistência e nos mecanismos de ruptura do solo reforçado. Para tanto, desenvolveu-se um programa experimental compreendendo a etapa final de um equipamento triaxial do tipo Bishop e Wesley de grandes dimensões e a execução de ensaios triaxiais drenados de extensão. Os ensaios triaxiais realizados permitiram a determinação dos parâmetros de resistência do solo e da mistura solo-fibra. Os resultados obtidos propiciaram a um melhor entendimento das alterações geradas pela inclusão aleatória de fibras de polipropileno à matriz da areia estudada. O desempenho das fibras no interior da massa de solo indica que estas sofreram deformações plásticas de tração, alongando-se, porém este alongamento é atribuído à fase de adensamento e não à fase de cisalhamento dos ensaios triaxiais de extensão realizados, já que foi possível observar que a adição das fibras não incrementa a resistência à tração do solo, quando este estiver submetido a esforços de extensão.

Palavras-chave

Mistura solo – fibra; solo reforçado; ensaios triaxiais de extensão; resistência à tração; parâmetros de resistência; fibras de polipropileno.

Abstract

Palacios, Miguel Angel Parodi; Casagrande, Michéle Dal Toé (Advisor); Consoli, Nilo Cesar (Co-advisor). **Behavior of a Polypropylene reinforced sand under Triaxial Extension Tests**. Rio de Janeiro, 2012. 101 p. MSc. Dissertation – Civil Engineering Department, Pontifical Catholic University of Rio de Janeiro.

The present study allows evaluating the behavior of a reinforced and unreinforced soil with fibers of polypropylene (0.5% content of dry weight of soil) subjected to triaxial extension tests, as the influence of adding fibers in the resistance and the rupture mechanisms of reinforced soil. Therefore, it was developed an experimental program comprising the development of a Bishop and Wesley's triaxial-type equipment which has a larger size than conventional triaxial equipment and an execution of drained triaxial extension tests. The present study submits triaxial tests results aiming the determination of strength parameters of soil and soil – fiber mixture. The obtained results led a better understanding of the alterations generated by the random inclusion of polypropylene fibers to the pattern sand studied. The accomplishment of fiber performance within soil mass indicates that they undergo tensile plastic deformation, elongating, but this elongating is attributed to shear stage in the triaxial extension tests realized, as was conferred that the addition of fiber does not increase the tensile strength of soil.

Keywords

Soil–fiber mixture; reinforced soil; triaxial extension tests; tensile strenght; strenght parameters, polypropylene fibers.

Sumário

1 Introdução	17
1.1 Relevância e justificativa da pesquisa	17
1.2 Objetivos	18
1.3 Organização da Dissertação	19
2 Revisão Bibliográfica	20
2.1 Considerações Iniciais	20
2.2 Solos Reforçados	20
2.2.1 Histórico, Melhoria, Estabilização e Reforço de Solos	20
2.2.2 Materiais Compósitos Reforçados com Fibras	23
2.2.3 Tipos de Fibras Empregadas como Reforço	27
2.2.3.1 Fibras Naturais ou Vegetais	27
2.2.3.2 Fibras Minerais	28
2.2.3.3 Fibras Metálicas	29
2.2.3.4 Fibras Poliméricas	30
2.2.4 Mecanismos de Interação Solo-Fibra – Estudos Experimentais	31
2.2.5 Alterações nas Propriedades dos Solos pela Inclusão de Fibras	41
2.2.5.1 Compactação	41
2.2.5.2 Resistência ao Cisalhamento de Pico	42
2.2.5.3 Resistência ao Cisalhamento pós-pico	45
2.2.5.4 Deformabilidade	45
2.2.5.5 Modo de Ruptura	46
2.2.5.6 Variação Volumétrica	47
2.2.5.7 Rigidez Inicial	47
2.2.5.8 Condutividade Hidráulica e outras Propriedades	48
2.3 Ensaio Triaxial de Extensão	49
3 Programa Experimental	52
3.1 Considerações Iniciais	52
3.2 Materiais Utilizados	53
3.2.1 Areia	53
3.2.2 Fibras	54
3.2.3 Água	55

3.3 Equipamento Triaxial Desenvolvido	56
3.3.1 Câmara Triaxial	59
3.3.2 Interface Ar/água	61
3.3.3 Sistema de Aquisição de Dados e Controle	62
3.3.4 Sistema de Aplicação de Pressões	63
3.3.5 Instrumentação	65
3.4 Método de Ensaio	66
3.4.1 Preparação das Amostras para Ensaio Triaxiais	66
3.4.2 Ensaio Triaxiais de Extensão	67
4 Apresentação e Discussão dos Resultados	71
4.1 Considerações Iniciais	71
4.2 Definições e Notações Básicas	71
4.3 Ensaio de Compressão Triaxial	72
4.4 Ensaio de Extensão Triaxial	76
4.4.1 Mecanismo de Deformação	76
4.4.2 Comportamento Tensão Desviadora e Deformação Volumétrica vs Deformação Axial	78
4.4.3 Envoltórias e Parâmetros de Resistência ao Cisalhamento	83
4.4.4 Energia de Deformação Absorvida	86
4.4.5 Alongamento das Fibras	88
5 Considerações Finais	91
5.1 Conclusões	91
5.2 Sugestões para pesquisas futuras	92
Referências Bibliográficas	94

Lista de Figuras

Figura 1.1. Ensaio de laboratório a serem realizados ao solo segundo a sua localização ao longo da superfície de ruptura (Fonte: Notas de aula prof. Cezar Bastos. DMC/FURG)	18
Figura 2.1. Classificação de materiais compósitos (Matthews e Rawlings, 1994)	23
Figura 2.2. Disposição Fibra/fissura idealizada (Taylor, 1994)	25
Figura 2.3. Acréscimo de resistência em função da inclinação da fibra (Gray & Ohashi, 1983)	33
Figura 3.1. Curva granulométrica da areia de Osório	54
Figura 3.2. Aspecto das fibras de polipropileno com 19.3 mm de comprimento	55
Figura 3.3. Esquema diagramático do aparelho desenvolvido por Bishop e Wesley	57
Figura 3.4. Pedestal e top cap do equipamento desenvolvido. (a) estado inicial das peças. (b) alterações desenvolvidas nas peças.	60
Figura 3.5. (a) Vista geral do equipamento triaxial de maiores dimensões (b) Câmara triaxial	61
Figura 3.6. Interface ar/água do equipamento	62
Figura 3.7. Sistema de aquisição de dados desenvolvido na Imperial College	63
Figura 3.8. Caixas que regulam as pressões que são aplicadas durante o ensaio	64
Figura 3.9. Bomba de vazão constante de água	64
Figura 3.10. Mistura da areia com as fibras e a água necessária para atingir 10% de umidade	67
Figura 3.11. (a e b) Moldagem do corpo de prova. (c) Detalhe do equipamento triaxial com a amostra pronta para iniciar o ensaio	68
Figura 4.1. Parâmetros de resistência da areia submetida a ensaios de compressão obtidos por: (a) CASAGRANDE 2005, (b) presente dissertação	73
Figura 4.2. Parâmetros de resistência da mistura submetida a ensaios de compressão obtidos por: (a) CASAGRANDE 2005, (b) presente dissertação	74

Figura 4.3. Mecanismo de deformação da amostra da areia submetida a ensaios de extensão	77
Figura 4.4. Mecanismo de deformação da amostra da mistura areia–fibra submetida a ensaios de extensão	77
Figura 4.5. Gráfico tensão desviadora vs deformação axial nas tensões efetivas médias normais (a) 50kPa, (b) 100 kPa, (c) 200 kPa e (d) 300 kPa	78
Figura 4.6. Curvas tensão desviadora vs deformação axial de todos os ensaios triaxiais drenados de extensão realizados	79
Figura 4.7. Estado final do corpo de prova da mistura areia–fibra	81
Figura 4.8. Variação volumétrica vs Deformação axial (a) na areia, (b) na mistura areia – fibra	82
Figura 4.9. Envoltória e parâmetros de resistência da areia submetida a ensaios triaxiais de (a) compressão (fonte: Casagrande 2005) e (b) extensão	84
Figura 4.10. Envoltória e parâmetros de resistência da mistura areia–fibra submetida a ensaios triaxiais de (a) compressão (fonte: Casagrande 2005) e (b) extensão	85
Figura 4.11. Energia de deformação absorvida nos ensaios triaxiais de extensão realizados à areia e à mistura areia – fibra	87
Figura 4.12. Comprimento final das fibras vs Tensão confinante dos ensaios executados	88
Figura 4.13. (a) Comprimento inicial das fibras, (b) medida do comprimento final das fibras	89

Lista de Tabelas

Tabela 2.1 – Propriedades físicas e mecânicas das fibras naturais (Braga, 2001)	28
Tabela 2.2 – Propriedades físicas e mecânicas das fibras minerais (Curcio, 2001)	29
Tabela 2.3 – Propriedades mecânicas das fibras poliméricas (Mano, 1991; Hull e Clyne, 1996; Heineck, 2002)	31
Tabela 3.1 – Índices físicos da areia de Osório	54
Tabela 3.2 – Resumo das propriedades mecânicas das fibras	55
Tabela 4.1 - Comparação dos parâmetros de resistência obtidos por CASAGRANDE 2005 e dos resultados obtidos no presente estudo nos ensaios triaxiais drenados de compressão	76
Tabela 4.2 - Parâmetros de resistência obtidos nos ensaios triaxiais de extensão	86
Tabela 4.3 – Variação da energia de deformação absorvida com as tensões efetivas médias iniciais	88
Tabela 4.4 – Comprimento final das fibras de polipropileno	89

Lista de Abreviaturas

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	American Society for Testing and Materials
CAPES	Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
CBR	<i>California Bearing Ratio</i>
IP	Índice de Plasticidade
KEVLAR	Fibras de Poliamida
LGMA	Laboratório de Geotecnia e Meio Ambiente
LL	Limite de Liquidez
LP	Limite de Plasticidade
LGMA	Laboratório de Geotecnia e Meio Ambiente
LVDT	Linearly Variable Differential Transformer
MEF	Método dos Elementos Finitos
MVVT	Medidor de Variação de Volume Total
NBR	Norma Brasileira
PEAD	Polietileno de alta Densidade
PET	Polietileno Tereftalato

Lista de Símbolos

$\omega_{\text{ót}}m$	Teor de umidade ótimo de compactação
$\gamma_d \text{ máx}$	Peso específico seco aparente máximo
γ_d	Massa específica seca
γ_s	Densidade real dos grãos
ω	Teor de umidade
ρ	Massa específica do solo
G	Módulo de cisalhamento
G_o	Módulo de cisalhamento inicial ou elástico
$G_{\text{máx}}$	Módulo de cisalhamento máximo
e	Índice de vazios
e_o	Índice de vazios inicial
E	Módulo de deformabilidade ou módulo de Young
E_{def}	Energia de deformação absorvida
ν	Módulo de Poisson
C_u	Coeficiente de uniformidade
C_c	Coeficiente de curvatura
C_v	Coeficiente de adensamento
D_{10}	Diâmetro efetivo
D_{50}	Diâmetro médio
t_r	Tempo mínimo de ruptura
L	Altura do corpo de prova
l/d	Fator de forma (relação entre o comprimento e o diâmetro)
v	Velocidade de cisalhamento
ϵ'	Relativo a tensões efetivas
ϵ_a	Deformação axial
ϵ_{rup}	Deformação axial na ruptura
ϵ_v	Deformação volumétrica
τ	Tensão de cisalhamento
σ_v	Tensão vertical
σ_h	Tensão horizontal

σ_1, σ_3	Tensões principais, maior e menor
σ_c	Tensão de confinamento
σ_d	Tensão desviadora
u	Poropressão
S_u	Resistência não Drenada
ϕ	Ângulo de atrito
c	Coesão
p'	$(\sigma'_1 + 2\sigma'_3)/3$ (Tensão efetiva média normal)
q	$(\sigma'_1 - \sigma'_3)$ (Tensão de Desvio)
M	Inclinação da envoltória de resistência no espaço p' vs q
h	Altura final do corpo de prova.
h_i	Altura inicial do corpo de prova.