



**Rafael Eduardo Zaccour Bolaños**

**Comportamento Mecânico de um Solo Argiloso  
Reforçado com Fibras de Coco**

**Dissertação de Mestrado**

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

Orientadora: Profa. Michéle Dal Toé Casagrande

Rio de Janeiro  
Dezembro de 2013



**Rafael Eduardo Zaccour Bolaños**

**Comportamento Mecânico de um Solo Argiloso  
Reforçado com Fibras de Coco**

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

**Prof<sup>a</sup>. Michéle Dal Toé Casagrande**

Orientadora

Departamento de Engenharia Civil - PUC-Rio

**Prof. Celso Romanel**

Departamento de Engenharia Civil - PUC-Rio

**Prof<sup>a</sup>. Raquel Quadros Velloso**

Universidade Federal de Ouro Preto

**Prof. José Eugenio Leal**

Coordenador Setorial do Centro

Técnico Científico – PUC-Rio

Rio de Janeiro, 16 de dezembro de 2013

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

### **Rafael Eduardo Zaccour Bolaños**

Graduou-se em Engenharia Civil pela Pontifícia Universidade Católica do Rio em 2010, ingressando logo em seguida no curso de mestrado de engenharia civil, na mesma universidade, desenvolvendo Dissertação na linha de pesquisa de Geotecnia Experimental aplicada a solos reforçados.

#### Ficha Catalográfica

Bolaños, Rafael Eduardo Zaccour

Comportamento mecânico de um solo argiloso reforçado com fibras de coco / Rafael Eduardo Zaccour Bolaños; orientadora: Michéle Dal Toé Casagrande. – 2013.  
(143) f. : il. (color.) ; 30 cm

Dissertação (Mestrado)–Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil, 2013.

Inclui bibliografia

1. Engenharia civil – Teses. 2. Solos reforçados. 3. Fibras de coco. 4. Ensaio triaxiais. 5. Materiais alternativos. I. Casagrande, Michéle Dal Toé. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Civil. III. Título.

CDD:624

Dedico este trabalho, primeiramente a Deus, que nos dá vida e esperança para vencermos o nosso dia-a-dia.

Também dedico esta tese a minha mãe Monique, meu maior modelo e exemplo, ao meu pai Rafael, a minha avó Leila e ao meu avô Elias, que recentemente partiu e nos deixou um grande vazio com sua ausência. Também dedico esse trabalho à memória da minha querida Doquinha, que tanto cuidou de mim e contribuiu com minha formação.

## Agradecimentos

A Deus, por ter me dado essa oportunidade.

Aos meus pais, Rafael e Monique, que me educam até hoje e que me passaram os valores que carrego comigo. A minha avó Leila e ao meu querido avô Elias, que partiu esse ano e me deixou uma enorme saudade, avós com quem sempre contei durante toda a vida.

À minha orientadora, Michéle Casagrande, por todo apoio e dedicação.

Aos professores da PUC-Rio, onde tive a oportunidade de me graduar e me pós-graduar, por todo aprendizado que me foi dado nesses anos.

À PUC-Rio, pelos auxílios, sem os quais este trabalho não poderia ter sido realizado.

Aos meus velhos amigos, Bernardo Machado, Bruno Amaral, Daniel Carvalho, Andrei Monteiro e Eduardo Batista, pela longa amizade.

A todos os colegas com quem tive a honra de realizar esse curso de mestrado, em especial ao Pedro Lobo, amigo do peito, com quem ri bastante, ao Nilthson Norteña e a Juliana Meza Lopes, pessoas queridas de quem gosto tanto, a Jaqueline Castañeda, Sandra Rosero e Cristian Quispe.

A todos os funcionários do Departamento de Engenharia Civil da PUC-Rio, em especial à Rita Leite.

Aos técnicos do Laboratório de Geotecnia, Amaury, grande companheiro que tanto contribuiu para esse trabalho e ao Josué.

Aos alunos de iniciação científica, Paula Helene, Tatiana Lopes, Marina Giannotti e Yago Cesar, que me deram bastante suporte.

À Prefeitura do Rio de Janeiro, através da funcionária Teresinha Dias, por terem nos cedido as fibras de coco para o desenvolvimento deste estudo.

## Resumo

Bolaños, Rafael Eduardo Zaccour; Casagrande, Michéle Dal Toé. **Comportamento Mecânico de um Solo Argiloso Reforçado com Fibras de Coco.** Rio de Janeiro, 2013. 143 p. Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Este estudo apresenta o comportamento de um solo argiloso reforçado e não reforçado com fibras de coco verde (resíduo proveniente do consumo da água de coco), através da realização de ensaios de caracterização e ensaios mecânicos de compactação e de ensaios triaxiais isotropicamente drenados. A fibra de coco utilizada foi obtida por processo mecânico na empresa ECOFIBRA, que possui uma parceria com a Companhia de Limpeza Urbana da cidade do Rio de Janeiro (COMLURB) em projeto piloto de coleta seletiva das cascas de coco verde. O material recebido foi estudado de duas maneiras, as fibras foram inseridas ao solo moídas e cortadas (no comprimento aproximado de 2cm). O solo argiloso, de origem coluvionar, foi retirado do campo experimental da PUC-Rio. Busca-se estabelecer padrões de comportamento que possam explicar a influência da adição da fibra de coco verde, relacionando-a com os parâmetros de resistência ao cisalhamento do solo e dos compósitos. Os ensaios foram realizados em amostras compactadas na densidade máxima e umidade ótima, 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. Observa-se um incremento na resistência ao cisalhamento das misturas solo-fibra, uma vez que se observa um discreto aumento do ângulo de atrito e em um expressivo aumento da coesão das misturas reforçadas, em comparação aos dados obtidos para o solo puro. Os resultados se mostraram satisfatórios para aplicação do solo reforçado com fibras de coco em camadas de aterros temporários submetidos a carregamentos estáticos, dando assim uma destinação mais sustentável a este resíduo, atendendo às questões ambientais e sócio-econômicas.

## Palavras-chave

solos reforçados; fibras de coco; ensaios triaxiais; materiais alternativos.

## Abstract

Bolaños, Rafael Eduardo Zaccour; Casagrande, Michéle Dal Toé (Advisor). **Mechanical Behavior of Clayey Soil Reinforced with coconut fiber**. Rio de Janeiro, 2012. 143 p. MSc. Dissertation – Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

This study presents the behavior of reinforced and unreinforced clay soil with green coconut fibers (waste from consumption of coconut water), by conducting tests for the characterization and mechanical compaction tests and isotropically drained triaxial tests. The coconut fiber used is obtained by a mechanical process in ECOFIBRA company, which has a partnership with the Urban Cleaning Company of the city of Rio de Janeiro (COMLURB) in a pilot project about separate collection of green coconut shells. The received material was studied in two ways; the fibers were inserted into the milled and cut (in the approximate length of 2 cm). The clay soil, with colluvium origin, was removed from the experimental field of PUC-Rio. Seeks to establish patterns of behavior that might explain the influence of the addition of green coconut fiber, relating it to the parameters of shear strength and deformation of soil and composites. The tests were performed on samples compressed at maximum density and optimum moisture content in the milled fiber of 0.5 % and 1% fiber content and the cut of 0.5%, 0.75 %, 1%, 1.25 % and 1.5% on dry weight of the soil. Observed an increase in shear strength of the soil-fiber mixtures, since it was observed a modest increase in friction angle and a significant increase in the cohesion of reinforced mixtures, compared to the data obtained for the pure soil. The results were satisfactory for application of soil reinforced with coconut fiber layers temporary landfills subjected to static loads, thus giving a more sustainable destination to this residue, given the environmental and socio-economic.

## Keywords

reinforced soil; coconut fiber; triaxial tests; alternative materials.

## Sumário

1 Introdução	18
1.1. A necessidade de se reforçar os solos	18
1.2. Sobre o consumo do coco, seu resíduo e metano gerado.	19
1.3. Beneficiamento da fibra de coco	22
1.4. Objetivo da pesquisa	23
1.5. Desenvolvimento da Pesquisa	23
2 Revisão Bibliográfica	25
2.1. Solos Reforçados - Histórico	25
2.2. Materiais Compósitos Reforçados com Fibras	26
2.3. Tipos de Fibras Empregadas como Reforço	30
2.3.1. Fibras Minerais	30
2.3.2. Fibras Metálicas	31
2.3.3. Fibras Poliméricas	32
2.3.4. Fibras Naturais	33
2.4. Mecanismo de Interação Solo-Fibra – Estudos Experimentais	42
2.5. Mecanismo de Interação Solo-Fibra – Estudos Experimentais	51
2.5.1. Compactação	51
2.5.2. Resistência ao Cisalhamento de Pico	52
2.5.3. Resistência ao Cisalhamento Pós-Pico	55
2.5.4. Deformabilidade	55
2.5.5. Modo de Ruptura	56
2.5.6. Variação Volumétrica	57
2.5.7. Rigidez Inicial	58
2.5.8. Condutividade hidráulica e outras propriedades	58
2.6. Fibra de Coco	59
2.6.1. Histórico	59
2.6.2. Produção e Consumo do Coco Verde	61
2.6.3. Solo e Clima para a Produção	62
2.6.4. Características da Espécie	63



2.6.5. Propriedades das Fibras de Coco	64
2.6.6. Aplicações com a Fibra de Coco	65
2.6.6.1. Uso de Fibras de Coco em Compósitos	65
2.6.6.2. Fibra da Casca do Coco Verde como Substrato Agrícola	67
2.6.6.3. Adição de Fibras de Coco em Concreto não Estrutual	67
2.6.6.4. Adição de Fibras de Coco em Misturas Asfálticas	68
3 Programa Experimental	70
3.1. Materiais Utilizados	70
3.1.1. Solo	70
3.1.2. Fibras de Coco	73
3.1.3. Água	75
3.1.4. Misturas Solo-Fibra de Coco	75
3.2. Quantidade e Cronograma de ensaios	77
3.3. Quantidade e Cronograma de ensaios	78
3.3.1. Equipamento Utilizado	78
3.3.2. Preparação dos Corpos-de-Prova	80
4 Resultados e Análises	86
4.1. Ensaios de Caracterização Física	86
4.1.1. Densidade Real dos Grãos	86
4.1.2. Limites de Atterberg	86
4.1.3. Densidade Real dos Grãos	87
4.2. Ensaios de Caracterização Mecânica	88
4.2.1. Ensaios de Compactação Proctor Normal	88
4.2.2. Ensaios Triaxiais CID	90
5 Considerações Finais	115
5.1. Conclusões	115
5.2. Sugestões para pesquisas futuras	116
6 Referências Bibliográficas	118
A Apêndice	132

A.1. Métodos e Procedimentos de Ensaio	132
A.1.1. Ensaio de Compactação Proctor Normal	132
A.1.2. Ensaio Triaxial	134
A.1.2.1. Procedimento de saturação dos corpos de prova	136
A.1.2.2. Adensamento e Cálculo do $t_{100}$	137
A.1.2.3. Velocidade de cisalhamento e etapa de Cisalhamento	137
A.1.2.4. Análises de Resistência	141
A.1.2.5. Critério de Ruptura	142

## Lista de Figuras

Figura 1.1 - Consumo de coco verde na orla do Rio de Janeiro e geração de resíduos decorrente desta atividade .....	21
Figura 1.2 - Maquinário de beneficiamento de casca de coco verde (Rosa et al, 2004) .....	23
Figura 2.1 – Classificação de materiais compósitos (Matthews e Rawlings, 1994). ....	26
Figura 2.2 - Disposição fibra/fissura idealizada (Taylor, 1994).....	28
Figura 2.3 - Estrutura microscópica e submicroscópica da celulose .....	35
Figura 2.4 – Estrutura da celulose.....	36
Figura 2.5 - Esquema de orientação molecular de uma microfibrila de celulose (Tomczak, 2010). ....	36
Figura 2.6 - Representação bidimensional da lignina (Tomczak 2010)....	38
Figura 2.7 - Arranjo helicoidal das fibras de celulose nas fibras naturais (Tomczak, 2010) .....	40
Figura 2.8 – Acréscimo de resistência em função da inclinação da fibra (Gray e Ohashi, 1983).....	44
Figura 2.9 - Corte longitudinal do coco.....	63
Figura 3.1 - Localização do Campo Experimental II PUC-Rio.....	70
Figura 3.2 – Argila utilizada - solo argiloso coluvionar. ....	71
Figura 3.3 - Descrição morfológica do perfil do Campo Experimental II (Dylac, 1994).....	72
Figura 3.4 – Fardo de fibra de coco verde beneficiada pela empresa EcoFibra.....	73
Figura 3.5 – Moedor de grãos Botini .....	74
Figura 3.6 – fibra de coco verde cortada utilizada nos corpos-de-prova – (a) cortada; (b) moída.....	74
Figura 3.7 – Processo de mistura do solo e da fibra .....	76

Figura 3.8 -(a) Caixa leitora de dados ; (b) Medidor de Variação de Volume tipo Imperial College; (c) Painel de controle das Pressões; (d) Pressão confinante; (e) Cilindro de Acrílico; (f) Corpo-de-prova; (g) Válvulas da prensa Triaxial; (h) Controle para início do cisalhamento .....	79
Figura 3.9 – Software CatmanEasy na etapa de cisalhamento.....	80
Figura 3.10 - Corpo cilíndrico compactado.....	81
Figura 3.11 – Corpo cilíndrico compactado sendo dividido em 3 partes; (a) com fibra moída; (b) com fibra cortada .....	81
Figura 3.12 – (a) Corpo de prova sendo moldado lateralmente moldagem; (b) Corpo de prova com a lateral moldada (c) Corpo de prova finalizado com a altura certa para o ensaio.....	82
Figura 3.13 – Capsulas com mistura de solo-fibra tirados do moldagem.	82
Figura 3.14 – Teste de membrana .....	83
Figura 3.15 – (a) Pesagem do corpo-de-prova para montar na prensa triaxial; (b) Verificação da prensa antes do ensaio.....	83
Figura 3.16 – Colocação do papel filtro.....	84
Figura 3.17 – (a) Colocação do corpo-de-prova no equipamento triaxial; (b) Colocação da membrana com ajuda do molde de aço.....	84
Figura 3.18 – Colocação do papel filtro e a pedra porosa no topo do corpo-de-prova.....	84
Figura 3.19 – (a) Fixação da membrana ao corpo de prova com os o-rings; (b) Preenchimento da câmara triaxial com água; (c) Colocação da conexão de pressão confinante. ....	85
Figura 4.1 - Distribuição granulométrica do solo argiloso.....	88
Figura 4.2 – Curvas de compactação do solo puro e da fibra moída .....	89
Figura 4.3 – Curvas de compactação do solo puro e da fibra cortada .....	90
Figura 4.4 - Gráfico $\sigma_d$ (kPa) x $\epsilon_a$ (%) para fibra moída com tensão confinante de 50kPa .....	92
Figura 4.5 - Gráfico $\epsilon_v$ (%) x $\epsilon_a$ (%) para fibra moída com tensão confinante de 50kPa .....	92
Figura 4.6 - Gráfico $\sigma_d$ (kPa) x $\epsilon_a$ (%) para fibra moída com tensão confinante de 150kPa .....	93

Figura 4.7 - Gráfico $\varepsilon_v$ (%) x $\varepsilon_a$ (%) para fibra moída com tensão confinante de 150kPa .....	93
Figura 4.8 - Gráfico $\sigma_d$ (kPa) x $\varepsilon_a$ (%) para fibra moída com tensão confinante de 300kPa .....	94
Figura 4.9 - Gráfico $\varepsilon_v$ (%) x $\varepsilon_a$ (%) para fibra moída com tensão confinante de 300kPa .....	94
Figura 4.10 - Gráfico p 'x q com envoltória do solo puro .....	97
Figura 4.11 - Gráfico p 'x q com envoltória do solo reforçado com 0,5% de fibra moída .....	98
Figura 4.12 - Gráfico p 'x q com envoltória do solo reforçado com 1,0% de fibra moída .....	98
Figura 4.13 - Gráfico p 'x q com envoltórias do solo do solo puro e misturas com fibra moída .....	99
Figura 4.14 – Parâmetros de resistência das envoltórias para as misturas com fibra moída .....	99
Figura 4.15 - Gráfico $\sigma_d$ (kPa) x $\varepsilon_a$ (%) para fibra cortada com tensão confinante de 50kPa .....	101
Figura 4.16 - Gráfico $\varepsilon_v$ (%) x $\varepsilon_a$ (%) para fibra cortada com tensão confinante de 50kPa .....	101
Figura 4.17 - Gráfico $\sigma_d$ (kPa) x $\varepsilon_a$ (%) para fibra cortada com tensão confinante de 150kPa .....	102
Figura 4.18 - Gráfico $\varepsilon_v$ (%) x $\varepsilon_a$ (%) para fibra cortada com tensão confinante de 150kPa .....	102
Figura 4.19 - Gráfico $\sigma_d$ (kPa) x $\varepsilon_a$ (%) para fibra cortada com tensão confinante de.....	103
Figura 4.20 - Gráfico $\varepsilon_v$ (%) x $\varepsilon_a$ (%) para fibra cortada com tensão confinante de 300kPa .....	103
Figura 4.21 - Gráfico p 'x q com envoltória do solo puro .....	106
Figura 4.22 - Gráfico p 'x q com envoltória do solo reforçado com 0,5% de fibra cortada .....	107
Figura 4.23 - Gráfico p 'x q com envoltória do solo reforçado com 0,75% de fibra cortada .....	107
Figura 4.24 - Gráfico p 'x q com envoltória do solo reforçado com 1,0% de fibra cortada .....	108

Figura 4.25 - Gráfico p 'x q com envoltória do solo reforçado com 1,25% de fibra cortada .....	108
Figura 4.26 - Gráfico p 'x q com envoltória do solo reforçado com 1,5% de fibra cortada .....	109
Figura 4.27 - Gráfico p 'x q com envoltórias do solo do solo puro e misturas com fibra cortada .....	109
Figura 4.28 – Parâmetros de resistência das envoltórias para as misturas com fibra cortada .....	110
Figura 4.29 - mostra corpos de prova cisalhados com a fibra moída e com cada um dos teores das fibras cortadas.....	111
Figura 4.30 – Corpos de prova cisalhados; (a) com fibra moída; (b) com 0,5% de fibra cortada; (c) com 0,75% de fibra cortada; com 1,0% de fibra cortada; (d) com 1,25% de fibra cortada; (f) com 1,5% de fibra cortada. ....	111
Figura 4.31 – Influência do confinamento na capacidade da fibra de confeirir resistência ao compósito .....	113

## Lista de Tabelas

Tabela 1.1 – IBGE, Pesquisa Nacional de Saneamento Básico (2000) ...	20
Tabela 2.1 - Propriedades físicas e mecânicas das fibras minerais (Curcio, 2001) .....	31
Tabela 2.2 - Lista de fibras naturais importantes e sua origem (Tomczak, 2010) .....	34
Tabela 2.3 - Composição química típica de fibras naturais (Tomczak, 2010) .....	39
Tabela 2.4 - Ângulos helicoidais de algumas fibras (Tomczak, 2010) .....	39
Tabela 2.5 - Propriedades mecânicas de fibras vegetais e de fibras convencionais usadas como reforço (Bledzki e Gassan, 1999) .....	42
Tabela 2.6 - Produção e área colhida dos principais países produtores de coco, em 2008. (FAO, 2011 apud Martins e Júnior, 2011) .....	62
Tabela 3.1 - Análise mineralógica (Sertã, 1986) .....	72
Tabela 4.1 - Caracterização Física do solo argiloso coluvionar do Campo Experimental II da PUC-Rio (Ramirez, 2012) .....	87
Tabela 4.2 – Resultados dos ensaios de compactação Proctor Normal para o solo e misturas de solo-fibra .....	90
Tabela 4.3 – Parâmetros de resistência das envoltórias para as misturas com fibra moída .....	100
Tabela 4.4 – Parâmetros de resistência das envoltórias para as misturas com fibra cortada .....	110
Tabela 4.5 – Tensões desviadoras para 15% de deformação axial (em kPa) .....	112
Tabela 4.6 – Porcentagem de incremento no valor da tensão desviadora dos compósitos com fibra cortada, com respeito ao solo puro (em %) .....	112

## Lista de Símbolos

$\omega$	Teor de umidade
$\omega_{\text{ót}}m$	Teor de umidade ótimo de compactação
$\gamma_d \text{ máx}$	Peso específico seco aparente máximo
$\gamma_d$	Peso específico seco
$\gamma_s$	Peso específico dos grãos
$\rho$	Massa específica do solo
$G_s$	Massa específica real dos grãos
$e$	Índice de vazios
$e_{\text{máximo}}$	Índice de vazios máximo
$e_{\text{mínimo}}$	Índice de vazios mínimo
$C_u$	Coeficiente de uniformidade
$C_c$	Coeficiente de curvatura
$D_{10}$	Diâmetro efetivo
$D_{50}$	Diâmetro médio
$t_f$	Tempo mínimo de ruptura
$L$	Altura do corpo de prova
$\nu$	Coeficiente de Poisson
$v$	Velocidade de cisalhamento
'	Relativo a tensões efetivas
”	Polegadas
$\epsilon_a$	Deformação axial
$\epsilon_v$	Deformação volumétrica
$\tau$	Tensão de cisalhamento
$\sigma_1, \sigma_3$	Tensões principais, maior e menor
$\sigma'_c$	Tensão de confinamento efetiva
$\sigma_d$	Tensão desviadora
$\sigma_r$	tensão de ruptura
$\Delta\sigma_c$	Acréscimo de tensão confinante aplicado
$\Delta u$	Excesso de poropressão gerado
$\varphi'$	Ângulo de atrito
$c'$	Coesão
$\alpha'$	Ângulo de atrito no diagrama de Lambe
$a'$	Coesão no diagrama de Lambe
$k_o$	coeficiente de empuxo em repouso
$p'$	$(\sigma'_1 + \sigma'_3)/2$ (Tensão efetiva média normal)



q	$(\sigma'_1 - \sigma'_3) / 2$ (Tensão de Desvio)
E	Módulo de Young
t	Tonelada
kg	Kilograma
g	grama
GPa	Gigapascal
MPa	Megapascal
kPa	Kilopascal
Pa	Pascal
kN	kilonewton
m	metro
cm <sup>3</sup>	centímetros cúbicos
dm <sup>3</sup>	decímetro cúbico
µm	micrometro
mm	Milímetro
cm	Centímetros
°	Graus
meq	Miliequivalentes
°C	Graus centígrados
%	Porcentagem