



Jaime Rodrigo Tamayo Aguilar

**Análise do Comportamento
Mecânico de um Solo Arenoso
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 Informática da PUC-Rio.

Orientadora: Prof.^a Michéle Dal Toé Casagrande

Rio de Janeiro
Setembro de 2015



Jaime Rodrigo Tamayo Aguilar

**Análise do Comportamento
Mecânico de um Solo Arenoso
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 do Centro Técnico Científico da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

Prof. Michele Dal Toe Casagrande

Presidente / Orientador

Departamento de Engenharia Civil / PUC-Rio

Prof. Ana Cristina Castro Fontenla Sieira

Departamento de Engenharia Civil / UERJ

Prof. Raquel Quadros Velloso

Departamento de Engenharia Civil / PUC-Rio

Prof. José Eugenio Leal

Coordenador Setorial do Centro

Técnico Científico – PUC-Rio

Rio de Janeiro, 18 de setembro de 2015.

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

Jaime Rodrigo Tamayo Aguilar

Graduou-se em Engenharia Civil pela Escola Militar de Engenharia Mscal. Jose Antonio de Sucre (Cochabamba-Bolivia) em 2008. Trabalhou em projetos de água, saneamento básico, e obras publicas na Bolívia no período 2009-2013. Ingressou no mestrado de engenharia civil em 2013, na Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, desenvolvendo Dissertação na linha de pesquisa de Geotecnia Experimental com enfoque na linha de solos reforçados.

Ficha Catalográfica

Tamayo, Jaime Rodrigo Aguilar

Análise do comportamento mecânico de um solo arenoso reforçado com fibras de coco / Jaime Rodrigo Tamayo Aguilar ; orientadora: Michéle Dal Toé Casagrande. – 2015.

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

Dissertação (mestrado)–Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil, 2015.

Inclui bibliografia

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

CDD: 624

*Dedico este trabalho a meu Deus quem me deu esta
oportunidade e está comigo em todo momento e aos
meus pais pelo seu apoio incondicional e seus
ensinamentos durante toda minha vida.*

Agradecimentos

Agradeço a Deus, o todo poderoso, pois sem Ele nada teria acontecido.

Aos meus pais, Ronald e Carmen, por me dar a vida, por me ensinar o que é a família, os valores, a educação, obrigado por me mostrar que depois da queda sempre podemos levantar-nos, obrigado pela força em todo este tempo, vocês são minha inspiração e sem vocês não seria nada;

A Andrea que me deu amor e é meu apoio incondicional, quem me mostrou que a vida é mais do que eu pensava, obrigado por formar parte de minha vida, por me acompanhar em fechar um capítulo a mais e abrir mais folhas para escrever, obrigado pela tua compreensão, paciência, carinho, obrigado por ser você ;

Aos meus irmãos, Alvaro, Daniel e Cristhian por que caminharam comigo juntos, obrigado pelo carinho e apoio, aos meus sobrinhos: Sarita, David, Mateo, Daniela, Joshua e Ignacio pela sua simples existência que me mostram a simplicidade da vida;

À minha família, a minha avó Bruni e meu avô Rolito, grandes exemplos de pessoas, aos meus tios e primos;

À minha família no Brasil, Tia Silvia Martinez, Pastor João Nunes, Pastor Jose, Márcia e Marcos que me abriram a porta de sua casa para receber-me sem conhecer-me e dar-me como presente seu tempo e acolher-me como um integrante mais da família;

À Professora Michele, por acalmar e ordenar minhas ideias, obrigado pela motivação, orientação, compreensão, paciência e amizade oferecida neste período;

Aos professores do Mestrado de Geotecnia da PUC-Rio pelo seu tempo e conhecimento transmitido foi um prazer conviver e aprender de vocês;

Aos amigos os quais a pesar da distancia ainda estão comigo Osvaldo P., Davor M., Javicho B., Freddy P., Orlando R., Angiecita A., Fadeya S., Yonatan M., D. Torito, Chalito G., Cecita S, Jorge V.;

Aos novos amigos que viraram em muitas situações família com vocês aprendi muitas coisas que não se compram e simplesmente se ganham, obrigado Jeremy F., Carlos B., Andreia B., Marito R., Jose Daniel M., Teddy, Mauri N., Marce M.

A Ingrid, Natalia e Adriano pelo apoio brindado na elaboração dos ensaios, muito obrigado pelo seu tempo e paciência.

Ao pessoal do Laboratório de Geotecnia da PUC: Edson, Amaury, Carlos, Victor e os demais.

À professora Maria Isabel, do Departamento de Engenharia Química, pelos ensaios realizados.

À PUC-Rio, pela oportunidade de me permitir assumir este desafio;

Ao programa CAPES, pelo apoio financeiro durante o mestrado.

Resumo

Tamayo, Jaime Rodrigo Aguilar; Casagrande, Michéle Dal Toé. **Análise do Comportamento Mecânico de um Solo Arenoso Reforçado com Fibras de Coco**. Rio de Janeiro, 2015. 114 p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Apresenta-se o estudo experimental sobre o comportamento de um solo arenoso reforçado e não reforçado com fibras de coco, através da realização de ensaios físicos e mecânicos (ensaios triaxiais isotropicamente drenados). A fibra de coco utilizada foi cortada nos comprimentos de 25 e 50 mm, sabendo que seu diâmetro não é constante, por se tratar de uma fibra natural. Busca-se estabelecer padrões de comportamento que possam explicar a influência da adição de fibras de coco, relacionando-a com os parâmetros de resistência ao cisalhamento e deformação do solo arenoso. Os ensaios foram realizados em amostras compactadas na densidade relativa de 50% e umidade de 10%, variando os teores de fibra na proporção de 0,25; 0,50; e 0,75% em relação ao peso seco do solo. Constatou-se que a adição de fibra não modifica bruscamente as propriedades físicas na areia pura. Com relação ao comportamento mecânico comprovou-se a existência de um incremento na resistência ao cisalhamento em todas as misturas solo-fibra, uma vez que se observou um expressivo aumento do intercepto coesivo das misturas, e um discreto aumento do ângulo de atrito, em comparação aos resultados obtidos para a areia pura. Selecionou-se a mistura que apresentou os melhores resultados de resistência e submeteu-se as fibras a um processo de impermeabilização, com o objetivo de aumentar a vida útil do compósito, onde foi conferido que os parâmetros de resistência não se alteraram quando comparados a mistura com fibras sem impermeabilização. Os resultados se mostraram satisfatórios para aplicação da areia-fibra em camadas de aterros sanitários e aterros sobre solos moles, dando assim uma destinação mais sustentável a esse resíduo, garantindo soluções temporárias e mais econômicas.

Palavras-chave

Fibras naturais; fibras de coco; solos reforçados; triaxiais.

Abstract

Aguilar, Jaime Rodrigo Tamayo; Casagrande, Michéle Dal Toé (Advisor). **Analysis of Mechanical Behavior of a Sandy Soil Reinforced with Coir Fibers.** Rio de Janeiro, 2015. 114 p. MSc Dissertation – Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

We report the experimental study on the behavior of a reinforced sandy soil and not reinforced with coir fibers, by conducting physical and mechanical tests (isotropic drained triaxial tests). Coir used was cut in lengths of 25 and 50 mm, knowing that its diameter is not constant, because it is a natural fiber. The aim is to establish behavior patterns that might explain the influence of the addition of coir fibers, relating it to the shear strength parameters and deformation of sandy soil. The tests were performed on specimens compressed in relative density of 50% and 10% moisture, varying fiber contents in the proportion of 0.25; 0.50; and 0.75% on the dry weight of the soil. It was found that the presence of the fiber does not change the physical properties of pure sand. With regard to mechanical behavior proved the existence of an increase in shear strength in all soil-fiber mixtures, since it was observed a significant increased cohesive intercept of mixtures, and a modest increase in friction angle, compared to the results obtained for the pure sand. The fibers of the mixture showed the best strength results were subjected to a sealing process with the aim of increasing the useful life of the composite, where the strength parameters have not changed compared to the mixture without sealing fibers. The results were satisfactory for use in sand-fiber landfill layers and embankments on soft soils, thus giving a more sustainable destination to this waste, ensuring temporary and more economical solutions.

Keywords

Natural fibers; coir fiber; soil reinforced; triaxial test.

SUMARIO

1	INTRODUÇÃO	17
1.1	OBJETIVOS E AÇÕES	19
1.1.1	Objetivo Geral.....	19
1.1.2	Objetivos Específicos e Ações	19
1.2	ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO	21
2	REVISÃO DA LITERATURA	22
2.1	SOLOS REFORÇADOS.....	22
2.1.1	Desenvolvimento Histórico	22
2.1.2	Tipos de fibras empregadas como reforço	24
2.1.2.1	Fibras Poliméricas.....	24
2.1.2.2	Fibras Minerais.....	26
2.1.2.3	Fibras Metálicas	27
2.1.2.4	Fibras Vegetais	27
2.2	ESTUDOS EXPERIMENTAIS DA FIBRA DE COCO.....	30
2.2.1	Fibra de coco verde.....	30
2.2.2	Propriedades mecânicas das fibras de coco	31
2.2.3	Morfologia fibra de coco	32
2.2.4	Efeitos térmicos	33
2.2.5	Durabilidade das fibras em ambientes alcalinos	34
2.2.6	Tratamento para a impermeabilização das fibras de coco	36
2.3	MECANISMOS DE INTERAÇÃO SOLO-FIBRA (ESTUDOS EXPERIMENTAIS)	37
2.4	ALTERAÇÕES NAS PROPRIEDADES DOS SOLOS PELA INCLUSÃO DE FIBRAS	47
2.4.1	Compactação	47
2.4.2	Resistência ao cisalhamento de pico	48
2.4.2.1	Material Argiloso.....	48
2.4.2.2	Material Granular.....	50
2.4.3	Resistência ao Cisalhamento Pós-Pico.....	51
2.4.4	Deformabilidade	52
2.4.5	Modo de ruptura	53

2.4.6	Variação Volumétrica	54
2.4.7	Rigidez Inicial	54
2.4.8	Condutividade Hidráulica e outras propriedades	55
3	PROGRAMA EXPERIMENTAL.....	56
3.1	CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS UTILIZADOS	56
3.1.1	Areia	56
3.1.2	Fibras de coco	57
3.1.3	Água	58
3.1.4	Sílica Coloidal.....	58
3.2	PREPARAÇÃO DOS MATERIAIS	59
3.2.1	Preparação das misturas para ensaiar.....	59
3.2.2	Preparação das Fibras de Coco Impermeabilizadas.....	61
3.3	MÉTODOS E PROCEDIMENTOS DE ENSAIO.....	62
3.3.1	Ensaio Triaxial (CID)	62
3.3.2	Análise do alongamento e Rupturas das Fibras.....	67
3.3.3	Ensaio de Tomografia.....	68
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	70
4.1	ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DA AREIA E MISTURAS.....	70
4.1.1	Densidade Real dos Grãos	71
4.1.2	Análise Granulométrica	71
4.1.3	Índice de Vazios máximo e mínimo	72
4.2	ENSAIOS TRIAXIAIS	72
4.2.1	Misturas Areia-Fibra de coco.....	73
4.2.1.1	Controle da condutividade hidráulica.....	73
4.2.1.2	Comportamento Tensão Desviadora e Variação Volumétrica vs. Deformação Axial.....	74
4.2.1.3	Quadros comparativo das curvas tensão-deformação por comprimento de fibra.....	81
4.2.1.4	Quadros comparativo das curvas tensão-deformação por teor de fibra	85
4.2.1.5	Envoltórias e Parâmetros de Resistência ao Cisalhamento	88
4.2.2	Mistura Areia – Fibra de coco impermeabilizada.....	91
4.2.2.1	Controle da condutividade hidráulica (mistura impermeabilizada)	92

4.2.2.2	Comportamento Tensão Desviadora e Variação Volumétrica vs. Deformação Axial.....	92
4.2.2.3	Envoltória e Parâmetros de Resistência ao Cisalhamento.....	94
4.3	ANÁLISE DO ALONGAMENTO E RUPTURA DAS FIBRAS	95
4.4	ENSAIOS DE TOMOGRAFIA	96
4.5	COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS COM BASE NA LITERATURA EXISTENTE	100
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	102
5.1	CONCLUSÕES	102
5.2	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	104
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	106

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Processo de obtenção da fibra de coco	31
Figura 2: Microscopia ótica das fibras de coco (Esq.) corte transversal, (Der.) superficial.	33
Figura 3: Acréscimo de resistência em função da inclinação da fibra (Gray e Ohashi, 1983)	38
Figura 4: Disposição fibra/ fissura idealizada (Taylor, 1994)	41
Figura 5: Cortes da fibra de coco, (a) comprimento 50 mm, (b) 25 mm.	57
Figura 6: Processo de mistura solo - fibra.	60
Figura 7: Processo de impermeabilização da fibra de coco.	61
Figura 8: Prensa triaxial da marca Wykeham-Ferrance. (a) Medidor de variação de volume tipo imperial College, (b) Reservatório de água do topo, (c) Painel de controle das pressões, (d) Caixa leitora de dados, (e) Pressão confinante, (f) Cilindro acrílico reforçado, (g) Controle para início do cisalhamento, (h) Transdutor de pressão, e (i) Controle manual de movimento fino do pistão.	63
Figura 9: Equipamento eletrônico do ensaio triaxial (a) Software CatmanEasy; (b) Sistema de aquisição de dados (Ramirez, 2012).	63
Figura 10: Montagem do corpo de prova (solo arenoso)	64
Figura 11: Descrição do equipamento Xradia 510 Versa 3D	68
Figura 16: Distribuição de curvas granulométricas	71
Figura 13: Curvas da Tensão - Deformação e de Variação Volumétrica para a areia pura em ensaios triaxiais	75
Figura 14: Curvas Tensão – Deformação e de Variação Volumétrica da areia pura e a mistura A025C25 em ensaios triaxiais.	76
Figura 15: Curvas Tensão – Deformação e de Variação Volumétrica da areia pura e a mistura A025C50 em ensaios triaxiais.	77
Figura 16: Curvas Tensão – Deformação e de Variação Volumétrica da areia pura e a mistura A050C25 em ensaios triaxiais.	78
Figura 17: Curvas Tensão – Deformação e de Variação Volumétrica da areia pura e a mistura A050C50 em ensaios triaxiais.	79
Figura 18: Curvas Tensão – Deformação e de Variação Volumétrica da areia pura e a mistura A075C25 em ensaios triaxiais.	80

Figura 19: Curvas Tensão – Deformação e de Variação Volumétrica da areia pura e a mistura A075C50 em ensaios triaxiais.	81
Figura 20: Curvas da tensão - deformação para areia pura e misturas com comprimento de fibra igual a 25 mm em ensaios triaxiais de 50 kPa de tensão efetiva.	82
Figura 21: Curvas da tensão - deformação para areia pura e misturas com comprimento de fibra igual a 25 mm em ensaios triaxiais de 100 kPa de tensão efetiva.	82
Figura 22: Curvas da tensão - deformação para areia pura e misturas com comprimento de fibra igual a 25 mm em ensaios triaxiais de 150 kPa de tensão efetiva.	83
Figura 23: Curvas da tensão - deformação para areia pura e misturas com comprimento de fibra igual a 50 mm em ensaios triaxiais de 50 kPa de tensão efetiva.	84
Figura 24: Curvas da tensão - deformação para areia pura e misturas com comprimento de fibra igual a 50 mm em ensaios triaxiais de 100 kPa de tensão efetiva.	84
Figura 25: Curvas da tensão - deformação para areia pura e misturas com comprimento de fibra igual a 50 mm em ensaios triaxiais de 150 kPa de tensão efetiva.	85
Figura 26: Curvas da tensão - deformação para areia pura e misturas com 0,25% de teor de fibra em ensaios triaxiais.	86
Figura 27: Curvas da tensão - deformação para areia pura e misturas com 0,50% de teor de fibra em ensaios triaxiais.	86
Figura 28: Curvas da tensão - deformação para areia pura e misturas com 0,75% de teor de fibra em ensaios triaxiais.	87
Figura 29: Envoltória de resistência ao cisalhamento da areia pura e misturas com teor de 0,25% de fibra de coco.	88
Figura 30: Envoltória de resistência ao cisalhamento da areia pura e misturas com teor de 0,50% de fibra de coco.	89
Figura 31: Envoltória de resistência ao cisalhamento da areia pura e misturas com teor de 0,75% de fibra de coco.	90
Figura 32: Envoltória de resistência ao cisalhamento da areia pura e misturas.	90

Figura 33: Curvas Tensão – Deformação e de Variação Volumétrica da areia pura e as misturas A050C50 e AI050C50 em ensaios triaxiais.....	93
Figura 34: Envoltória de resistência ao cisalhamento da areia pura e as misturas A50C50 e AI050C50.....	94
Figura 35: Comprimento final das fibras vs. porcentagem de fibras do mesmo comprimento na mistura A050C50 submetida nas três tensões efetivas estudadas.	95
Figura 36: Representação do mecanismo de alongamento e ruptura das fibras submetidas à compressão isotrópica (Casagrande, 2005).....	96
Figura 33: Imagens de tomografia 3D, secção transversal com fibras bem distribuídas.....	97
Figura 34: Imagens de tomografia 3D, secção transversal com fibras acumuladas.....	98
Figura 35: Imagens de tomografia 3D, secção transversal com alinhamentos.....	99

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Ações da pesquisa	20
Tabela 2: Propriedades das fibras Poliméricas (Hollaway, 1994)	26
Tabela 3: Propriedades físicas e mecânicas das fibras minerais (Curcio, 2001)	27
Tabela 4: Principais fontes de fibras vegetais (Young, 1994)	28
Tabela 5: Propriedades físicas e mecânicas das fibras vegetais (Bledzki e Gassan, 1999; Motta, 2006; Levy Neto e Pardini, 2006; Spinacé <i>et. al.</i> , 2009)	28
Tabela 6: Propriedades físicas da fibra de coco (Tomczak, 2010).....	32
Tabela 7: Resistência à tração das fibras de coco submetidas a degradações químicas	35
Tabela 8: Resumo das propriedades mecânicas das fibras de coco (Tomczak, 2010).	58
Tabela 9: Resumo das propriedades físicas da Sílica Coloidal (fornecedor).....	59
Tabela 10: Descrição das misturas avaliadas.	60
Tabela 11: Propriedades físicas da areia e das misturas.....	70
Tabela 12: Índices Físicos da Areia	72
Tabela 13: Controle da condutividade hidráulica (k)	74
Tabela 14: Parâmetros de resistência ao cisalhamento da areia pura e misturas.....	91
Tabela 15: Controle da condutividade hidráulica (k)	92
Tabela 16: Parâmetros de resistência ao cisalhamento da areia pura e as misturas A050C50 e A1050C50.....	94
Tabela 16: Tipos de misturas selecionadas para comparar	100
Tabela 17: Quadro comparativo dos parâmetros de resistência entre pesquisas	100

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

w	Teor de umidade
γ_d	Peso específico seco
γ_s	Peso específico dos grãos
ρ	Massa específica do solo
Gs	Massa específica real dos grãos
e	Índice de vazios
$e_{\text{máx}}$	Índice de vazios máximo
$e_{\text{mín}}$	Índice de vazios mínimo
D_{10}	Diâmetro efetivo
D_{50}	Diâmetro médio
u	Coeficiente de Poisson
"	Polegadas
E	Módulo de Young
t	Tonelada
kg	Kilograma
g	grama
GPa	Gigapascal
MPa	Megapascal
kPa	Kilopascal
Pa	Pascal
kN	Kilonewton
m	Metro
mm	Milímetro
cm	Centímetros
%	Porcentagem

*"A persistência é o menor caminho do êxito".
(Charles Chaplin)*

*Tudo o que fizerem, façam de todo o coração,
como para o Senhor, e não para os homens.
Colossenses 3:23*