



Juan Manuel Girao Sotomayor

**Avaliação do comportamento carga-recalque de uma
areia reforçada com fibras de coco submetidos a ensaios
de placa em verdadeira grandeza**

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: Prof^a. Michéle Dal Toé Casagrande

Rio de Janeiro
Agosto de 2014



Juan Manuel Girao Sotomayor

**Avaliação do comportamento carga-recalque de uma
areia reforçada com fibras de coco submetidos a ensaios
de placa em verdadeira grandeza**

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^a. Michéle Dal Toé Casagrande

Orientadora

Departamento de Engenharia Civil - PUC-Rio

Prof. Flávio de Andrade Silva

Departamento de Engenharia Civil - PUC-Rio

Prof^a. Raquel Quadros Velloso

Departamento de Engenharia Civil - PUC-Rio

Prof. José Eugenio Leal

Coordenador Setorial do Centro
Técnico Científico – PUC-Rio

Rio de Janeiro, 15 de Agosto de 2014

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

Juan Manuel Girao Sotomayor

Graduou-se em Engenharia Civil pela Universidade Nacional San Agustín (Arequipa-Peru) em 2005. Trabalhou em projetos mineiros e obras geotécnicas no Peru no período 2005-2012. Ingressou no mestrado de engenharia civil em 2012, na Pontifícia Universidade Católica do Rio, desenvolvendo Dissertação na linha de pesquisa de Geotecnia Experimental com enfoque na linha de solos reforçados.

Ficha Catalográfica

Sotomayor, Juan Manuel Girao

Avaliação do comportamento carga-recalque de uma areia reforçada com fibras de coco submetidos a ensaios de placa em verdadeira grandeza / Juan Manuel Girao Sotomayor ; orientadora: Michéle Dal Toé Casagrande. – 2014.

(132) f. ; 30 cm

Dissertação (Mestrado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil, 2014.

Inclui bibliografia

1. Engenharia civil – Teses. 2. Reforço de solos. 3. Fibras de coco. 4. Ensaio de placa. 5. Comportamento carga-recalque. 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 Deus que,
apesar de estarmos distraídos
com preocupações diferentes,
ele está sempre conosco
porque Ele nos ama.
Dedico também aos meus pais
pelos seus exemplos,
dados a mim e minhas irmãs,
de luta, perseverança
e de confiança em Deus.*

Agradecimentos

Primeiro agradeço a Deus por me dar a vida e a oportunidade de conhecer tantas pessoas maravilhosas durante a realização desta tese.

Para os meus pais Juan e Blanca, por seu amor, conselhos e principalmente pelas correções, todas as minhas conquistas antes de serem minhas, são de vocês.

À minha orientadora, Michéle Casagrande, obrigado pela oportunidade de trabalhar com você, sem dúvida alguma, todo o apoio acadêmico e logístico para adquirir equipamentos e materiais para o desenvolvimento desta pesquisa é a mostra de sua dedicação e compromisso entregada sempre aos seus orientados.

Aos professores da pós-graduação da PUC-Rio, que em cada aula entregam mais do que conhecimento, entregam sua experiência e qualidade de pessoas, obrigado por tudo o ensinado nesses anos.

Aos profissionais do Laboratório de Estruturas e Geotecnia, Prof. Antônio Roberto, Prof. Flávio e Prof. Sebastião, Carla, Thiago, Euclides, Rogerio, José, Alexis, Amaury e Edson que sempre estavam prontos para me apoiar na realização dos ensaios.

Aos alunos de iniciação científica, Vanessa, Lucas, Daniela, Luiz, Julia, Leonderson, e Rebeca e meu amigo Carlos Belleza que em meio de suas responsabilidades acadêmicas tinham tempo para me apoiar na preparação dos ensaios.

Aos meus grandes amigos que viraram parte da família que fiz em Brasil, por seu apoio, carinho e amizade, Laura Barragán, Gustavo Cusma, Rhaissa Rodrigues, Jeferson Menacho, Sandra Trindade, José Moreno, Camilla Duarte, Raúl Contreras, Nathalia Lopes, Edison Polo, Rossio García, Jimmy Vásquez, Deysi García e Fernando Conto.

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

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

Aos engenheiros Miguel de la Torre, Pedro Isique, Boris Castillo, Denys Parra, Calixtro Yanqui e Oscar Rendón, pelos ensinamentos e por me apoiar para realizar o mestrado em Brasil.

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

Resumo

Sotomayor, Juan Manuel Girao; Casagrande, Michéle Dal Toé. **Avaliação do comportamento carga-recalque de uma areia reforçada com fibras de coco submetidos a ensaios de placa em verdadeira grandeza.** Rio de Janeiro, 2014. 132 p. Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Este estudo avaliou a influência da inclusão de fibra de coco como reforço de solo. 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. Foi realizada uma comparação entre a areia pura e a areia reforçada com fibras de coco para avaliar o comportamento carga-recalque por meio de ensaios de placa em verdadeira grandeza. O objetivo é usar a fibra de coco que normalmente é descartada em grande quantidade, após o consumo do fruto. Procura-se estabelecer padrões de comportamento que possam explicar a influência da inclusão de fibras aleatoriamente distribuídas e de fibras colocadas no formato de manta entre as camadas de solo. Os ensaios foram realizados utilizando uma densidade relativa padrão de 50% e um teor de umidade de 10%. Foi observado nas curvas carga-recalque que o reforço de fibra em manta conseguiu uma diminuição maior do recalque, mas com um maior fissuramento superficial, enquanto que o reforço com as fibras colocadas aleatoriamente conseguiu uma menor redução dos recalques, mas uma melhor inibição da propagação de fissuras. Ambos os resultados, comparados com a areia sem adição de fibras, demonstraram uma maior resistência e redução do recalque ocorrido na areia pura. Os resultados são satisfatórios para a aplicação de reforço de solo com fibras de coco em camadas de aterros sanitários e aterros sobre solos moles, dentre outros, dando um fim mais nobre para este material e obtendo-se uma solução para o problema da acumulação da fibra de coco, devido ao grande consumo existente na cidade de Rio de Janeiro.

Palavras-chave

Reforço de solos; fibras de coco; ensaios de placa; comportamento carga-recalque.

Abstract

Sotomayor, Juan Manuel Girao; Casagrande, Michéle Dal Toé (Advisor). **Evaluation of Load-Settlement Behavior of Coconut Fibers Reinforced Sand under Plate Load Tests in Real Scale.** Rio de Janeiro, 2014. 132 p. MSc. Dissertation – Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

This study evaluated the influence of the inclusion of coconut fiber as reinforcement of soil. 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. Sandy soil reinforced and unreinforced were compared, evaluating load-settlement behavior through real-scale plate load testing. The aim is to use the coconut fiber, discarded in large quantities after consumption of the fruit. It seeks to establish patterns of behavior that may explain the influence of the inclusion of fibers randomly (individual) and as a reinforcing mat (composed) between layers of soil. The tests were performed using as a standard, a relative density of 50% and a humidity content of 10%. The load-settlement curves showed a better stress distribution using fiber rug but a greater degree of surface fissuring was noted. Instead using randomization distribution, stress distribution was lower but was inhibited surface fissuring propagation; both results were compared with soil without addition of fibers increased resistance to settlement. The results are satisfactory for an application of reinforcement layers of soil in landfills and platforms over soft ground, giving a nobler end to this material, trying to give a solution to the problem of accumulation due to the large consumption existing in Rio de Janeiro city.

Keywords

Reinforced soil; coconut fiber; Plate load tests; Load-settlement behavior.

Sumário

1 . Introdução	
1.1. Problema, relevância e justificativa da pesquisa	9
1.2. Objetivos	11
1.2.1. Objetivo Geral	11
1.2.2. Objetivos específicos	11
1.3. Contribuições ao estado da arte	11
1.4. Definições básicas	12
1.5. Organização da tese	14
2 . Revisão da literatura	
2.1. Considerações iniciais	15
2.2. Solos reforçados	15
2.2.1. Desenvolvimento histórico	15
2.2.2. Fibras como reforço de solos	17
2.2.3. Tipos de fibras empregadas como reforço	19
2.3. Fibras vegetais empregadas como reforço	24
2.4. Estudos experimentais com fibra de coco	27
2.5. Mecanismos de interação solo-fibra	31
2.6. Prova de placa de carga em placa	40
2.6.1. Considerações iniciais	40
2.6.2. Estudos experimentais	40
3 . Programa Experimental	
3.1. Considerações iniciais	48
3.2. Fatores de influência	48
3.3. Materiais utilizados	49
3.3.1. Areia	49
3.3.2. Fibras	50

3.4. Equipamentos	51
3.4.1. Transdutores	51
3.4.2. Sistema de aquisição de dados	56
3.4.3. Caixa de ensaios	56
3.4.4. Sistema de carregamento	58
3.5. Ensaio de Placa de carga em verdadeira grandeza	59
4 . Apresentação e análises dos resultados	
4.1. Considerações Iniciais	61
4.2. Descrição dos Ensaios	61
4.2.1. Ensaio 1: Areia Seca	61
4.2.2. Ensaio 2: Areia úmida	66
4.2.3. Ensaio 3: Areia úmida com fibras inseridas em manta	72
4.2.4. Ensaio 4: Areia úmida com fibras inseridas aleatoriamente	77
4.3. Exumação dos ensaios úmidos	82
4.3.1. Ensaio 2: Areia úmida	82
4.3.2. Ensaio 3: Areia úmida com fibras inseridas em manta	83
4.3.3. Ensaio 4: Areia úmida com fibras inseridas aleatoriamente	84
4.4. Influência do teor de umidade	85
4.5. Influência da adição de fibra	86
4.6. Influência da disposição da fibra	88
4.7. Comparação geral entre areia sem e com reforço	89
4.8. Comparação entre os mecanismos de ruptura	91
4.9. Comparação dos resultados com base na literatura existente	96
5 . Considerações Finais	
5.1. Conclusões	99
5.1.1. Conclusões Gerais	99
5.1.2. Conclusões com relação às fibras inseridas em manta	101
5.1.3. Conclusões com relação às fibras inseridas aleatoriamente	101
5.2. Sugestões para futuros trabalhos	102
6 . Referências Bibliográficas	

Lista de Figuras

Figura 2.1 - Disposição fibra/fissura idealizada (Taylor, 1994)	18
Figura 2.2 - Acréscimo de resistência em função da inclinação da fibra ..	32
Figura 3.1 - Curva granulométrica da areia	49
Figura 3.2 - Corte das fibras de coco	50
Figura 3.3 - Calibração do Transdutor de Deslocamento 1	54
Figura 3.4 - Calibração do Transdutor de Deslocamento 2	54
Figura 3.5 - Calibração do Transdutor de Deslocamento 3	54
Figura 3.6 - Calibração do Transdutor de Deslocamento 4	55
Figura 3.7 - Calibração do Transdutor de Deslocamento 5	55
Figura 3.8 - Sistema de aquisição de dados	56
Figura 3.9 - Caixa de ensaios	57
Figura 3.10 - Distribuição das camadas	57
Figura 3.11 - Sistema de carregamento	58
Figura 3.12 - Distribuição dos transdutores de deslocamento	60
Figura 4.1 - Espalhamento da areia	62
Figura 4.2 - Carga - recalque - Transdutores 3, 4 e 5 (areia seca)	63
Figura 4.3 - Carga - recalque - Transdutores 1 e 2 (areia seca)	63
Figura 4.4 - Carga - recalque - Areia Seca	64
Figura 4.5 - Recalques fora da placa - Areia Seca	64
Figura 4.6 - Posição inicial dos equipamentos - Areia Seca	65
Figura 4.7 - Posição final dos equipamentos - Areia Seca	65
Figura 4.8 - Colocação da areia tingida - vista elevação	66
Figura 4.9 - Colocação da areia tingida - vista superior	67
Figura 4.10 - Provas com areia tingida	67
Figura 4.11 - Cobertura plástica sobre a caixa	68
Figura 4.12 - Colocação de areia tingida e nivelação da camada	68
Figura 4.13 - Nivelação vertical e horizontal da placa de aço	69
Figura 4.14 - Colocação dos transdutores de deslocamento	69
Figura 4.15 - Carga - Recalque - Transdutores 3, 4 e 5 (areia úmida)	70
Figura 4.16 - Carga - Recalque - Transdutores 1 e 2 (areia úmida)	70
Figura 4.17 - Carga - Recalque - Areia Úmida sem Fibra	71
Figura 4.18 - Comparativo dos recalques (Areia Seca e Areia úmida)	72

Figura 4.19 - Distribuição da manta de fibra de coco	73
Figura 4.20 - Colocação da manta de fibra de coco	73
Figura 4.21 - Rotação da placa de aço	74
Figura 4.22 - Carga - Recalque - Transdutores 3, 4 e 5 (fibra em manta)	74
Figura 4.23 - Carga - Recalque - Transdutores 1 e 2 (fibra em manta)	75
Figura 4.24 - Distribuição de tensões (fibra em manta)	75
Figura 4.25 - Carga - Recalque - Areia Úmida com fibra em manta	76
Figura 4.26 - Comparativo dos recalques Areia úmida sem fibra e Areia úmida com fibra (manta).....	76
Figura 4.27 - Distribuição aleatória da fibra de coco	78
Figura 4.28 - Posição inicial dos transdutores de deslocamento (fibra aleatória)	79
Figura 4.29 - Posição final dos transdutores de deslocamento (fibra aleatória)	79
Figura 4.30 - Carga - recalque - Transdutores 3, 4 e 5 (fibra aleatória)....	80
Figura 4.31 - Carga - recalque - Transdutores 1 e 2 (fibra aleatória)	80
Figura 4.32 - Carga – Recalque – Areia Úmida com fibra aleatória.....	81
Figura 4.33 - Comparativo dos recalques Areia úmida com fibra em manta e com fibra aleatória	81
Figura 4.34 - Retiro do Paineiro para exumação	82
Figura 4.35 - Exumação da areia - Ensaio 2.....	82
Figura 4.36 - Corte até o eixo de carregamento - Ensaio 2.....	83
Figura 4.37 - Exumação da areia - Ensaio 3.....	83
Figura 4.38 - Corte até o eixo de carregamento - Ensaio 3.....	84
Figura 4.39 - Exumação da areia - Ensaio 4	84
Figura 4.40 - Corte até o eixo de carregamento - Ensaio 4.....	85
Figura 4.41 - Influência do teor de umidade.....	85
Figura 4.42 - Influência da adição de fibra (aleatória)	87
Figura 4.43 - Influência da disposição da fibra na areia.....	88
Figura 4.44 - Curvas tensão-recalque de todos os ensaios	90
Figura 4.45 - Campo de deslocamento da ruptura generalizada.....	91
Figura 4.46 - Campo de deslocamento da ruptura localizada.....	92
Figura 4.47 - Campo de deslocamento do ensaio 2 (areia úmida)	92
Figura 4.48 - Campos de deslocamento da ruptura por punção.....	92

Figura 4.49 - Campo de deslocamento do ensaio 4 (fibra aleatória)	93
Figura 4.50 - Mecanismo de ruptura localizada da areia sem fibra.....	93
Figura 4.51 - Mecanismo de ruptura por puncionamento da areia com fibra em manta	94
Figura 4.52 - Mecanismo de ruptura por puncionamento da areia com fibra aleatória.....	94
Figura 4.53 - Ação das fibras na trinca de tração.....	95
Figura 4.54 - Comparação com resultados de outros estudos	97

Lista de Tabelas

Tabela 2.1 - Propriedades das fibras minerais (Curcio, 2001).....	20
Tabela 2.2 - Propriedades das fibras poliméricas	22
Tabela 2.3 - Principais fontes de fibras vegetais (Young, 1994)	23
Tabela 2.4 - Propriedades físicas e mecânicas das fibras vegetais (Bledzki e Gassan, 1999; Motta, 2006; Levy Neto e Pardini, 2006; Satyanarayan et al.,1982; Spinacé et al., 2009).....	24
Tabela 2.5 - Composição das fibras vegetais (Bledzki e Gassan, 1999) ..	27
Tabela 2.6 - Propriedades da fibra de coco (Costa, 2006).....	28
Tabela 2.7 - Ângulos helicoidais de algumas fibras.....	29
Tabela 3.1 - Índices físicos da areia	49
Tabela 3.2 - Código dos transdutores de deslocamento.....	51
Tabela 3.3 - Resultados da Calibração	52
Tabela 3.4 - Relação de Ensaios	60
Tabela 4.1 - Porcentagem de redução de recalque por adição de umidade	86
Tabela 4.2 - Porcentagem de redução de recalque por adição de fibra....	87
Tabela 4.3 - Porcentagem de redução do recalque por disposição da fibra	89
Tabela 4.4 - Porcentagem de redução do recalque geral.....	90
Tabela 4.5 - Características do equipamento	96
Tabela 4.6 - Características do reforço	96
Tabela 4.7 - Características do solo	97

Lista de Símbolos

ω	Teor de umidade
γ_d	Peso específico seco
γ_s	Peso específico dos grãos
ρ	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
ν	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