



Cristiane Arantes Ferreira

**Estudo do Comportamento Mecânico de Solos Reforçados
com Fibras através do Método de Elementos Discretos**

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.

Orientador: Eurípedes do Amaral Vargas Junior

Co-orientadora: Michéle Dal Toé Casagrande

Rio de Janeiro
Junho de 2010



Cristiane Arantes Ferreira

Estudo do Comportamento Mecânico de Solos Reforçados com Fibras através do Método de Elementos Discretos

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. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

Eurípedes do Amaral Vargas Júnior

Orientador

Departamento de Engenharia Civil - PUC-Rio

Michéle Dal Toé Casagrande

Co-orientadora

Departamento de Engenharia Civil - PUC-Rio

Nilo Cesar Consoli

UFRGS

Tácio Mauro Pereira de Campos

Departamento de Engenharia Civil - PUC-Rio

José Eugênio Leal

Coordenador Setorial do Centro

Técnico Científico - PUC-Rio

Rio de Janeiro, 06 de junho de 2010

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

Cristiane Arantes Ferreira

Graduou-se em Engenharia Civil pela Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF) em 2007. Ingressou no mestrado na Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro em 2007, desenvolvendo Dissertação na linha de pesquisa de Geotecnia aplicada a reforço de solos.

Ficha Catalográfica

Ferreira, Cristiane Arantes

Estudo do comportamento mecânico de solos reforçados com fibras através do método de elementos discretos / Cristiane Arantes Ferreira ; orientador: Eurípedes do Amaral Vargas Junior ; co-orientadora: Michéle Dal Toé Casagrande. – 2010.

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

Dissertação (mestrado)–Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil, 2010.

Inclui bibliografia

1. Engenharia civil – Teses. 2. Método dos Elementos Discretos. 2. MED. 3. Reforço de solos com fibras. 4. Modelagem numérica. 5. Ensaio biaxial. I. Vargas Junior, Eurípedes do Amaral. II. Casagrande, Michéle Dal Toé. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Civil. IV. Título.

CDD: 624

Dedico esta Dissertação à minha família,
em especial aos meus pais,
Paulo e Vanda.

Agradecimento

À Deus, criador de todas as coisas, por iluminar meu caminho e pela força para superar grandes obstáculos. Sem ele nada disso seria possível.

Aos meus pais, Vanda e Paulo por me proporcionar tudo o que tenho e o que sou pelo amor incondicional e total apoio durante toda a minha vida. Aos meus irmãos Vinícius e Bianca, pela amizade e carinho. A toda família, pela bondade e incentivo. Ao Fabinho, pelo companheirismo.

À minha amiga Fernanda por entender minha ausência.

A duas pessoas muito especiais presentes em todo o processo desta dissertação: Raquel Velloso e Michéle Casagrande. Não tenho palavras para expressar meu agradecimento.

Aos todos os meus amigos da “favelinha” na Puc-Rio, em especial ao Danilo, ao David, a Carla, ao Luis e a Luciana.

A todos os meus amigos da UFJF (Universidade Federal de Juiz de Fora), e aos colegas de trabalho que de uma forma ou de outra me estimularam ou me ajudaram.

Ao Departamento de Engenharia Civil da PUC-Rio, em especial a Rita, pelo excelente atendimento aos professores e aos alunos.

À minha amiga Michela que além de dividir as contas comigo sempre me proporciona bons e descontraídos momentos além de excelentes conselhos.

À minha prima Amanda por me acolher quando cheguei ao Rio de Janeiro.

Ao Professor Eurípedes Vargas, orientador deste trabalho, a quem admiro por ser excelente professor e pesquisador.

A CAPES pelo apoio financeiro.

E finalmente a Sandra, excelente profissional, muito importante nesta etapa final.

Resumo

Ferreira, Cristiane Arantes; Vargas Júnior, Eurípedes do Amaral (Orientador); Casagrande, Michéle Dal Toé (Co-Orientadora). **Estudo do Comportamento Mecânico de Solos Reforçados com Fibras através do Método de Elementos Discretos**. Rio de Janeiro, 2010. 118p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Um grande número de novos materiais geotécnicos foi desenvolvido baseado na adição de materiais fibrosos, sendo incorporados como elementos de reforço. A técnica de solo reforçado pode ser representada pela produção e aplicação, não somente de fibra natural, mas também de fibras sintéticas e poliméricas. Estudos anteriores de solos reforçados com fibras de polipropileno têm mostrado melhora significativa das propriedades mecânicas dos solos, tais como o aumento da resistência de pico e resistência pós-pico, ductilidade e tenacidade. Estes resultados mostram um grande potencial deste tipo de fibra, quando utilizado como reforço de solos, por exemplo, em base de fundações superficiais, aterros sobre solos moles e *liners* de cobertura de aterros sanitários. A partir de ajustes matemáticos para determinar a interação entre solos granulares e observações do comportamento global em macro-escala tornou possível analisar o comportamento de solos granulares reforçados com fibras de uma forma micro-mecânica. A modelagem numérica do comportamento mecânico de solos reforçados com fibras de polipropileno, através de uma análise micro-mecânica, utiliza como ferramenta o Método dos Elementos Discretos (MED), que permite a representação do solo em 2D, a partir de um conjunto de partículas de elementos discretos circulares. O MED descarta a visão clássica do solo como uma forma contínua, proporcionando a possibilidade de modelá-lo como partículas constituintes. Sua formulação baseia-se no equilíbrio de forças e de deslocamentos gerados pelos contatos, os quais são descritos através das leis da física clássica, permitindo o mapeamento dos movimentos de cada partícula. A vantagem da micro-mecânica é a possibilidade de explicitar microestruturas, tais como fibras de polipropileno, responsáveis pela mudança no comportamento do solo. Com base no estudo deste fenômeno,

causado pela inserção de fibras de polipropileno em materiais granulares, formulações matemáticas foram propostas com a finalidade de descrever o comportamento de solos reforçados através da implementação do código de elementos discretos (DEMLib). Após a calibração e validação do programa, a influência decorrente da inserção do reforço de fibra ao solo foi analisada, sendo realizadas simulações de ensaios biaxiais em amostras discretas de areia, com e sem o reforço fibroso. O comportamento micro-mecânico de misturas reforçadas permitiu avaliar os efeitos das mudanças no teor de fibras presente na matriz de solo, bem como diferentes rigidezes das fibras. Conclui-se que o estudo realizado pelo Método dos Elementos Discretos identificou a real interação entre as partículas do solo e do reforço em forma de fibra, indicando que as fibras, quando inseridas no solo, podem sofrer deformações plásticas de tração e alongamento até atingir a ruptura, proporcionando a melhora nos parâmetros mecânicos do solo.

Palavras-chave

Método dos Elementos Discretos; MED; reforço de solos com fibras; modelagem numérica; ensaio biaxial.

ABSTRACT

Ferreira, Cristiane Arantes; Vargas Júnior, Eurípedes do Amaral (Advisor); Casagrande, Michéle Dal Toé (Co-Advisor). **Study of Mechanical Behavior of Fiber Reinforced Soil through Discrete Element Method.** Rio de Janeiro, 2010. 118p. MSc Dissertation - Civil Engineering Department, Pontifical Catholic University of Rio de Janeiro.

A large number of new geotechnical materials was developed based on the addition of fibrous materials being incorporated as reinforcement. The technique of reinforced soil can be represented by the production and application, not only natural fiber, but also synthetic fibers and polymer. Previous studies of soil reinforced with polypropylene fibers have shown significant improvement of mechanical properties of soils, such as increasing the resistance peak and post-peak strength, ductility and toughness. These results show a great potential for this type of fiber, when used as soil reinforcement, for example, based on shallow foundations, embankments over soft soils and liners for landfill cover. From mathematical adjustments to determine the interaction between granular soils and the observation of global macro-scale become possible to analyze the behavior of granular soils reinforced with fibers in a micro-mechanics. The numerical modeling of mechanical behavior of soil reinforced with polypropylene fibers, through a micro-mechanical analysis, the tool uses as the Discrete Element Method (DEM), which allows the representation of the soil in 2D, from a set of particles circular discrete elements. The MED rule out the classical view of soil as a continuous form, providing the ability to model it as a constituent particle. Its formulation is based on the balance of forces and displacements generated by the contacts, which are explained through the laws of classical physics, allowing the mapping of movements of each particle. The advantage of micro-mechanics is the possibility of explicit microstructures, such as polypropylene fibers, responsible for the change in the behavior of the soil. Based on the study of this phenomenon, caused by the insertion of polypropylene fibers in granular materials, mathematical formulations have been proposed in order to describe the behavior of reinforced soils through the implementation of the Code of discrete elements (DEMlib). After calibration and

validation program, the influence due to the insertion of fiber reinforcement to the soil was analyzed, and simulations of biaxial tests on discrete samples of sand, with and without the fibrous reinforcement. The micro-mechanical behavior of blends reinforced allowed evaluating the effects of changes in fiber content present in the soil matrix and different rigidities of the fibers. We conclude that the study by the Discrete Element Method identified the actual interaction between the soil particles and the reinforcement in the form of fiber, indicating that the fibers, when inserted into the soil, may undergo plastic deformation and tensile elongation until the rupture, providing an improvement in mechanical parameters of soil.

Keywords

Discrete Element Method; DEM; soil reinforcement with fibers; numerical modeling; biaxial test.

Sumário

Lista de Figuras

Lista de Tabelas

Lista de Símbolos

1. INTRODUÇÃO	19
1.1. INTRODUÇÃO E DEFINIÇÃO DO PROBLEMA	19
1.2. OBJETIVOS	21
1.3. ORGANIZAÇÃO DA PESQUISA	22
2. REFORÇO DE SOLOS COM FIBRAS	23
2.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	23
2.2 SOLOS REFORÇADOS	23
2.3 REFORÇO COM FIBRAS	26
2.3.1 Fibras Naturais	26
2.3.2 Fibras Minerais	27
2.3.3 Fibras Metálicas	27
2.3.4 Fibras Poliméricas	27
2.4 INTERAÇÃO SOLO-FIBRA	29
2.5 COMPORTAMENTO DOS SOLOS REFORÇADOS COM FIBRAS	32
2.6 TEORIA DO ESTADO CRÍTICO	34
2.6.1 Conceitos Fundamentais	34
3. MODELAGEM MICRO - MECÂNICA DISCRETA DE SOLOS GRANULARES	43
3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	43
3.2 MODELAGEM MICRO-MECÂNICA	43
3.3 DIFERENÇA ENTRE MODELAGEM CONTÍNUA E DISCRETA	44

3.4 MÉTODO DOS ELEMENTOS DISCRETOS	45
3.4.1 Cinemática do Elemento	47
3.4.2 Leis da Física Clássica	47
3.4.3 Amortecimento e Dissipação de Energia	Erro! Indicador não definido.
3.4.4 Integração Numérica	57
4. IMPLEMENTAÇÃO COMPUTACIONAL	58
4.1. GERAÇÃO DO MODELO	58
4.2. PESQUISA POR PARES DE CONTATO	60
4.3. CICLO COMPUTACIONAL	62
5. MODELAGEM MICRO-MECÂNICA DISCRETA DE SOLOS GRANULARES REFORÇADOS COM FIBRAS	63
5.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS	63
5.2. SIMULAÇÃO DE ENSAIOS LABORATORIAIS	63
5.3. ENSAIO BIAXIAL	64
5.3.1 Considerações sobre o modelo numérico	64
5.3.2 Calibração dos parâmetros	65
5.3.3 Calibração do Ensaio Biaxial	73
5.3.4 Representação das Fibras	83
5.4. ENSAIO COMPRESSÃO HIDROSTÁTICA	101
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS	106
6.1 CONCLUSÕES	106
6.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	108
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	109

Lista de Figuras

Figura 1: Comparação de Estaca com elemento de reforço de solo (McGown <i>et al.</i> , 1978)	31
Figura 2: Linha Isotrópica de Compressão e Linha do Estado Crítico (Atkinson, 1993)	36
Figura 3: (a) Representação da envoltória de pico e (b) da Superfície Limite de Estado. (Atkinson, 1993)	38
Figura 4: (a) Parâmetros para normalização (Atkinson, 1993) e (b) Superfície Limite de Estado no plano (Atkinson & Bransby, 1978)	40
Figura 5: (a) Representação superfície limite de estado no plano e (b) no espaço (Atkinson & Bransby, 1978)	41
Figura 6: Relação entre q/p' e a taxa de dilatação (Atkinson, 1993)	42
Figura 7: Cinemática de um elemento esférico	47
Figura 8: Sistema de referência local para o contato entre dois elementos esféricos	48
Figura 9: Sistema de coordenadas Local e Global (Huaman, 2008)	49
Figura 10: Penetração no contato entre elementos	50
Figura 11: Penetração no contato entre elementos e parede	50
Figura 12: Modelo da força de contato	51
Figura 13: Esquema do mecanismo de força-deslocamento entre dois discos (ITASCA, Online Manual Table of Contents, Version 3.0, 1996)	52
Figura 14: Esquema de mecanismo de força-deslocamento entre parede e disco (ITASCA, Online Manual Table of Contents, Version 3.0, 1996)	52
Figura 15: Plano Tensão x Deformação de um compósito reforçado com fibras, (Michalowski and Zhao - Failure of fiber-reinforced Granular Soils – 1996)	59
Figura 16: Modelo em 2D de uma amostra de solo reforçado	60
Figura 17: Modelo em 2D de uma amostra de solo reforçado	61
Figura 18: Ciclo computacional	62

Figura 19: Esquema do Modelo de Contato entre dois discos	66
Figura 20: Simulação de Ensaio Biaxial com diferentes modelos de contato para tensão confinante de 100kPa: (a) Curva Tensão x Deformação axial; (b) Curva Deformação volumétrica x Deformação axial.	69
Figura 21: Simulação de Ensaio Biaxial com diferentes modelos de contato para tensão confinante de 200kPa: (a) Curva Tensão x Deformação axial; (b) Curva Deformação volumétrica x Deformação axial.	70
Figura 22: Simulação de Ensaio Biaxial com diferentes modelos de contato para tensão confinante de 400kPa: (a) Curva Tensão x Deformação axial; (b) Curva Deformação volumétrica x Deformação axial	71
Figura 23: Trajetória de tensão das simulações de areias fofa e densa	72
Figura 24: Simulação de Ensaio Biaxial com areia fofa: (a) Curva Tensão x Deformação axial; (b) Curva Deformação volumétrica x Deformação axial	74
Figura 25: Simulação de Ensaio Biaxial com com areia compacta: (a) Curva Tensão x Deformação axial; (b) Curva Deformação volumétrica x Deformação axial	75
Figura 26: Trajetória de tensão das simulações de areias fofa e densa	76
Figura 27: Curvas Granulométricas	78
Figura 28: Ensaio biaxial em amostras de solo graduado e uniforme para tensão confinante de 100kPa: (a) Curva tensão desviadora x deslocamento vertical; (b) Curva deslocamento volumétrico x deslocamento vertical	80
Figura 29: Ensaio biaxial em amostras de solo graduado e uniforme para tensão confinante de 200kPa: (a) Curva tensão desviadora x deslocamento vertical; (b) Curva deslocamento volumétrico x deslocamento vertical	81
Figura 30: Ensaio biaxial em amostra graduada: a) Arranjo inicial; b) Detalhe do arranjo denso e estável	83
Figura 31: Disposição fibra-fissura idealizada (Taylor, 1994)	84
Figura 32: Interação fibra-elemento circular	85

Figura 33: Curva Tensão x Deformação axial – Variação da Rigidez do elemento de reforço	87
Figura 34: Curvas tensão e deformação volumétrica x distorção em ensaios triaxiais drenados – compressão axial, para (a) areia e (b) areia-fibra. (Casagrande, 2005)	89
Figura 35: Curvas tensão e deformação volumétrica x distorção em ensaios triaxiais drenados – compressão axial, para (a) arenito e (b) arenito-fibra. (Casagrande, 2001 e Heineck, 2002)	90
Figura 36: Ensaio biaxial em amostras de solo granular - areia: (a) Curva tensão desviadora x deslocamento vertical; (b) Curva deslocamento volumétrico x deslocamento vertical	92
Figura 37: Ensaio biaxial em amostras de solo granular – areia + fibra: (a) Curva tensão desviadora x deslocamento vertical; (b) Curva deslocamento volumétrico x deslocamento vertical	93
Figura 38: Envoltórias e parâmetros de resistência ao cisalhamento ($\epsilon_a = 10\%$) (a) areia e (b) areia-fibra	96
Figura 39: Comparação entre as envoltórias de resistência obtidas	97
Figura 40: Superfície de estado limite para (a) areia e (b) areia-fibra	99
Figura 41: Superfície de estado limite para areia e areia-fibra	100
Figura 42: Ensaio de compressão hidrostática:(a) Curva tensão de confinamento x deformação volumétrica da Areia; (b) Curva tensão de confinamento x deformação volumétrica da Areia + fibra	102
Figura 43: Ensaio de compressão hidrostática em matriz granular com fibra: a) Arranjo inicial (Matriz granular + Fibra); b) Detalhe dos Liks: com coesão e sem coesão	104
Figura 44: Ensaio de compressão hidrostática: Curva tensão de confinamento x deformação volumétrica	105

Lista de Tabelas

Tabela 1: Modelos de Contato	68
Tabela 2: Índices físicos da areia de Osório	78
Tabela 3: Índices físicos – Elementos Discretos	79
Tabela 4: Características das Fibras – Elementos Discretos	86

Lista de Símbolos

σ	Relativo a tensões efetivas
δ	Relativo a incrementos
ε_a	Deformação axial
ε_v	Deformação volumétrica
φ	Ângulo de atrito interno
φ'_c	Ângulo de atrito interno no estado crítico
γ	Deformação cisalhante
γ_d	Peso específico aparente seco
ν	Coefficiente de Poisson
λ	Declividade da linha isotrópica de compressão no plano $v:\ln p'$
Γ	Volume específico ou intercepto da LEC para $p'=1\text{kPa}$, no plano $v:\ln p'$
τ	Tensão de cisalhamento
ρ	Massa específica do solo
σ_v	Tensão vertical
σ_1, σ_3	Tensões principais maior e menor
v	Volume específico
η	Inclinação da LIC no plano normalizado $q/p'_e : p'/p1_e$
ψ	Parâmetro de estado (Been & Jefferies, 1985)
κ	Declividade da linha de expansão no plano $v:\ln p'$
ω	Teor de umidade
$\omega_{\text{ótimo}}$	Teor de umidade ótimo de compactação
δh	Deslocamento horizontal
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	American Society for Testing and Materials
B	Parâmetro de poro-pressão de Skempton
c	Coesão
CBR	California Bearing Ratio
Cu	Coefficiente de uniformidade
Cv	Coefficiente de adensamento
d	Diâmetro da fibra

D10	Diâmetro efetivo das partículas
D50	Diâmetro médio
dtex	Unidade que representa a espessura dos filamentos (1 dtex = 1g/10000m).
e	Índice de vazios
E	Módulo de deformabilidade ou Módulo de Young
e ₀	Índice de vazios inicial
F _t	Resistência à tração da fibra
G	Módulo de cisalhamento
G ₀	Módulo de cisalhamento inicial ou elástico
G _{máx}	Módulo de cisalhamento máximo
LEC	Linha do Estado Crítico
LIC	Linha Isotrópica de Compressão
LL	Limite de liquidez
MED	Método dos Elementos Discretos
M	Massa
C	Amortecimento
S	Rigidez
ΔX	Vetor Deslocamento
ΔF	Vetor Força
r _i	Vetor posição
v _i	Velocidade lineal
w _i	Velocidade angular
t	tempo
Δt.	Intervalo de tempo
d _{ij}	Impenetrabilidade entre partículas
dp _{kj}	Impenetrabilidade entre partícula e parede
U _n	Deslocamento relativo
K ⁿ	Rigidez normal
K ^t	Rigidez tangencial
C _n	Amortecimento normal
C _t	Amortecimento tangencial
n _i	Normal ao plano de contato
$x_i^{[A]}$	Vetores posição dos centros dos discos
$x_i^{[B]}$	Vetores posição dos centros dos discos
d	Distancia entre os centros
V ^S	Velocidade cisalhante
$\dot{x}_i^{[A]}$	Velocidade translacional
$\omega_2^{[A]}$	Velocidade rotacional,

μ	Coeficiente de atrito
F_i	Força de translação
g_i	Gravidade
m	Massa
M_i	Resultante do momento atuante
\dot{H}_i	Momento angular da partícula
I_i	Momento de Inércia
$\ddot{\omega}_1$	Acelerações angulares
F_{dam}	Força de amortecimento
$T + \Delta t,$	Incrementos de tempo
M_{mi}	Menor massa
$K_{máx}$	Maior constante elástica normal ou tangencial