



André Ricardo Alves Guedes Pinto

**Fibras de curauá e sisal como reforço
em matrizes de solo**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação do Departamento de Engenharia Civil da PUC-Rio como requisito parcial para obtenção do título de mestre em Engenharia Civil.

Orientador: Khosrow Ghavami

Rio de Janeiro
Janeiro de 2008



André Ricardo Alves Guedes Pinto

**Fibras de curauá e sisal como reforço
em matrizes de solo**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação do Departamento de Engenharia Civil da PUC-Rio como requisito parcial para obtenção do título de mestre em Engenharia Civil.

Prof. Khosrow Ghavami

Presidente/Orientador

Departamento de Engenharia Civil – PUC-Rio

Prof. Celso Romanel

Departamento de Engenharia Civil – PUC-Rio

Prof. Alberto S.F.J. Sayão

Departamento de Engenharia Civil – PUC-Rio

Prof. José Eugênio Leal

Coordenador Setorial

do Centro Técnico Científico – PUC-Rio

Rio de Janeiro, 31 de janeiro de 2008

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

André Ricardo Alves Guedes Pinto

Graduou-se em Engenharia Civil pela UFPB (Universidade Federal da Paraíba) em 2004. Tem experiência na área de Engenharia Civil, com ênfase em Mecânica das Estruturas, atuando principalmente nos seguintes temas: habitação social e materiais não convencionais.

Ficha Catalográfica

Pinto, André Ricardo Alves Guedes

Fibras de curauá e sisal como reforço em matrizes de solo / André Ricardo Alves Guedes Pinto; orientador: Khosrow Ghavami. – Rio de Janeiro: PUC. Departamento de Engenharia Civil, 2007.

v., 103f.: il. ; 30 cm

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

Inclui referências bibliográficas.

1. Engenharia Civil – Dissertação. 2. Matriz de solo. 3. Fibras Vegetais. 4. Curauá. 5. Sisal. 6. Solo-cimento-fibras. 7. Compactação quase estática. I. Ghavami, Khosrow. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Civil. III. Título.

CDD: 624

Para meus pais e minha esposa Elaine,
pela compreensão, apoio e paciência.

Agradecimentos

Nesta minha jornada de desenvolvimento profissional e pessoal, foram muitas as pessoas que, de uma forma ou de outra, contribuíram para este processo. Seria um despropósito a enumeração de todos os nomes, a lista seria demasiadamente extensa, preenchendo inúmeras páginas. Assim, uma concisa menção será oferecida a uns poucos.

Em primeiro, aos meus pais por serem meus espelhos e meus guias em toda a história de minha vida, exemplo de força, dignidade e respeito. Um agradecimento especial à minha esposa Elaine por ter me dividido, de forma única e particular, com a Pós-graduação.

Em segundo, a Conceição Freire, pelo acolhimento de um estranho (eu) em sua casa, em minha chegada à cidade do Rio de Janeiro.

Ao Departamento de Engenharia Civil, seus professores e funcionários, pela oportunidade e carinho que dispenderam para a realização deste trabalho.

Ao professor Normando Perazzo Barbosa, por ter me mostrado e ensinado os caminhos para uma Engenharia Sustentável. Ao professor Khosrow Ghavami, pela paciência, confiança, e em especial pela orientação, que só engrandeceram e ornaram o caminho ao conhecimento científico.

Agradeço aos funcionários do LEM (Laboratório de Estruturas e Materiais) pelo suporte técnico, essencial em trabalhos experimentais. José Nilson, Euclides e equipe, pela colaboração e convívio prazeroso.

Por fim, e não menos importante, agradeço à CAPES, pelo apoio financeiro (vital e necessário).

Resumo

Pinto, André Ricardo Alves Guedes; Ghavami, Khosrow. **Fibras de curauá e sisal como reforço em matrizes de solo**. Rio de Janeiro, 2008, 105 p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

A insustentabilidade da construção civil tem motivado a busca, nas últimas três décadas, de materiais e tecnologias que envolvam menores quantidades de energia, gerem menos resíduos e poluentes. O Grupo de Pesquisa de Materiais e Tecnologias Não-Convencionais da PUC-Rio tem dedicado esforços neste sentido, gerando e divulgando conhecimento sobre materiais ecológicos que sejam, acessíveis à população de baixa renda e menos dependentes de tecnologias e indústrias multinacionais. Dentre estas tecnologias alternativas, citam-se as construções com terra, por apresentarem baixo consumo energético e emissão de poluentes, além da matéria prima (solo) estar disponível abundantemente para uso. Assim, é uma solução eficaz para o combate aos problemas ambientais e as desigualdades sociais. Porém, para que as construções sejam resistentes e duráveis, métodos de estabilização são utilizados com frequência. Esta dissertação avaliou a influência da adição de fibras vegetais (curauá e sisal) em matrizes de solo, as fibras possuem comprimento de 25 e 35 mm, adicionados em 0,5% e 1%, em peso de solo seco, juntamente com adições de 4 e 6% de cimento. Sob carregamento estático, são moldados e extraídos espécimes cilíndricos (50x100 mm), assim, ensaios comuns a argamassas são utilizados para avaliar a resistência das misturas. Os resultados indicam a potencialidade do processo de compactação desenvolvido. A estabilização química acresceu na rigidez e resistência final dos compósitos. A estabilização mecânica conduziu a espécimes de menor porosidade e juntamente com a estabilização física proporcionou o enrijecimento das misturas. Observa-se que as fibras melhoraram a capacidade de absorção de energia pós-fissuração, impedindo a ruptura frágil das matrizes.

Palavras-chave

Matriz de solo; fibras vegetais; curauá; sisal; solo-cimento-fibras; compactação quase estática.

Abstract

Pinto, André Ricardo Alves Guedes; Ghavami, Khosrow. **Curauá and sisal fibers as reinforcement in soil matrix**. Rio de Janeiro, 2008, 105 p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

The development of low cost and energy, saving construction materials such as Bamboo, vegetable fibers soil and different types of residues has been the subject of extensive research since 1979 at PUC-Rio. These materials are now called the Non-Conventional Materials and Technologies (NOCMAT) are investigated in order to substitute the industrialized materials which have contributed significantly to the climate change of our globe. It is now well established that the most commonly used construction material Portland cement is one of the most polluting one and its use needs to be reduced or to be substituted. In addition with the expansion of the centralized industrialized materials the gap between poor and rich is becoming wider and wider. Stabilized earth construction has been studied by NOCMAT group. This thesis presents the recent results of an investigation into the behavior of stabilized soil using vegetable fibers and/or cement. The considered variables in this research program are: the influence of two types of vegetable fiber, Curauá and Sisal, as reinforcement in two types of soil matrix, Clayey and Sandy soils. The considered fibers were of 25 and 35 mm length, with weight fractions of 0,5% and 1%, in relation to soil dry weight. The studied chemical stabilizers were 4% and 6% of cement in relation to dry soil weight. Cylindrical specimens of the size 50x100 mm were used to establish the compression behavior and the tensile strength through diagonal compression tests. The results indicate that the process of soil compacting is an effective method and the chemical stabilization increased the rigidity and the strength of the composites. It was found that the vegetable fibers have improved the post-cracking behavior of the developed composites.

Keywords

Soil matrix; vegetable fibers; curauá; sisal; soil-cement-fibers; quasi static compaction.

Sumário

1. Introdução	16
2. Revisão Bibliográfica	19
2.1. Desenvolvimento Sustentável versus Construção Civil	19
2.2. Construção Sustentável	25
2.2.1. Alvenaria de Adobe	29
2.2.2. Taipa de Pilão	31
2.2.3. Taipa de Mão	33
2.2.4. Blocos de Terra Comprimida	34
2.3. Estabilização do Solo	35
2.3.1. Estabilização Mecânica	35
2.3.2. Estabilização Física	37
2.3.2.1. Agave sisalana – Sisal	43
2.3.2.2. Ananás erectifolius – Curauá	45
2.3.3. Estabilização Química	46
3. Metodologia Experimental	48
3.1. Materiais utilizados	48
3.2. Características físicas, químicas e mineralógicas dos solos	49
3.3. Características físicas das fibras vegetais	50
3.3.1. Geometria das fibras	50
3.3.2. Teor de umidade	50
3.3.3. Peso específico	50
3.3.4. Absorção d'água	51
3.4. Preparação e ensaio dos corpos de prova	53
3.4.1. Nomenclatura dos corpos de prova	57
4. Resultados e discussão	59
4.1. Características físicas, químicas e mineralógicas dos solos	59
4.1.1. Análise física do solo	59
4.1.1.1. Sistema Unificado de Classificação de Solos (USCS)	60
4.1.2. Análise química do solo argiloso (solo1)	61
4.1.3. Análise mineralógica do solo	62
4.2. Características físicas das fibras vegetais	63
4.2.1. Geometria e Peso específico	63
4.2.2. Índice de absorção d'água das fibras vegetais	65
4.3. Preparação e ensaio dos compósitos	68
4.3.1. Umidade ótima e Massa específica aparente seca máxima	68
4.3.2. Influência da porcentagem de aglomerante	70

4.3.3. Influência das fibras vegetais durante a compactação	73
4.3.4. Influência do comprimento e fração volumétrica das fibras	74
4.3.5. Comportamento dos compósitos reforçados	76
4.3.6. Ensaio de absorção d'água	84
5. Conclusões e Sugestões	86
5.1. Conclusões	86
5.2. Sugestões para trabalhos futuros	89
6. Referências Bibliográficas	90
Apêndice A	99
Apêndice B	101

Lista de figuras

Figura 1.	Emissão de CO ₂ pelo uso de combustíveis (CDIAC, 2007).	21
Figura 2.	Distribuição dos componentes do Déficit Habitacional Brasileiro (FUNDAÇÃO JOÃO PINHEIRO, 2006).	24
Figura 3.	Ruas e casas da cidade de Bam – Irã, Ásia (GHAVAMI, 2007).	25
Figura 4.	Construções da cidade de Navrongo – Gana, África (CRATERRE, 2004).	26
Figura 5.	Construções em Chan chan – Perú, América do Sul (CRATERRE, 2004).	26
Figura 6.	Construções em Isle d’Abeau – França, Europa (INTI, 2007).	27
Figura 7.	Construções na Califórnia – EUA, América do Norte (CALEARTH, 2007).	27
Figura 8.	Arquitetura da terra no Brasil e seus modos de produção.	28
Figura 9.	Cena representando escravos produzindo tijolos de Adobe (DOAT et al, 1979).	29
Figura 10.	Fôrmas, fabricação e construção em Adobe (BARBOSA e GHAVAMI, 2007).	31
Figura 11.	Fôrma e processo de compactação (DOAT et al, 1979).	32
Figura 12.	Construção em Taipa de Pilão – França (INTI, 2007).	32
Figura 13.	Construção em Taipa de Mão – Brasil (MINKE, 2005; BARBOSA e GHAVAMI, 2007).	33
Figura 14.	Máquina manual para a produção de blocos de terra comprimida e etapas de construção. a) CINVA-Ram, b) colocação da argamassa, c) assentamento do bloco, d) nivelamento e prumo. (KEEFE, 2005; BARBOSA e GHAVAMI, 2007).	34
Figura 15.	Estrutura de uma microfibras vegetal.	40
Figura 16.	Interação fibra/matriz de solo (Ghavami et al, 1999).	41
Figura 17.	Mecanismo de propagação da fissura (CHAWLA, 1987 apud SALES, 2006).	43
Figura 18.	Microscopia eletrônica de varredura da morfologia interna da fibra de sisal (ANDRADE et al, 2007).	44
Figura 19.	Planta e fibra da <i>Ananás erectifolius</i> – curauá (MONTEIRO et al, 2006).	46
Figura 20.	Microscopia eletrônica de varredura de fibras de curauá (PICANÇO, 2005).	46

Figura 21.	Determinação do peso específico das fibras vegetais.	51
Figura 22.	Procedimento experimental desenvolvido. a) fibras coladas nas placas de alumínio; b) varal posicionado sob uma superfície com água.	52
Figura 23.	Moldes utilizados para confecção dos compósitos. a) detalhe das adaptações necessárias; b) molde+guia.	54
Figura 24.	Máquina universal de ensaios utilizada para a compactação.	54
Figura 25.	Máquina e instrumentação utilizada nos ensaios. a) ensaio de compressão simples; b) ensaio de compressão diametral.	56
Figura 26.	Fixação dos extensômetros elétricos (ensaio de compressão simples).	57
Figura 27.	Fixação dos extensômetros elétricos (ensaio de compressão diametral).	57
Figura 28.	Distribuição granulométrica dos solos estudados.	59
Figura 29.	Difratograma do solo (S). • Q- Quartzo (SiO_2) – 32,8%; • K- Caolinita ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$) – 67,2%.	62
Figura 30.	Difratograma do solo (SC). • Q- Quartzo (SiO_2) – 54,0%; • K- Caolinita ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$) – 46,0%.	62
Figura 31.	Estrutura atômica da argila caolinita (CALLISTER, 2006, p.37).	63
Figura 32.	Variabilidade dos dados físicos e mecânicos (fibras de curauá e sisal).	65
Figura 33.	Comparação entre ensaios de absorção d'água (fibras de curauá).	66
Figura 34.	Ensaio de absorção d'água (sisal e curauá).	66
Figura 35.	Ensaio de absorção d'água (sisal e curauá).	67
Figura 36.	Curvas de compactação do solo argiloso (C).	68
Figura 37.	Curvas de compactação do solo arenoso (S).	69
Figura 38.	Comportamento do solo sob estabilização química e mecânica.	71
Figura 39.	Resistência média à compressão simples dos compósitos imersos em água.	73
Figura 40.	Mecanismo de ruptura das fibras sob compactação (Consoli et al, 2005).	74
Figura 41.	Pressão de compactação necessária para a produção dos corpos de prova.	74
Figura 42.	Resistência média à compressão simples por fração volumétrica de fibras.	75
Figura 43.	Resistência média à compressão diametral por fração volumétrica de fibras.	75
Figura 44.	Tensão-deformação dos compósitos com solo argiloso, fibras de curauá e sisal com comprimento de 25 mm e fração volum. de 1%.	77
Figura 45.	Tensão-deformação dos compósitos com solo argiloso, fibras de sisal com comprimento de 25 e 35 mm e fração volumétrica de 1%, aos 35 dias.	77

Figura 46.	Tensão-deformação dos compósitos com solo argiloso e arenoso, fibras de curauá com comprimento de 25 mm e fração vol. de 1%.	78
Figura 47.	Tensão-deformação dos compósitos com solo argiloso e arenoso, com fibras de sisal com comprimento de 25 e 35 mm e fração vol. de 1%.	79
Figura 48.	Tensão-deformação dos compósitos com solo arenoso, fibras de curauá com comprimento de 25 e 35 mm e fração volumétrica de 1%.	80
Figura 49.	Tensão-deformação dos compósitos com solo arenoso, fibras de sisal e curauá com comprimento de 25 mm e fração volum. de 1%.	80
Figura 50.	Estimativas do Déficit Habitacional – Estado do Rio de Janeiro (Ministério das Cidades, 2000).	99
Figura 51.	Estimativas do Déficit Habitacional – Região Metropolitana do Estado (Ministério das Cidades, 2000).	99
Figura 52.	Faixas de Renda Mensal Familiar (Salários mínimos) – Estado do Rio de Janeiro (Ministério das Cidades, 2000).	100
Figura 53.	Faixas de Renda Mensal Familiar (Salários mínimos) – Região Metropolitana do Estado (Ministério das Cidades, 2000).	100

Lista de tabelas

Tabela 1.	Total de emissão de CO ₂ , em 10 ³ /t. de carbono (CDIAC, 2007).	21
Tabela 2.	Consumo energético e emissão de CO ₂ , ano base 2007 (MME, 2007a).	22
Tabela 3.	Consumo final de energia, ano base 2007 (MME, 2007a).	22
Tabela 4.	Composição química das fibras vegetais, em % (ARSÉNE et al, 2003).	41
Tabela 5.	Composição química das fibras de sisal, em %.	44
Tabela 6.	Composição química das fibras de curauá, em %.	45
Tabela 7.	Características físicas dos solos estudados, em %.	59
Tabela 8.	Esquema para classificação pelo Sistema Unificado.	60
Tabela 9.	Análise química (pH, complexo sortivo) do solo argiloso.	61
Tabela 10.	Análise química (ataque sulfúrico) do solo argiloso.	61
Tabela 11.	Características físicas das fibras vegetais estudadas.	64
Tabela 12.	Características físicas e mecânicas das fibras de curauá e sisal.	64
Tabela 13.	Quantidade de água absorvida do total seco e saturado, em %.	67
Tabela 14.	Massa específica aparente seca dos compósitos.	70
Tabela 15.	Resistência média à compressão simples, em MPa.	72
Tabela 16.	Resistência média à compressão diametral, em MPa.	72
Tabela 17.	Módulo de elasticidade à compressão simples, em GPa.	81
Tabela 18.	Resistência média à compressão simples (MPa), compósitos argilosos.	82
Tabela 19.	Resistência média à compressão diametral (MPa), compósitos argilosos.	82
Tabela 20.	Resistência média à compressão simples (MPa), compósitos arenosos.	83
Tabela 21.	Resistência média à compressão diametral (MPa), compósitos arenosos.	83
Tabela 22.	Taxa de absorção d'água dos compósitos estudados, em %.	84

Lista de símbolos

CH	Hidróxido de Cálcio
CTC	Troca catiônica
CTA	Troca aniônica
CV	Coefficiente de variação
cmol _c /kg	Centimol de cátion/kg da amostra
D	Diâmetro dos espécimes
E	Módulo de elasticidade
ER	Razão de erosão
G _s	Densidade real dos grãos
H	Umidade natural
h	Umidade
h _{ot}	Umidade ótima
I _{abs}	Índice de absorção d'água
K	Caolinita (Al ₂ Si ₂ O ₅ (OH) ₄)
kWh/t	Kilowatts por tonelada
IP	Índice de Plasticidade
L	a) Leitura no frasco de Chapman b) Comprimento dos espécimes
LVDT	Linear Variable Differential Transducers
LL	Limite de Liquidez
LP	Limite de Plasticidade
m/dia	Metro por dia
P	Carga aplicada nos testes de compressão diametral
P _{ar}	Peso seco ao ar livre
P _{est}	Peso seco em estufa
P _{um}	Peso úmido
P _{est50}	Peso seco em estufa de 50g de fibras vegetais
Q	Quartzo (SiO ₂)
T	Capacidade de Troca Catiônica
TRB	Transportation Research Board
tep	Tonelada equivalente de petróleo
tep/t	Tonelada equivalente de petróleo por tonelada
UR	Umidade Relativa
V	Volume
ε _{40%}	Deformação produzida por 40% da tensão última (σ _{40%})
γ	Massa específica das fibras vegetais
γ _u	Peso específico aparente úmido (densidade úmida)
γ _s	Peso específico aparente seco (densidade seca)
γ _{s,max}	Peso específico aparente seco máximo (densidade seca máxima)
μm	Micrometro
μs	Microstrain
σ _c	Resistência à compressão simples
σ _t	Resistência à compressão diametral
σ _{40%}	40% da tensão última
2θ	Ângulo de incidência de Raios-X (Análise por Difractometria de Raios-X)

Estamos diante de um momento crítico na história da Terra, numa época em que a humanidade deve escolher o seu futuro. À medida que o mundo torna-se cada vez mais interdependente e frágil, o futuro enfrenta, ao mesmo tempo, grandes perigos e grandes promessas. Para seguir adiante, devemos reconhecer que, no meio da uma magnífica diversidade de culturas e formas de vida, somos uma família humana e uma comunidade terrestre com um destino comum. Devemos somar forças para gerar uma sociedade sustentável global baseada no respeito pela natureza, nos direitos humanos universais, na justiça econômica e numa cultura da paz. Para chegar a este propósito, é imperativo que nós, os povos da Terra, declaremos nossa responsabilidade uns para com os outros, com a grande comunidade da vida, e com as futuras gerações.

A Carta da Terra – Preâmbulo

Disponível em:

http://www.mma.gov.br/estruturas/agenda21/_arquivos/carta_terra.doc

Acessado em: Janeiro de 2005