



**André Ricardo Alves Guedes Pinto**

**Durabilidade e resistência de matriz de solo estabilizada com  
resina de mamona e fibras de pupunha para  
uso em construções com terra crua**

**Tese de Doutorado**

Tese apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Doutor pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil do Departamento de Engenharia Civil da PUC-Rio

Orientador: Khosrow Ghavami

Rio de Janeiro  
Março de 2013



**André Ricardo Alves Guedes Pinto**

**Durabilidade e resistência de matriz de solo estabilizada com resina de mamona e fibras de pupunha para uso em construções com terra crua**

Tese apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Doutor 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. Khosrow Ghavami**

Orientador

Departamento de Engenharia Civil – PUC-Rio

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

Departamento de Engenharia Civil – PUC-Rio

**Prof. Celso Romanel**

Departamento de Engenharia Civil – PUC-Rio

**Prof<sup>a</sup>. Angela Teresa Costa Sales**

Universidade Federal de Sergipe

**Prof. Conrado de Souza Rodrigues**

CEFET / Minas Gerais

**Prof. José Eugenio Leal**

Coordenador Setorial do Centro Técnico Científico – PUC-Rio

Rio de Janeiro, 19 de março de 2013

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, Mestre em Engenharia Civil pela PUC-Rio (Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro) em 2008. Atualmente, desenvolve pesquisas sobre sistemas estruturais utilizando materiais e tecnologias não-convencionais, principalmente o uso da terra crua como elemento estrutural, atuando temas: habitação social e materiais e tecnologias não convencionais.

#### Ficha Catalográfica

Pinto, André Ricardo Alves Guedes

Durabilidade e resistência de matriz de solo estabilizada com resina de mamona e fibras de pupunha para uso em construções com terra crua / André Ricardo Alves Guedes Pinto; orientador: Khosrow Ghavami. – Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil, 2013.

134 f. : il. ; 30 cm

Tese (doutorado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil.

Inclui referências bibliográficas.

1. Engenharia civil – Teses. 2. Matriz de solo. 3. Resina poliuretana de mamona. 4. Pupunha. 5. Sisal. 6. Durabilidade. 7. Construção com terra crua. 8. Materiais e tecnologias não-convencionais. I. Ghavami, Khosrow. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Civil. III. Título.

CDD: 624

Dedico este trabalho para minha filha Sofia, por todo o carinho e, principalmente, amor durante parte desta etapa de minha vida.

## 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 a Sofia pela alegria, carinho e amor.

Ao Departamento de Engenharia Civil, seus professores e funcionários, pela oportunidade e carinho que despenderam 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 ao CNPq, pelo apoio financeiro (vital e necessário).

## Resumo

Pinto, André Ricardo Alves Guedes; Ghavami, Khosrow. **Durabilidade e resistência de matriz de solo estabilizada com resina de mamona e fibras de pupunha para uso em construções com terra crua**. Rio de Janeiro, 2013, 134 p. Tese de Doutorado – Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

A história do solo como material de construção tem cerca de 10.000 anos. Grandes civilizações como a persa e a egípcia, construíram cidade inteiras com terra crua. As construções apresentam como principais vantagens a baixa geração e emissão de poluentes, o reduzido consumo energético e conseqüentemente o baixo custo, contudo, o principal inconveniente é sua baixa resistência na presença de água, que conduz para a maioria das patologias encontradas. Neste trabalho, a durabilidade de uma matriz de solo estabilizada com acetato de polivinila (PVA) e resina poliuretana derivada do óleo de mamona (RPM) foi avaliada, e ensaios mecânicos foram executados para aferição das resistências. O PVA, diluído em água nas proporções de 50% e 70%, e a RPM foram adicionados ao solo na proporção de 26%, em peso de solo seco. Fibras de Pupunha (*Bactris gasipaes* K.) e Sisal (*Agave sisalana*), com comprimento de 25 mm e fração de 0,5%, em peso de solo seco, foram inseridas no solo/RPM e sua resistência à compressão simples, tração por compressão diametral e absorção de água por imersão foram avaliados. A resistência à compressão simples dos corpos de prova de PVA se manteve abaixo do mínimo exigido por norma, e a absorção de água por imersão foi superior ao máximo recomendado, por sua vez, os ensaios de durabilidade para as misturas solo/RPM demonstraram, em todos os casos, a superioridade do aglomerante em comparação ao cimento e PVA. A absorção de umidade, após 24 horas imerso em água, foi de 5% em contraste com os 23% de absorção da matriz solo/cimento. A absorção por capilaridade se manteve abaixo dos demais compósitos. Nos ciclos de molhagem e secagem observou-se uma menor perda de massa e uma maior resistência à abrasão. A adição de fibras vegetais aumentou sua resistência mecânica não influenciando na absorção d'água.

## Palavras-chave

Matriz de solo; durabilidade; PVA; resina poliuretana de mamona; pupunha; sisal.

## Abstract

Pinto, André Ricardo Alves Guedes; Ghavami, Khosrow (Advisor). **Durability and strength of soil matrix stabilized with castor oil resin and peach palm fibers used for earth construction.** Rio de Janeiro, 2013, 134 p. D. Sc. Thesis – Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

The history of earth construction has about 10,000 years. Great civilizations, Egyptian and Persian, built cities with soil. The main advantages of this construction material are a low cost, low energy consumption and emission of pollutants, however, the disadvantage is its low water resistance, which leads to most structural pathologies. In this work, the durability of a matrix of soil stabilized with polyvinyl acetate (PVA) and castor oil resin (RPM) was assessed, and mechanical strength was measured. The PVA (50% and 70% solutions), and RPM were added to the soil in a proportion of 26% in relation to soil dry weight. The performance of two types of vegetable fibers as reinforcement of soil/RPM matrix, Pupunha and Sisal, were investigated. The considered fibers were of 25 mm length, with weight fractions of 0,5% in relation to soil dry weight. The compressive strength of the specimens stabilized with PVA remained below the minimum required by the standard, and water absorption by immersion was higher than the recommended maximum. The results demonstrate the potentiality of the use of castor oil resin. A significant decrease of the mechanical properties (results of unconfined compression and Brazilian test) compared to the mixture soil/cement was not observed. The durability tests showed, in all cases, the superior performance of resin compared to cement and PVA. Moisture absorption rate of soil/resin was 5% in contrast to 23% of the soil/cement matrix. The capillary absorption was lower when compared to other composites studied. There was less weight loss and a higher abrasion resistance after wetting and drying cycles. It was found that the vegetable fibers improved the post-cracking behavior of the composites.

## Keywords

Soil matrix; durability; PVA; castor oil resin; pupunha; sisal.

# Sumário

|  |    |
|--|----|
| 1. Introdução  | 18 |
| 2. Revisão Bibliográfica   | 22 |
| 2.1. Construção Sustentável                                      | 22 |
| 2.1.1. Blocos de Terra Comprimida                                | 30 |
| 2.2. Durabilidade  | 31 |
| 2.2.1. Deterioração relacionado à água                           | 32 |
| 2.2.2. Deterioração relacionado à temperatura                    | 33 |
| 2.2.3. Deterioração relacionado à agentes químicos               | 34 |
| 2.3. Estabilização do Solo                                       | 36 |
| 2.4. Estabilização Mecânica                                      | 39 |
| 2.5. Estabilização Química                                       | 40 |
| 2.5.1. Cimento   | 44 |
| 2.5.2. Polímero - Acetato de Polivinila (PVA)                    | 45 |
| 2.5.3. Polímero - Resina Poliuretana de Mamona (RPM)             | 46 |
| 2.6. Estabilização Física  | 49 |
| 2.6.1. Sisal ( <i>Agave sisalana</i> )                           | 54 |
| 2.6.2. Pupunha ( <i>Bactris gasipaes Kunth</i> )                 | 55 |
| 3. Metodologia Experimental                                      | 60 |
| 3.1. Materiais utilizados  | 60 |
| 3.2. Características físicas, químicas e mineralógicas dos solos | 62 |
| 3.3. Características físicas das fibras vegetais                 | 63 |
| 3.3.1. Beneficiamento das fibras vegetais                        | 63 |
| 3.3.2. Geometria das fibras                                      | 64 |
| 3.3.3. Teor de umidade   | 65 |
| 3.3.4. Peso específico   | 65 |
| 3.3.5. Ensaio de tração das fibras                               | 66 |
| 3.4. Preparação e ensaio dos corpos de prova                     | 66 |
| 3.5. Ensaio de Resistência Mecânica                              | 69 |
| 3.5.1. Ensaio de Compressão Simples                              | 69 |
| 3.5.1. Ensaio de Tração por Compressão Diametral                 | 70 |
| 3.6. Ensaio de durabilidade                                      | 71 |
| 3.6.1. Ensaio de Absorção por Imersão                            | 71 |
| 3.6.2. Ensaio de Absorção por Capilaridade                       | 71 |
| 3.6.3. Ensaio de Durabilidade por Molhagem e Secagem             | 72 |
| 3.7. Nomenclatura dos corpos de prova                            | 74 |

|   |     |
|---|-----|
| 4. Resultados e discussão   | 76  |
| 4.1. Características físicas, químicas e mineralógicas do solo            | 76  |
| 4.1.1. Análise física do solo   | 76  |
| 4.1.1.1. Sistema Unificado de Classificação de Solos (USCS)               | 77  |
| 4.1.2. Análise química do solo  | 78  |
| 4.1.3. Análise mineralógica do solo                                       | 78  |
| 4.2. Características físicas das fibras vegetais                          | 80  |
| 4.2.1. Geometria, Teor de umidade, Peso específico e Resistência a tração | 80  |
| 4.3. Preparação e ensaio dos compósitos                                   | 81  |
| 4.3.1. Umidade ótima e Massa específica aparente seca máxima              | 81  |
| 4.4. Resistência à compressão simples                                     | 81  |
| 4.4. Resistência à tração por compressão diametral                        | 90  |
| 4.5. Ensaio de absorção por imersão                                       | 98  |
| 4.6. Ensaio de absorção por capilaridade                                  | 104 |
| 4.7. Ensaio de molhagem e secagem   | 109 |
| 4.8. Fibras de sisal e pupunha inseridas na matriz solo/RPM               | 113 |
| <br>  |     |
| 5. Conclusões e Sugestões   | 118 |
| 5.1. Conclusões   | 118 |
| 5.2. Sugestões para trabalhos futuros                                     | 121 |
| <br>  |     |
| 6. Referências Bibliográficas   | 123 |

## Lista de figuras

|            |  |    |
|------------|--|----|
| Figura 1.  | Ruas e casas da cidade de Bam – Irã, Ásia (GHAVAMI, 2007)  | 23 |
| Figura 2.  | Construções da cidade de Navrongo – Gana, África (CRATERRE, 2004)  | 23 |
| Figura 3.  | Construções em Gana, África (CRATERRE, 2004).  | 23 |
| Figura 4.  | Construções em Chan chan – Perú, América do Sul (CRATERRE, 2004)   | 24 |
| Figura 5.  | Construções na Califórnia – EUA, América do Norte (CALEARTH, 2007)   | 24 |
| Figura 6.  | A Mesquita de Djenna no Mali, o maior edifício de adobe do mundo (RECRIAR, 2013)   | 25 |
| Figura 7.  | Vila em Taos, Novo México (RECRIAR, 2013)  | 25 |
| Figura 8.  | Obra em taipa de pilão construída como fortaleza para o povo Hakka (RECRIAR, 2013)   | 26 |
| Figura 9.  | Residência em Melbourne - Austrália (MINKE, 2006)  | 26 |
| Figura 10. | Vista lateral, residência em Melbourne - Austrália (MINKE, 2006).  | 27 |
| Figura 11. | Entrada da capela da reconciliação, Berlim -Alemanha (MINKE, 2006)   | 27 |
| Figura 12. | (a) Espaço interno da capela; (b) altar em taipa de pilão (MINKE, 2006)  | 28 |
| Figura 13. | 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) | 30 |
| Figura 14. | (a) Fruto da mamoneira; (b) sementes de mamona (QUIMICA NOVA, 2010)  | 47 |
| Figura 15. | Estrutura de uma microfibras vegetal (RONG et al., 2001 apud SILVA, 2003)  | 51 |
| Figura 16. | Microscopia eletrônica de varredura da morfologia interna da fibra de sisal (ANDRADE et al, 2007)  | 54 |
| Figura 17. | (a) Hastes pré-beneficiadas; (b) Palmito preparado para o comércio (TEMER, 2010)   | 56 |
| Figura 18. | (a) Resíduo da camadas externa do beneficiamento do palmito; (b) Resíduo da camadas interna - semi-fibrosa (TEMER, 2010)   | 56 |
| Figura 19. | (a) Fibra tratada; (b) Fibra sem tratamento (TEMER, 2010).   | 59 |
| Figura 20. | (a) Moenda manual utilizada na pesquisa; (b) Fibras beneficiadas na moenda de cana-de-açúcar.  | 64 |
| Figura 21. | (a) Papel de colagem das fibras; (b) Fibra posicionado para ensaio mecânico  | 66 |
| Figura 22. | Moldes utilizados para confecção dos compósitos (ABNT, 1994a). (a) detalhe das adaptações necessárias; (b) molde+guia (PINTO, 2008)  | 67 |
| Figura 23. | Máquina universal de ensaios utilizada para a compactação (PINTO, 2008)  | 68 |

|            |   |    |
|------------|---|----|
| Figura 24. | Ensaio de compressão simples  | 70 |
| Figura 25. | Ensaio de tração por compressão diametral (PINTO, 2008)   | 70 |
| Figura 26. | Distribuição granulométrica do solo estudado  | 76 |
| Figura 27. | Difratograma do solo (SC). • Q- Quartzo ( $\text{SiO}_2$ ) – 54,0%; • K-<br>Caulinita ( $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ ) – 46,0%.      | 79 |
| Figura 28. | Estrutura atômica da argila caolinita (CALLISTER, 2006,<br>p.37)  | 79 |
| Figura 29. | Imagens obtidas por microscopia ótica digital da seção<br>transversal das fibras. a)sisal; b) pupunha (TEMER, 2010).                                    | 80 |
| Figura 30. | Curva de compactação do solo estudado.  | 81 |
| Figura 31. | Tensão-deformação dos compósitos com solo/CIM, nas idades<br>de 7, 21 e 35 dias. Os valores em porcentagem equivalem ao<br>coeficiente de variação.     | 82 |
| Figura 32. | Corpos de prova solo/CIM.   | 82 |
| Figura 33. | Tensão-deformação dos compósitos com solo/PVA50, nas<br>idades de 7, 21 e 35 dias. Os valores em porcentagem<br>equivalem ao coeficiente de variação.   | 84 |
| Figura 34. | Corpos de prova solo/PVA50, aos 7, 21 e 35 dias.  | 84 |
| Figura 35. | Tensão-deformação dos compósitos com solo/PVA70, nas<br>idades de 7, 21 e 35 dias. Os valores em porcentagem<br>equivalem ao coeficiente de variação.   | 85 |
| Figura 36. | Corpos de prova solo/PVA70, aos 7, 21 e 35 dias.  | 86 |
| Figura 37. | Tensão-deformação dos compósitos com solo/RPM, nas<br>idades de 7, 21 e 35 dias. Os valores em porcentagem<br>equivalem ao coeficiente de variação.     | 87 |
| Figura 38. | Corpos de prova solo/RPM, aos 7, 21 e 35 dias.  | 87 |
| Figura 39. | Tensão-deformação dos compósitos com solo argiloso<br>estabilizados com cimento, PVA (solução de 50 e 70% em<br>água) e RPM.                            | 88 |
| Figura 40. | Tensão-deformação dos compósitos com solo/CIM e<br>solo/RPM.  | 89 |
| Figura 41. | Tensão-deformação dos compósitos com solo/cimento, nas<br>idades de 7, 21 e 35 dias. Os valores em porcentagem<br>equivalem ao coeficiente de variação. | 91 |
| Figura 42. | Corpos de prova solo/CIM, aos 7, 21 e 35 dias.  | 91 |
| Figura 43. | Tensão-deformação dos compósitos com solo/PVA50, nas<br>idades de 7, 21 e 35 dias. Os valores em porcentagem<br>equivalem ao coeficiente de variação.   | 92 |
| Figura 44. | Corpos de prova solo/PVA50, aos 7, 21 e 35 dias   | 93 |
| Figura 45. | Tensão-deformação dos compósitos com solo/PVA70, nas<br>idades de 7, 21 e 35 dias. Os valores em porcentagem<br>equivalem ao coeficiente de variação.   | 93 |
| Figura 46. | Corpos de prova solo/PVA70, aos 7, 21 e 35 dias   | 94 |
| Figura 47. | Tensão-deformação dos compósitos com solo/RPM, nas<br>idades de 7, 21 e 35 dias. Os valores em porcentagem<br>equivalem ao coeficiente de variação.     | 95 |
| Figura 48. | Corpos de prova solo/RPM, aos 7, 21 e 35 dias   | 95 |
| Figura 49. | Tensão-deformação dos compósitos solo/CIM, solo/PVA50,<br>solo/PVA70, solo/RPM e solo sem adição de aglomerante.  | 96 |
| Figura 50. | Tensão-deformação dos compósitos com solo argiloso<br>estabilizados com cimento, PVA (solução de 50 e 70% em<br>água) e RPM.                            | 97 |
| Figura 51. | Variação volumétrica e absorção de umidade do solo/CIM, nas<br>idades de 7, 21 e 35 dias.   | 99 |

|            |  |     |
|------------|--|-----|
| Figura 52. | Varição volumétrica e taxa de absorção de umidade do solo/PVA50, nas idades de 7, 21 e 35 dias.  | 100 |
| Figura 53. | Varição volumétrica e absorção de umidade do solo/PVA70, nas idades de 7, 21 e 35 dias.  | 101 |
| Figura 54. | Varição volumétrica e absorção de umidade do solo/RPM, nas idades de 7, 21 e 35 dias.  | 102 |
| Figura 55. | Varição volumétrica das matrizes de solo com cimento, PVA (solução de 50 e 70% em água) e RPM, nas idades de 7, 21 e 35 dias.                    | 103 |
| Figura 56. | Absorção de umidade de solo com cimento, PVA (solução de 50 e 70% em água) e RPM, nas idades de 7, 21 e 35 dias.                                 | 103 |
| Figura 57. | Taxa de absorção de água por capilaridade para solo/CIM, nas idades de 14, 28 e 42 dias.   | 104 |
| Figura 58. | Taxa de absorção de água por capilaridade para compósitos com solo/PVA50, nas idades de 21, 28 e 42 dias.  | 105 |
| Figura 59. | Taxa de absorção de água por capilaridade para compósitos com solo/PVA70, nas idades de 14, 28 e 42 dias.  | 106 |
| Figura 60. | Taxa de absorção de água por capilaridade para compósitos com solo/RPM, nas idades de 14, 28 e 42 dias.  | 106 |
| Figura 61. | Taxa de absorção de água por capilaridade para compósitos com solo estabilizados com CIM, PVA50, PVA70 e RPM, aos 14 e 21 dias.                  | 107 |
| Figura 62. | Taxa de absorção de água por capilaridade para compósitos com solo estabilizados com CIM, PVA50, PVA70 e RPM, aos 28 dias.                       | 108 |
| Figura 63. | Taxa de absorção de água por capilaridade para compósitos com solo estabilizados com CIM, PVA50, PVA70 e RPM, aos 42 dias.                       | 108 |
| Figura 64. | Imagem dos corpos de prova, solo/CIM-D7, ao final dos ciclos de molhagem e secagem.  | 110 |
| Figura 65. | Imagem dos corpos de prova, solo/PVA50-D35, ao final dos ciclos de molhagem e secagem.   | 110 |
| Figura 66. | Imagem dos corpos de prova, solo/PVA70-D21, ao final dos ciclos de molhagem e secagem.   | 111 |
| Figura 67. | Imagem dos corpos de prova, solo/RPM-D21, ao final dos ciclos de molhagem e secagem.   | 111 |
| Figura 68. | Tensão-deformação dos compósitos com solo estabilizados com cimento, PVA (solução de 50 e 70% em água) e RPM, após ensaio de molhagem e secagem. | 112 |
| Figura 69. | Tensão-deformação dos compósitos com solo/CIM, solo/RPM, solo/RPM-P e solo/RPM-S, aos 7 e 35 dias.   | 114 |
| Figura 70. | Tensão-deformação dos compósitos com solo/RPM, solo/RPM-P e solo/RPM-S, aos 7 dias.  | 116 |

## Lista de tabelas

|            |  |    |
|------------|--|----|
| Tabela 1.  | Composição do óleo de mamona (Valores médios em %).  | 48 |
| Tabela 2.  | Propriedades de fibras vegetais e sintéticas.  | 51 |
| Tabela 3.  | Composição de diferentes resíduos em termos de cinzas, hemicelulose, lignina e celulose, expressa em % massa seca.   | 52 |
| Tabela 4.  | Propriedades físico-químicas do produto Cascola Cascorex Extra e Imperveg UG 132-A.  | 61 |
| Tabela 5.  | Nomenclatura dos corpos de prova.  | 75 |
| Tabela 6.  | Características físicas do solo estudado, em %.  | 76 |
| Tabela 7.  | Esquema para classificação pelo Sistema Unificado.   | 77 |
| Tabela 8.  | CTC e Superfície específica da amostra de solo estudada.   | 78 |
| Tabela 9.  | Características físicas das fibras vegetais estudadas.   | 80 |
| Tabela 10. | Tensão de ruptura, deformação, módulo de elasticidade, coesão e ângulo de atrito interno dos compósitos com solo estabilizados com cimento e do corpo de prova de referência (solo). | 83 |
| Tabela 11. | Comparação entre o ângulo de atrito interno e coesão dos compósitos solo/CIM com cimento com dados da literatura.  | 83 |
| Tabela 12. | Tensão de ruptura, deformação e módulo de elasticidade dos compósitos solo/PVA50 e do corpo de prova de referência (solo).   | 85 |
| Tabela 13. | Tensão de ruptura, deformação e módulo de elasticidade dos compósitos com solo estabilizados com PVA70 e do corpo de prova de referência (solo).                                     | 86 |
| Tabela 14. | Tensão de ruptura, deformação e módulo de elasticidade dos compósitos com solo estabilizados com RPM e do corpo de prova de referência (solo).                                       | 88 |
| Tabela 15. | Resistência à compressão simples dos compósitos com solo estabilizados com cimento, PVA (solução de 50 e 70% em água) e RPM.   | 90 |
| Tabela 16. | Tensão de ruptura e deformação dos compósitos com solo estabilizados com cimento (solo/CIM) e do solo (sem adição de aglomerantes).  | 91 |
| Tabela 17. | Tensão de ruptura e deformação dos compósitos com solo estabilizados com PVA50 e do solo (sem adição de aglomerantes).   | 92 |
| Tabela 18. | Tensão de ruptura e deformação dos compósitos com solo estabilizados com PVA70 e do solo (sem adição de aglomerantes).   | 94 |
| Tabela 19. | Tensão de ruptura e deformação dos compósitos com solo estabilizados com RPM e do solo (sem adição de aglomerantes).   | 95 |

|            |   |     |
|------------|---|-----|
| Tabela 20. | Resistência à tração por compressão diametral dos compósitos com solo estabilizados com cimento, PVA (solução de 50 e 70% em água) e RPM.   | 98  |
| Tabela 21. | Variação volumétrica e absorção de umidade do solo/CIM.   | 99  |
| Tabela 22. | Variação volumétrica e absorção de umidade do solo/PVA50.   | 100 |
| Tabela 23. | Variação volumétrica e absorção de umidade do solo/PVA70.   | 101 |
| Tabela 24. | Variação volumétrica e absorção de umidade do solo/RPM.   | 102 |
| Tabela 25. | Perda de massa por período de cura, valores expressos em %.   | 109 |
| Tabela 26. | Resistência à compressão simples e porcentagem de perda, dos compósitos com solo estabilizados com cimento, PVA (solução de 50 e 70% em água) e RPM, antes e após ensaio de molhagem e secagem. | 112 |
| Tabela 27. | Resistência à compressão simples e módulo de elasticidade na compressão simples, em GPa.  | 115 |
| Tabela 28. | Absorção de umidade do solo/RPM, solo/RPM-P e solo/RPM-S. Os valores estão expressos em porcentagem. CV incluso dentro dos parênteses.  | 117 |

## Lista de símbolos

|               |   |
|---------------|---|
| A             | Índice de absorção por imersão  |
| BTC           | Bloco de Terra Comprimida   |
| C             | Absorção de água por capilaridade   |
| CCA           | Cinza da Casca de Arroz   |
| CH            | Hidróxido de Cálcio   |
| CIM           | Cimento   |
| CTC           | Capacidade de Troca Catiônica   |
| CV            | Coefficiente de Variação  |
| D             | Diâmetro dos espécimes  |
| DRX           | Difratometria de Raios-X  |
| E             | Módulo de elasticidade  |
| $f_{t,D}$     | Resistência a tração por compressão diametral                                 |
| F             | Força de ruptura  |
| $G_s$         | Densidade real dos grãos  |
| H             | Umidade natural   |
| h             | Umidade   |
| $h_1$         | Volume inicial do corpo de prova nº 1 após sua desmoldagem                    |
| $h_n$         | Volume do corpo de prova nº 1 em cada etapa                                   |
| K             | Caolinita ( $Al_2Si_2O_5(OH)_4$ )   |
| kV            | Quilovolt   |
| IP            | Índice de Plasticidade  |
| L             | Altura dos espécimes  |
| LVDT          | Linear Variable Differential Transducers                                      |
| LL            | Limite de Liquidez  |
| LP            | Limite de Plasticidade  |
| $M_{i(1)}$    | Massa seca inicial calculada do corpo de prova nº 1                           |
| $M_{i(2,3)}$  | Massa seca inicial calculada dos corpos de prova nº 2 e nº 3                  |
| $M_{f(1)}$    | Massa seca final do corpo de prova nº 1 após atingir massa constante          |
| $M_{f(2,3)}$  | Massa seca final dos corpos de prova nº 2 e nº 3 após atingir massa constante |
| $M_{fc(2,3)}$ | Massa seca final corrigida dos corpos de prova nº 2 e nº 3                    |
| MCAR          | Metacaulim de alta reatividade  |
| MH            | Silte elástico com areia  |
| P             | Carga aplicada nos testes de compressão diametral                             |
| $P_{ar}$      | Peso seco ao ar livre   |
| $P_{est}$     | Peso seco em estufa   |
| $P_{Sar}$     | Massa inicial (g) do CP seco em estufa a $40 \pm 5^\circ C$ e resfriado ao ar |
| $P_{um}$      | Peso úmido  |
| $P_{est50}$   | Peso seco em estufa de 50g de fibras vegetais                                 |
| $P_{m(2,3)}$  | Perda de massa dos corpos nº 2 e nº 3   |
| $P_U$         | Massa da amostra úmida  |

|                   |   |
|-------------------|---|
| $P_s$             | Massa da amostra seca   |
| PVA               | Acetato de Polivinila   |
| PVA50             | Acetato de Polivinila diluído 50-50%, PVA-água                                  |
| PVA70             | Acetato de Polivinila diluído 70-30%, PVA-água                                  |
| PU                | Poliuretano   |
| Q                 | Quartzo ( $\text{SiO}_2$ )  |
| RPM               | Resina Poliuretana derivada do óleo de Mamona                                   |
| RPM-S             | Compósito solo/RPM/Fibra de sisal   |
| RPM-P             | Compósito solo/RPM/Fibra de pupunha   |
| S                 | Área da seção transversal ( $\text{cm}^2$ ) da superfície em contato com a água |
| UR                | Umidade Relativa  |
| USCS              | Sistema Unificado de Classificação de Solos                                     |
| V                 | Volume  |
| $V_1$             | Volume inicial do corpo de prova nº 1 após sua desmoldagem                      |
| $V_n$             | Volume do corpo de prova nº 1 em cada etapa                                     |
| $V_{v,n}$         | Varição de volume do corpo de prova nº 1 em cada etapa                          |
| $V_{h,n}$         | Varição de umidade do corpo de prova nº 1 em cada etapa                         |
| $\epsilon_{40\%}$ | Deformação produzida por 40% da tensão última ( $\sigma_{40\%}$ )               |
| $\gamma$          | Massa específica das fibras vegetais  |
| $\gamma_u$        | Peso específico aparente úmido (densidade úmida)                                |
| $\gamma_s$        | Peso específico aparente seco (densidade seca)                                  |
| $\gamma_{s,max}$  | Peso específico aparente seco máximo (densidade seca máxima)                    |
| $\mu s$           | Microstrain   |
| $\sigma_c$        | Resistência à compressão simples  |
| $\sigma_t$        | Resistência à compressão diametral  |
| $2\theta$         | 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](http://www.mma.gov.br/estruturas/agenda21/_arquivos/carta_terra.doc)

Acessado em: Janeiro de 2005