

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA
DO RIO DE JANEIRO



João Queiroz Krause

Desenvolvimento de Elementos Especiais de Bambu para Treliças Espaciais

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0710930/CA

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da PUC-Rio.

Orientador: Khosrow Ghavami

Rio de Janeiro, setembro de 2009



João Queiroz Krause

Desenvolvimento de Elementos Especiais de Bambu para Trelças Espaciais

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

Khosrow Ghavami
Orientador

Djenane Pamplona
PUC Rio

Conrado de Souza Rodrigues
CEFET MG

Emil de Souza Sánchez Filho
UFF

José Eugênio Leal
Coordenador(a) Setorial do Centro Técnico Científico - PUC-Rio

Rio de Janeiro, 25 de setembro de 2009.

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

João Queiroz Krause

Graduou-se em Arquitetura e Urbanismo pela UFF (Universidade Federal Fluminense, Niterói, RJ) em 2005. Desenvolveu diversos trabalhos de restauro de antiguidades para Instituições públicas e colecionadores particulares, bem como projetos de arquitetura e consultorias. Participou de pesquisas iconográficas para publicações do Monumenta BID. Atualmente desenvolve pesquisas em materiais e tecnologias não convencionais, em especial bambu, madeira e materiais compósitos de matriz polimérica de origem natural, reforçados com fibras vegetais.

Ficha Catalográfica

Krause, João Queiroz

Desenvolvimento de elementos especiais de bambu para treliças espaciais / João Queiroz Krause; orientador: Khosrow Ghavami. – 2009.

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

Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)– Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.

Inclui bibliografia

1. Engenharia civil – Teses. 2. Bambu. 3. Ligações. 4. Materiais compósitos. 5. Materiais e tecnologias não-convencionais. 6. Reforço. 7. Treliças espaciais. I. Ghavami, Khosrow. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Civil. III. Título.

CDD: 624

À minha família.

Agradecimentos

À minha mãe, pela atenção e pelo amor incondicionais.

Ao pai que me adotou como filho, por ter me aceito e criado como tal.

À minha noiva, Camila, por seu apoio e carinho.

Aos meus amigos, irmãos que tive a chance de escolher, que me ajudaram a passar por este desafio com descontração, o que manteve a minha saúde intacta.

Ao meu orientador, Khosrow Ghavami, pelas conversas que, relativas ou não ao tema deste trabalho, sempre me adicionaram muito conhecimento.

Aos técnicos do laboratório, em especial ao Euclides, pelo auxílio na lida com equipamentos até então completamente novos para mim.

Aos membros da banca, principalmente ao professor Conrado, por gentilmente aceitarem esse convite e enriquecerem o trabalho com seus comentários.

À CAPES pelo apoio financeiro.

Resumo

Krause, João Queiroz; Ghavami, Khosrow. **Desenvolvimento de Elementos Especiais de Bambu para Treliças Espaciais**. Rio de Janeiro, 2009. 136p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Nesta dissertação foram desenvolvidos elementos estruturais passíveis de industrialização, utilizando o bambu como matéria prima principal, dando prosseguimento às pesquisas desenvolvidas pelo grupo de Materiais e Tecnologias Não Convencionais nesta Instituição, desde o final da década de 1970. Foram elaborados nós em bambu laminado contraplacado e ponteiras em material compósito polimérico, manufaturado com resíduo particulado proveniente da laminação do bambu *Dendrocalamus giganteus*. Foram ainda estudados colmos da espécie *Phyllostachys aurea* reforçados por toda a sua extensão com sisal trefilado embebido em poliéster. Estes componentes são destinados fundamentalmente à construção de treliças espaciais, retilíneas ou arqueadas, do tipo grelha em múltiplas camadas, aliando sustentabilidade e variabilidade formal para projetos de coberturas. Mediante pequenas adaptações, estes elementos podem ainda encontrar uso em outros tipos de estrutura como domos geodésicos, *tensegrity*s e treliças planas, de caráter temporário ou permanente. A partir da análise experimental de materiais e componentes e de dados obtidos em literatura específica estudaram-se, os esforços solicitantes e deslocamentos desenvolvidos em diferentes geometrias de estruturas, via modelagem em programa comercial de elementos finitos, obtendo-se vãos livres de até 12m e áreas cobertas sobre 4 apoios com capitéis de até 324m² com vão livre de 9m e balanços de 4,5m, elaboradas utilizando estes elementos. Os procedimentos desenvolvidos foram satisfatórios, permitindo a execução de elementos passíveis de industrialização e estocagem, de aplicação versátil e com acabamento variado, favorecendo a convencionalização do uso do bambu como material de construção.

Palavras-chave

Bambu, ligações, materiais compósitos, materiais e tecnologias não-convencionais, reforço, treliças espaciais.

Abstract

Krause, João Queiroz; Ghavami, Khosrow. **Development of Special Bamboo Elements for Space Structures**. Rio de Janeiro, 2009. 136p. Msc. Dissertation. - Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

The research on non conventional materials and technologies has been carried out at the Civil Engineering Department of PUC-Rio since 1979, in order to stimulate its use in civil construction, reducing the pollution and the energy consumption provoked by industrialized materials such as steel and cement. To disseminate the application of the non-conventional materials and technologies (NOCMAT) in a very large scale, it is necessary to develop industrial methods to process them, ensuring high production with quality and durability. As a continuation of this line of research, the present study is concerned with the development of structural elements designed for space structures, using bamboo as the main material. For this purpose the bamboo *Dendrocalamus giganteus*, has been selected to prepare laminated composite for the joints. In turn, using its plaining residuals as an addition to a polyester matrix composite. This was molded as a conical capped connection designed and produced to provide safe links between the joints and the bar of the space truss elements. For the latter the *Phyllostachys aurea* bamboo transversally reinforced with a polyester treated sisal string along its entire length. These components were used to assemble plain or arched multiple layers space structures, binding sustainability and formal freedom to roof structures design. The load-displacement for different structural geometries were evaluated, using a commercial FEM software, based on the experimental data from this work and the available literature, presented 12m maximum free spans and 324m² covered area supported by four columns. The developed procedures were satisfactory, allowing the production of industrial processed elements, easy storage, different finishing and versatile application.

Keywords

Bamboo, composite materials, joints, non-conventional materials and technologies, reinforcement, space trusses.

Sumário

1 . Introdução	18
1.1. Objetivos	20
1.2. Justificativas	20
2 . Revisão Bibliográfica	22
2.1. Materiais Compósitos	22
2.1.1. Materiais Naturais	23
2.1.2. Bambu: morfologia, propriedades, usos	23
2.1.3. Compósitos de matriz polimérica reforçados com fibras (PRF)	26
2.1.4. Compósitos Laminados	28
2.2. Estruturas Reticuladas Espaciais	29
2.2.1. Histórico	30
2.2.2. Estruturas Reticuladas Espaciais de Bambu	32
3 . Produção e Ensaio de Materiais	36
3.1. Metodologia	36
3.1.1. Bambu	36
3.1.2. Contraplacado de bambu	41
3.1.3. Compósito Particulado Bambu-poliéster (BP)	50
3.1.4. Compósito Sisal trefilado-poliéster	51
3.1.5. Bambu transversalmente reforçado	53
3.2. Resultados	57
3.2.1. Tração simples de Bambu	57
3.2.2. Compressão simples de Bambu	63
Força máx. (kN)	64
3.2.3. Contraplacado de Bambu	71
3.2.4. Compressão Compósito Bambu-poliéster	80
3.2.5. Tração Compósito Sisal-poliéster	81
3.2.6. Compressão Bambu transversalmente reforçado	83
4 . Detalhamento, Elaboração e Ensaio de Componentes	102
4.1. Ponteira	102

4.1.1. Descrição e detalhamento	102
4.1.2. Arrancamento (pull-out)	105
4.2. Nós	108
4.2.1. Tração Seqüencial Multidirecional	110
4.3. Barras Reforçadas	113
5 . Modelagem Computacional	116
5.1. Trelças Espaciais de Configuração Plana	117
5.1.1. Estudo do Carregamento	118
5.1.2. Trelças vinculadas nos bordos	121
5.1.3. Trelças apoiadas sobre capitéis	124
5.2. Trelças Espaciais de Configuração Curva	128
6 . Conclusões Recomendações e Sugestões para Trabalhos Futuros	131
6.1. Conclusões	131
6.2. Recomendações	132
6.3. Sugestões para trabalhos futuros	133
7 . Bibliografia	136

Lista de Figuras

Figura 1: a) Macro e mesoestrutura do bambu. b) Microestrutura de uma secção de parede do colmo de bambu (Ghavami, et al., 2003).	25
Figura 2: a) Tecidos vasculares da espécie <i>Dendrocalamus giganteus</i> em imagem obtida via microscopia eletrônica de varredura na PUC-Rio (Ghavami, et al., 2003). b) Imagem do tecido esclerenquimatoso e da espessura das paredes entre as fibrilas, obtida por micrografia topográfica. c) Fibra de bambu fraturada exibindo as fibrilas componentes do esclerênquima. d) Microestrutura de uma fibrila. (Ray, et al., 2005).	26
Figura 3: Estrutura reticulada espacial proposta por Alexander Graham Bell (Souza, et al., 2005).	31
Figura 4: Trincas longitudinais em um colmo de bambu da espécie <i>Dendrocalamus giganteus</i>	32
Figura 5: Treliza espacial de bambu com nós de aço (Moreira, 1991).	33
Figura 6: a) Detalhes de execução em vista de topo e lateral. b) Modo de falha típico da conexão elaborada (Moreira, 1991).	33
Figura 7: Sistema de reforço (Moreira, 1998).	34
Figura 8: Treliza espacial de <i>Phyllostachys pubescens</i> com ligações de PVC (Albermani, et al., 2007).	35
Figura 9: Corpo-de-prova de tração de bambu.	37
Figura 10: Aparelhagem e esquema de ensaio.	38
Figura 11: Modelo de corpo-de-prova para ensaio de compressão de bambu. ...	39
Figura 12: a) Gabarito para o posicionamento dos RDLs. b) Esquema de ensaio onde 1: corpo-de-prova, 2: RDL, 3: gabarito, 4: LVDT, 5: célula de carga. .	40
Figura 13: Inclinação de 12° dos RDLs no gabarito.	41
Figura 14: a) Cortes transversais, descartando os nós b) cortes longitudinais (radiais) c) corte longitudinal perimetral d) aparelhamento principal e) Aparelhamento lateral.	42
Figura 15: Gabarito para prensagem de contraplacado de bambu e posicionamento do gabarito na prensa hidráulica.	43
Figura 16: Modelo de corpo-de-prova de tração do contraplacado de bambu <i>Dendrocalamus giganteus</i>	45

Figura 17: Esquema de ensaio e corpo-de-prova com pequeno defeito de fabricação.	45
Figura 18: Modelo do corpo-de-prova de compressão axial do contraplacado de bambu <i>Dendrocalamus giganteus</i>	46
Figura 19: Modelo do nó a ser estudado, representando o motivo das dimensões do corpo-de-prova de tração pinada do contraplacado e corpos-de-prova com as três diferentes furações.	47
Figura 20: Suporte para conexão pinada com haletas soldadas para apoio dos RDLs.	48
Figura 21: a) Marcas de estrias provocadas pela rosca de um parafuso em um dos furos de um dos corpos-de-prova. b) Modo de ruptura global por cisalhamento na linha de um dos furos.	49
Figura 22: Corpo-de-prova de compressão compósito bambu-poliéster.	51
Figura 23: Corpo-de-prova para ensaio de tração do compósito cordoalha de sisal-poliéster.	53
Figura 24: Modelo da trinca de Griffith: Uma trinca por toda a espessura em uma placa infinita uniaxialmente tracionada.	54
Figura 25: Processo de confecção do reforço transversal: a) Aplicação da primeira camada de resina de poliéster. b) Aplicação da cordoalha de sisal. c) Embebimento das fibras com resina.	56
Figura 26: a) Fratura por cisalhamento tipo 1 do corpo-de-prova de tração do bambu <i>Phyllostachys áurea</i> . b) Posicionamento das haletas de alumínio e RDLs para a medição dos deslocamentos locais.	58
Figura 27: Gráfico de Relações Constitutivas dos corpos-de-prova ensaiados, considerando as deformações obtidas globalmente.	59
Figura 28: a) Modo de ruptura secundário: [1] Ruptura gradual das fibras externas ao colmo; [2] Ruptura em bloco das fibras internas ao colmo. b e c) imagens obtidas através de microscópio ótico, ilustrando o modo de falha secundário respectivamente das fibras externas e internas ao colmo do bambu.	60
Figura 29: Gráfico de tensão x deformação à tração de corpos-de-prova de <i>Dendrocalamus giganteus</i>	61
Figura 30: Ruptura na zona de transição alinhada com a zona de estricção e vista do topo do corpo-de-prova com a trinca propagada até a área de pinçamento e o descolamento das placas de alumínio.	62
Figura 31: Gráfico tensão x deformação longitudinal <i>Phyllostachys aurea</i>	64

Figura 32: Gráfico força x deslocamento transversal e fotografia do corpo-de-prova 1 ao término do ensaio.....	65
Figura 33: Gráfico força x deslocamento transversal e fotografia do corpo-de-prova 2 ao término do ensaio.....	65
Figura 34: Gráfico força x deslocamento transversal e fotografia do corpo-de-prova 3 ao término do ensaio.....	66
Figura 35: Modos de falha: 1: trincas por todo o comprimento e 2: flexão das fibras internas e ruptura local do tecido parenquimatoso.....	67
Figura 36: a) Placa de aço deformada na primeira série de ensaios. b) Modo de ruptura primário da primeira série de ensaios e demonstração do empenamento da chapa.....	68
Figura 37: Gráfico tensão x deformação comparativo dos ensaios de compressão de <i>Dendrocalamus giganteus</i>	69
Figura 38: Gráficos força x deslocamento da primeira série de ensaios de compressão de corpos-de-prova de <i>Dendrocalamus giganteus</i>	70
Figura 39: Gráficos força x deslocamento da segunda série de ensaios de compressão de corpos-de-prova de <i>Dendrocalamus giganteus</i> . Foto: Modo de falha representativo da segunda série de ensaios.....	71
Figura 40: Gráfico tensão x deformação do ensaio de tração do contraplacado com orientação diagonal em quatro camadas ortogonalmente dispostas...	72
Figura 41: Corpo-de-prova rompido e dois dos modos de ruptura apresentados pelo laminado submetido à tração, respectivamente cisalhamento tipo 1 e descolamento.....	73
Figura 42: Gráfico tensão x deformação do ensaio de compressão do contraplacado com orientação diagonal em quatro camadas ortogonalmente dispostas.....	74
Figura 43: a) Fratura a cisalhamento tipo 1, próxima à linha da colagem. b) As fibras repuxadas caracterizam o cisalhamento por abertura.	75
Figura 44: Seqüência ilustrativa do modo de ruptura do contraplacado à compressão axial.	75
Figura 45: Gráfico de tensão x deformação relativo aos corpos-de-prova ensaiados à tração pinada de contraplacado de bambu, com furos a 15mm das extremidades.....	76
Figura 46: Gráfico de tensão x deformação relativo aos corpos-de-prova ensaiados à tração pinada de contraplacado de bambu, com furos a 25 mm das extremidades.....	77

Figura 47: Gráfico de tensão x deformação relativo aos corpos-de-prova ensaiados à tração pinada de contraplacado de bambu, com furos a 15 e 31mm das extremidades.....	79
Figura 48: Gráfico tensão x deformação compósito bambu-poliéster.....	81
Os resultados obtidos nos ensaios à tração do compósito sisal-poliéster estão explicitados na Tabela 14.....	81
Figura 49: Gráfico tensão x deformação do ensaio à tração do compósito cordoalha de sisal-poliéster.....	82
Figura 50: Seqüência ilustrativa do modo de ruptura do compósito à tração.	83
Figura 51: a) Matriz fraturada com cordoalha de reforço íntegra. b) Visão de topo de um trecho da secção transversal.....	83
Figura 52: Gráficos tensão x deformação relativos ao ensaio de corpos-de-prova com altura igual a um diâmetro.	85
Figura 53: Curvas força x deslocamento transversal e fotos antes e depois do ensaio dos corpos-de-prova sem diafragma com altura igual a um diâmetro.	87
Figura 54: Curvas força x deslocamento transversal e fotos antes e depois do ensaio dos corpos-de-prova com diafragma com altura igual a um diâmetro.	88
Figura 55: a) diafragma trincado sob compressão do corpo-de-prova. b) Flambagem provocada pelo deslocamento do diafragma	89
Figura 56: Gráficos tensão x deformação relativos ao ensaio de corpos-de-prova com altura igual a dois diâmetros.....	91
Figura 57: Curvas força x deslocamento transversal e fotos antes e depois do ensaio dos corpos-de-prova sem diafragma com altura igual a dois diâmetros.	93
Figura 58: Curvas força x deslocamento transversal e fotos antes e depois do ensaio dos corpos-de-prova com diafragma com altura igual a dois diâmetros.	94
Figura 59: Gráficos tensão x deformação relativos ao ensaio de corpos-de-prova com altura igual a quatro diâmetros.	96
Figura 60: Curvas força x deslocamento transversal e fotos antes e depois do ensaio dos corpos-de-prova sem diafragma com altura igual a quatro diâmetros.	98
Figura 61: Curvas força x deslocamento transversal e fotos antes e depois do ensaio dos corpos-de-prova com diafragma com altura igual a quatro diâmetros.	99

Figura 62: Modo de ruptura característico dos corpos-de-prova reforçados com quatro diâmetros de altura.	101
Figura 63: Ponteira montada e em vista explodida com especificação das peças que a compõem.	103
Figura 64: Secção longitudinal do sistema de aperto da ponteira.	104
Figura 65: a) esquema de angulação das barras. b) Sistema de pinça ideal com três graus de liberdade para ajuste. c) Intertravamento das pinças no encaixe das conexões no nó.....	104
Figura 66: Início e fim do ensaio de arrancamento da ponteira.....	106
Figura 67: Gráfico Carga x Deslocamento obtido nos ensaios de arrancamento das ponteiras.	106
Figura 68: Arrancamento da ponteira sem ruptura na bucha ou no bambu.....	107
Figura 69: Vista explodida do nó em bambu laminado contraplacado e vista de topo do elemento montado e cotado.	109
Figura 70: Processo de produção dos nós.....	109
Figura 71: Gráfico força x deslocamento englobando todos os ensaios à tração nos nós.	111
Figura 72: Gráfico força x deslocamento dos ensaios à tração do núcleo central (base) e ilustração do seu modo de falha típico.	111
Figura 73: Gráfico força x deslocamento dos ensaios à tração dos componentes laterais e ilustração do seu modo de falha típico.....	112
Figura 74: Curva Tensão x Esbeltez determinada experimentalmente (Cruz, 2002).....	115
Figura 75: Configurações planas de treliças espaciais a) Vinculada a uma estrutura perimetral e b) Desvinculada no perímetro, sobre capitéis.	117
Figura 76: a) Coeficientes de pressão e forma externos em suas áreas de influência na cobertura. b) Sucções externas no telhado.	119
Figura 77: a) Pressão interna. b) Sucção interna.	120
Figura 78: Treliças com 25, 36, 49 e 64 módulos piramidais.....	122
Figura 79: Deformadas das combinações 1, 2, 3 e 4 no programa SAP2000. .	123
Figura 80: Treliça plana com capitéis, 144m ² de área coberta.	124
Figura 81: Deformadas das combinações 1, 2, 3 e 4 no programa SAP2000. .	125
Figura 82: Treliça plana com capitéis, 324m ² de área coberta.	126
Figura 83: Deformadas das combinações 1, 2, 3 e 4 no programa SAP2000. .	127
Figura 84: Treliça espacial de configuração curva.	129
Figura 85: Geometria indeformada em perspectiva, vista frontal, vista de topo e geometria deformada pela ação da combinação de carregamentos 3.....	130

Figura 86: Sistema de ponteira ideal, com inclinação de 6º capa de ponteira em tronco de cone mais longa, sistema de aperto invertido (mantendo a conexão externa regularmente posicionada) e exemplos de aplicação a colmos com parede de 7 e 5mm respectivamente, antes do pré-tensionamento. 134

Lista de Tabelas

Tabela 1: Propriedades físicas e mecânicas de fibras vegetais (Savastano Júnior, et al., 1994).	27
Tabela 2: Dados obtidos nos ensaios de tração da espécie <i>Phyllostachys aurea</i>	59
Tabela 3: Dados obtidos no ensaio à tração da espécie de bambu <i>Dendrocalamus giganteus</i>	60
Tabela 4: Dados obtidos nos ensaios à compressão da espécie <i>Phyllostachys áurea</i>	63
Tabela 5: Deslocamentos registrados pelos RDLs à tensão de escoamento dos corpos-de-prova de <i>Phyllostachys aurea</i> ensaiados à compressão.	64
Tabela 6: Dados obtidos no ensaio à compressão da espécie de bambu <i>Dendrocalamus giganteus</i>	68
Tabela 7: Leituras de deslocamento transversal obtidas à tensão de ruptura pelos RDLs posicionados no gabarito nos ensaios à compressão de <i>Dendrocalamus giganteus</i>	69
Tabela 8: Dados obtidos nos ensaios de tração do contraplacado de bambu antissimétrico com quatro camadas orientadas a 45º e 135º duas a duas. 72	
Tabela 9: Dados obtidos no ensaio de compressão do contraplacado de bambu.	73
Tabela 10: Tabela com os dados obtidos no ensaio à tração pinada do contraplacado de bambu, com furos a 15mm das extremidades.....	76
Tabela 11: Tabela com os dados obtidos no ensaio à tração pinada do contraplacado de bambu, com furos a 25mm das extremidades.....	77
Tabela 12: Tabela com os dados obtidos no ensaio à tração pinada do contraplacado de bambu, com furos a 15 e 31mm das extremidades.....	78
Tabela 13: Dados obtidos no ensaio à compressão do compósito particulado bambu-poliéster.	80
Tabela 14: Dados obtidos no ensaio à tração do compósito cordoalha de sisal-poliéster.	81
Tabela 15: Dados obtidos no ensaio à compressão dos corpos-de-prova com um diâmetro de altura.	84

Tabela 16: Deslocamentos transversais obtidos no ensaio à compressão dos corpos-de-prova com um diâmetro de altura.....	86
Tabela 17: Dados obtidos no ensaio à compressão dos corpos-de-prova com dois diâmetros de altura.....	90
Tabela 18: Deslocamentos transversais obtidos no ensaio à compressão dos corpos-de-prova com dois diâmetros de altura.....	92
Tabela 19: Dados obtidos no ensaio à compressão dos corpos-de-prova com quatro diâmetros de altura.	95
Tabela 20: Deslocamentos transversais obtidos no ensaio à compressão dos corpos-de-prova com quatro diâmetros de altura.	96
Tabela 21: Comparação do percentual de acréscimo de resistência nos diversos casos ensaiados.	100
Tabela 22: Forças e deslocamentos globais máximos obtidos no ensaio de arrancamento das ponteiros.....	107
Tabela 23: Forças máximas e deslocamentos obtidos nos ensaios à tração dos nós.....	110
Tabela 24: Valores de tensão e esbeltez críticos obtidos nos testes de flambagem (Cruz, 2002).....	114
Tabela 25: Carregamentos nodais na estrutura.	122
Tabela 26: Esforços e deslocamentos máximos.	123
Tabela 27: Carregamentos nodais na estrutura.	124
Tabela 28: Esforços e deslocamentos máximos.	125
Tabela 29: Carregamentos nodais na estrutura.	126
Tabela 30: Esforços e deslocamentos máximos.	127
Tabela 31: Carregamentos nodais na estrutura.	129
Tabela 32: Esforços e deslocamentos máximos.	130