

Walter dos Santos Teixeira Filho

**Soluções construtivas leves para arquiteturas de
clima tropical úmido**

Tese de Doutorado

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação
em Design da PUC-Rio como requisito parcial para
obtenção do grau de Doutor em Design.

Orientador: Prof. José Luiz Mendes Ripper

Rio de Janeiro

Abril de 2013

Walter dos Santos Teixeira Filho

**Soluções construtivas leves para arquiteturas de
clima tropical úmido**

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação
em Design da PUC-Rio como requisito parcial para
obtenção do grau de Doutor em Design. Aprovada
pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

Prof. José Luiz Mendes Ripper

Orientador

Departamento de Artes & Design – PUC-Rio

Prof. Fernando Betim Paes Leme

Departamento de Artes & Design – PUC-Rio

Prof. Alfredo Jefferson de Oliveira

Departamento de Artes & Design – PUC-Rio

Prof. Luis Eustáquio Moreira

Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG

Prof. Leonardo Menezes Xavier

Prefeitura Municipal de Paraty

Profa. Denise Berruezo Portinari

Coordenadora Setorial do Centro de Tecnologia
e Ciências Humanas – PUC-Rio

Rio de Janeiro, 12 de abril de 2013

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

Walter dos Santos Teixeira Filho

Graduou-se em Arquitetura e Urbanismo pela Universidade Federal do Rio de Janeiro em 1982. Obteve o título de Mestre em Arquitetura na área de Conforto Ambiental pelo PRO-ARQ da UFRJ em 1995, montou o Laboratório de Conforto Ambiental do Curso de Arquitetura e Urbanismo da PUC-Rio em 2003. Atualmente é professor de Conforto Ambiental no CAU da PUC-Rio e sócio gerente da empresa Abóbada Projetos e Obras desde 1996.

Ficha Catalográfica

Teixeira Filho, Walter dos Santos

Soluções construtivas leves para arquiteturas de clima tropical úmido / Walter dos Santos Teixeira Filho; orientador: José Luiz Mendes Ripper. – 2013. 200 f. : il. (color) ; 30 cm

Tese (doutorado)–Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Artes e Design, 2013.

Inclui bibliografia

1. Artes e design – Teses. 2. Construção leve. 3. Sobrecobertura. 4. Bambu. 5. Terra crua. 6. Fibras e resinas naturais. 7. Montagem. I. Ripper, José Luiz Mendes. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Artes & Design. III. Título.

CDD: 700

Aos meus pais (*in memoriam*)

Agradecimentos

Ao meu orientador José Luiz Mendes Ripper.

À PUC-Rio pela bolsa concedida, fundamental para a realização deste trabalho.

Aos pesquisadores do Laboratório de Investigação em Livre Design - LILD que compartilharam experiências e conhecimentos.

Aos técnicos do LILD, do Laboratório de Estruturas e Materiais – LABMEC e do Instituto Tecnológico – ITUC, que auxiliaram prestativamente nos experimentos.

Resumo

Teixeira Filho, Walter dos Santos; Ripper, José Luiz Mendes. **Soluções construtivas leves para arquiteturas de clima tropical úmido**. Rio de Janeiro, 2013. 200p. Tese de Doutorado – Departamento de Artes & Design, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

A presente tese trata de técnicas de baixo custo econômico, acessíveis à população e adequadas ao emprego de materiais que possam ser utilizados em seu estado natural, com pouco beneficiamento. O bambu, a terra crua e as fibras e resinas vegetais, são basicamente os materiais utilizados. Primeiramente foram realizados e testados objetos experimentais para funcionar como elementos de vedações, de cobertura, de sobrecobertura, de proteção externa – *brise-soleil* e arcos estruturais. Em seguida descreve o aperfeiçoamento de processos de encapsulamento do bambu em desenvolvimento no Laboratório de Investigação Livre Desenho da PUC-Rio. Dando continuidade ao trabalho sobre essas técnicas construtivas, a partir da manipulação de uma determinada bolha de sabão, foi elaborada uma série de modelos experimentais mecânicos e virtuais para uma sala multiuso de 7,70m x 6,00m de base, com altura de 3,20m, feita de fitas de bambu, mantas de barro cru, fibras e resinas vegetais. Na geometria destes modelos, paredes e cobertura se fundem em uma superfície contínua, com duas camadas superpostas, espaçadas e interligadas, formando uma casca que se apoia em toda a extensão do seu perímetro. A seguir, foi feita uma construção em escala real em que fitas de bambu descreviam a geometria base da bolha para testarmos de maneira não instrumentalizada possibilidades de montagem e desmontagem e os índices de resistência devidos ao particular formato da bolha. Finalmente, baseado neste último experimento, são apresentadas soluções gerais inovadoras para o conforto higrotérmico em climas tropicais úmidos que substituem a estratégia da

inércia térmica dos materiais espessos e pesados pela leveza de uma dupla casca estrutural que abriga câmaras de ar ventiladas em seu interior.

Palavras-chave

Construção leve; sobrecobertura; bambu; terra crua; fibras e resinas naturais; montagem.

Abstract

Teixeira Filho, Walter dos Santos; Ripper, José Luiz Mendes (Advisor). **Light construction solutions for architecture projects in humid, tropical climates.** Rio de Janeiro, 2013. 200p. Doctoral thesis – Departamento de Artes & Design, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

This thesis studies low cost building techniques that are accessible to a wide range of population groups and are suitable for the use of materials in their natural state with little or no processing. The materials used are basically bamboo, raw earth and vegetable fibers and resins. First a series of tests were carried out with experimental objects to assess suitability for use as sealants, covering, outer covering and external protection – *brise-soleil* panels and structural arches. Following this, we describe the perfecting of the bamboo coating process in progress the Free Design Laboratory of Rio's Catholic University. Building on these construction techniques, inspired by the manipulation of a soap bubble a series of experimental mechanical and virtual models were elaborated for a multi-use space measuring 7.7m by 6m at the base with a height of 3.2m, made of bamboo tapes, with a raw earth, fiber and resin covering. In the geometry of these models the walls and covering are a continuous surface with two layers one on another, separated but interconnected. In this way the outer wall is formed which extends over and is supported by the entire perimeter of the structure. The following step was to make a full scale construction in which bamboo tapes were used to form the geometric shape of the base of the bubble in order to do practical tests of the possibilities of assembly and disassembly of such a structure. Tests were also done on the resistance factors afforded by the singular bubble format. Finally, based on the previous experiment we present innovative solutions to the problem of hygrothermic comfort in humid tropical climates which substitute the

thermal inertia strategy of thick, heavy building materials with the lightness of a double outer layer that holds ventilated air chambers between these layers.

Keywords

Light construction; outer covering; bamboo; raw earth; natural fibers and resins; assembly.

Sumário

1	Introdução	16
1.1	Problematização	17
1.2	Objetivos	17
1.2.1	Geral	17
1.2.2	Específicos	17
1.3	Metodologia	18
1.4	Estrutura da tese	19
2	Contextualização	21
2.1	Arquitetura Bioclimática	21
2.2	Desmaterialização do produto	23
2.3	Ciclo de vida do produto	24
2.4	Revisão bibliográfica	26
2.4.1	Construções nativas	26
2.4.2	O conforto higrotérmico nessas construções	30
3	Compósitos de terra	32
3.1	Histórico	32
3.2	O compósito de fibrobarro	32
3.3	A matriz de barro cru	35
3.4	O reforço de fibra vegetal (sisal)	39
3.5	A interface	43
3.6	Mistura barro/fibras – proporções	44
3.7	Teor de vazios	46
3.8	Carga	46
3.9	Tratamento impermeabilizante	46
3.10	Desempenho térmico: Norma NBR 15.575	47
4	Design e experimentação	49
4.1	Brises	50
4.1.1	De varas de bambu	51
4.1.2	De fibrobarro	57
4.2	Painéis	63
4.2.1	Painel sanduiche de fibrobarro com miolo de isopor	66
4.2.2	Painel sanduiche de fibrobarro com <i>honey-comb</i>	70
4.3	Calhetão de fibrobarro	73
4.4	Arcos de feixe de bambu	86
4.5	Tratamento superficial do bambu	90
4.5.1	Preservação com resina e barro	94
4.5.2	Encapsulamento com resina e areia	99

4.6	Sobrecobertura	101
4.7	Formação de mão de obra	107
5	Proposta arquitetônica	109
5.1	Estrutura	111
5.2	Vedação	111
5.3	Sobrecobertura (em desenvolvimento)	111
5.4	Claraboia	112
5.5	Ventilação Natural	112
5.6	Iluminação Natural	112
5.7	Conforto Térmico	113
5.8	Projeto “Sala Bolha”	116
5.8.1	Introdução	116
5.8.2	Proposta de projeto	117
5.8.3	Processo de desenvolvimento	119
5.8.4	Modelo reduzido com carapaça externa	130
6	Conclusão	135
	Referências bibliográficas	140
	Apêndices	
1	Placas de fibrobarro: cálculo da densidade	145
2	Cálculo da transmitância térmica e capacidade térmica: parede de fibrobarro	146
3	Cálculo da transmitância térmica em coberturas de fibrobarro	148
4	Cálculo da densidade do fibrobarro no painel com miolo de isopor	149
5	Cálculo da transmitância térmica do painel com miolo de isopor	150
6	Cálculo da densidade do fibrobarro no painel de <i>honey-comb</i>	152
7	Cálculo da transmitância térmica e capacidade térmica do painel com miolo de <i>honey-comb</i>	153
8	Cálculo da transmitância térmica através da telha calhetão em fibrobarro	155
9	Cálculo de transmitância térmica do <i>brise</i> com lâminas de bambu	157
10	Cálculo de transmitância térmica do <i>brise</i> com lâminas de fibrobarro	158
11	Cálculo de transmitância térmica do conjunto <i>brise</i> /painel com miolo de <i>honey-comb</i>	159
12	Cálculo de transmitância térmica do conjunto <i>brise</i> /telha calhetão	161
13	Transmitância térmica no sistema construtivo leve dotado de sobrecobertura	163
14	Cálculo de transmitância térmica de uma parede de concreto armado com 0,6 m de espessura	166

15	Cálculo de transmitância térmica no sistema dotado de sobrecobertura com septo	167
16	Cálculo do fluxo de ar pela sobrecobertura e pelo interior da “Sala Bolha”	170
17	Mapa alfa numérico das fitas da “Sala Bolha”	172
18	Diário de atividades do aprendiz	175
19	Modelo de catálogo de composição de serviços	181
Anexos		
1	Algumas tipologias de arquitetura nativa	192
2	Acréscimo da vazão com a relação entre as áreas de entrada e saída de ar	199
3	Equipamentos de proteção individual - NR6	200

Lista de tabelas e figuras

Tabelas

Tabela 1	Classificação de solo pelo diâmetro de suas partículas	36
Tabela 2	Variação do coeficiente de condutibilidade térmica do barro	39
Tabela 3	Variação da resistência à compressão pela densidade do barro	39
Tabela 4	Variação da resistência à compressão do barro com palha	39
Tabela 5	Propriedades físicas e mecânicas das fibras de sisal	42
Tabela 6	Alívio de massa é devido à inserção do sisal	45
Tabela 7	Nomenclatura e medidas das 22 fitas estruturais	122
Tabela 8	Comparação do peso com a densidade de placas de barro	145

Figuras

Figura 1	Zoneamento Bioclimático Brasileiro	21
Figura 2	Carta Bioclimática do Rio de Janeiro	23
Figura 3	Construção no Noroeste da Ásia e <i>buraco de bugre</i>	27
Figura 4	Aldeia <i>ianomâmi</i> e casa unitária <i>marubo</i>	29
Figura 5	Casa de iniciação, aldeia <i>xavante</i> ; <i>taba tupi</i>	29
Figura 6	Oca do Alto Xingu	29
Figura 7	Aldeia índios <i>Kamayurá</i>	31
Figura 8	Oca em construção dos índios <i>Kamayurá</i>	31
Figura 9	Manta de fibrobarro para reservatório d' água	33
Figura 10	Preparo de manta de fibrobarro - gabarito	34
Figura 11	Preparo de manta de fibrobarro – sisal e barro	34
Figura 12	Preparo de manta de fibrobarro - acabamento	34
Figura 13	Teste com barro	37
Figura 14	Croquis de uma ciranda	37
Figura 15	Corpos de prova de barro cru	38
Figura 16	Placas de barro cru com e sem fibras de sisal	40
Figura 17	Pés de <i>Agavee sisalana</i> (sisal)	41
Figura 18	Imagens da fibra de sisal por microscopia eletrônica	43
Figura 19	Gabarito e placas de barro com proporções de sisal	45
Figura 20	Cúpula de barro cru deformada pela chuva	47
Figura 21	Fotos de brises em: MEC, ABI e Obra do Berço	50
Figura 22	Obstrução solar por fitas - croquis	51
Figura 23	Lâmina de brise com fitas de bambu	52
Figura 24	Lâmina de brise com varas de bambu	52
Figura 25	Pré-montagem do brise no LILD	53
Figura 26	Malhas de bambu, croquis do arquiteto Hidalgo Lopes	56
Figura 27	Estrutura de bandeja de brise em malha de bambu	58
Figura 28	Manta de fibrobarro acondicionada em rolo	59
Figura 29	Picotamento de sisal e espalhamento sobre bandeja de brise	59
Figura 30	Lâminas de brise em processo de secagem	60

Figura 31	Brise instalado no peitoril da janela da sala L231	61
Figura 32	Bandeja com mescla de barro posta para secagem	61
Figura 33	Croquis de Lucio Costa para fechamento externo com taipa	63
Figura 34	Painéis pré-fabricados para taipa, em Cajueiro Seco, PE	64
Figura 35	Croquis de painéis pré-fabricados para taipa	64
Figura 36	Manta de fibrobarro seca, com trama de rachaduras	67
Figura 37	Face do painel com miolo de isopor impermeabilizada	68
Figura 38	Película externa do painel semi-desprendida	68
Figura 39	Aplicação de resina na face do <i>honey-comb</i> autoestruturado	71
Figura 40	Painel sanduiche de fibrobarro com miolo de <i>honey-comb</i>	73
Figura 41	Mantas aplicadas em estrutura pantográfica no LILD	74
Figura 42	Cúpula de fibrobarro projetada a partir de curva catenária	74
Figura 43	Vista superior do modelo reduzido da telha	75
Figura 44	Croquis da estrutura conforme foi montada	77
Figura 45	Telha apoiada no piso de brita do LILD	78
Figura 46	Rachaduras devido à retração da camada de barro	79
Figura 47	Perspectiva expandida da telha	80
Figura 48	Telha acomodada sobre pedras no piso do LILD	82
Figura 49	Corte esquemático da estrutura da telha	83
Figura 50	Vista de topo do corte com serrote de uma aba da telha	84
Figura 51	Pedaços de película de resina vegetal com barro	85
Figura 52	Curva catenária formada uma corrente	87
Figura 53	Fita de bambu acompanhando a curvatura da corrente	87
Figura 54	Arco de quatro fitas e de seis fitas	88
Figura 55	O prof. Ripper e os pesquisadores	90
Figura 56	Colmo de <i>mossô</i> perfurado por <i>tigre</i>	92
Figura 57	Pó resultante da ação do caruncho	92
Figura 58	Bambus com tipos variados de tratamento	93
Figura 59	Bambu tratado com solução de água, querosene e sal	94
Figura 60	O aprendiz lixando um colmo de <i>mossô</i>	95
Figura 61	Colmo preso à máquina com as bandagens confeccionadas	96
Figura 62	Colmos encapsulados e perfurados por <i>tigre</i>	98
Figura 63	Bambu perfurado por larvas de <i>tigre</i>	98
Figura 64	Colmo tratado com areia e perfurado por <i>tigre</i>	99
Figura 65	Colmo pintado de resina e envolvido com gaze	100
Figura 66	Aplicação com as mãos da camada de areia e resina	100
Figura 67	Bambu tratado com resina e areia a mais de ano	100
Figura 68	Meia-forma forrada com filme de PVC	102
Figura 69	Retirada de resina com pipeta e preparação da mescla	103
Figura 70	Aplicação da mescla e colocação de outra camada de gaze	103
Figura 71	Moldes curvos desformados	104
Figura 72	Placas planas	104
Figura 73	Placa plana com 0,80 cm x 0,40 cm	105
Figura 74	O aprendiz efetuando a mistura dos componentes da resina	107
Figura 75	Proteção solar de bambu	108
Figura 76	Cortes esquemáticos de paredes com painel de <i>honey-comb</i>	109
Figura 77	Cortes esquemáticos de telhas calhetão	110
Figura 78	Croquis da vista superior de uma “Sala bolha”	113
Figura 79	Croquis do corte transversal de uma “Sala bolha”	114
Figura 80	Croquis do corte longitudinal de uma “Sala bolha”	114

Figura 81	Corte da sobrecobertura mostrando a dupla câmera	115
Figura 82	Croquis para ampliação do I.R.I. - fachadas	117
Figura 83	Estudo para ampliação do I. R. I.	118
Figura 84	Corte transversal e esquema de iluminação e ventilação	119
Figura 85	Modelagem dos módulos no programa <i>Sketchup</i>	119
Figura 86	Imagens de várias bolhas manipuladas no LILD	120
Figura 87	Deformação instrumentalizada da bolha de sabão	121
Figura 88	Programa <i>Plugin Soap Bubble</i> para <i>Sketchup</i>	121
Figura 89	Miniatura em escala 1:25; vistas interna e perspectivada	123
Figura 90	Amarração da trama percebendo a deformação	124
Figura 91	Estrutura erguida vendo as sobras de cordas em cada nó	125
Figura 92	Colmos de mossô sendo tratados para formar a base	125
Figura 93	Amarração para as fitas maiores e a estrutura já montada	126
Figura 94	Vista interna do canto onde será aberta o vão de entrada	126
Figura 95	Modelo com base de 1,30 m x 1,00 m e altura de 54 cm	127
Figura 96	Maquete com peças de papel coladas reproduzindo mantas	127
Figura 97	Maquete com amarrações de travamento em <i>tensigrits</i>	128
Figura 98	Fitas amarradas vendo a superposição de fitas	128
Figura 99	Estrutura com fitas em <i>esterilha</i> e com rede de cabos	129
Figura 100	Estrutura em montagem no pilotis	129
Figura 101	Colocação de gomos de papel para simulação de vedação	129
Figura 102	Ação da chuva com vento sobre a estrutura recoberta	130
Figura 103	Meias-formas da estrutura interna e da sobrecobertura	131
Figura 104	Moldes da estrutura e molde inteiriço da sobrecobertura	132
Figura 105	Carapaça com claraboia	132
Figura 106	Maquete montada	133
Figura 107	Detalhe da claraboia e vista aérea da maquete	133
Figura 108	Esquema alfanumérico para a marcação das fitas estruturais	172
Figura 109	Esquema para as fitas estruturais (menor dimensão)	173
Figura 110	Esquema para as fitas estruturais (menor dimensão – cont.)	174
Figura 111	Casa Tiriyo: planta baixa circular e encaibramento	192
Figura 112	Casa Tiriyo: cortes e fachadas	192
Figura 113	Casa Tiriyo: planta baixa elíptica e encaibramento	193
Figura 114	Casa Tiriyo: cortes transversais e fachadas	193
Figura 115	Casa Tiriyo: cortes longitudinais e fachadas	194
Figura 116	Casa Tiriyo: cortes transversais e fachadas lateral e frontal	194
Figura 117	Casa Tiriyo: planta baixa retangular	195
Figura 118	Casa xinguana: planta baixa e corte - antropofornismo	196
Figura 119	Casa xinguana: planta, corte e fachada - antropofornismo	196
Figura 120	Antiga casa Karajá: cortes e fachadas	197
Figura 121	Habitação Karajá: planta, corte, fachada e encaibramento	197
Figura 122	Revestimento em folha de palmeira	198
Figura 123	Tipos de amarração	198
Figura 124	Acréscimo da vazão: vãos de entrada e saída de ar	199