

FORM-FINDING DE TENSOESTRUTURAS DE BAMBU E MEMBRANA

Luís Eustáquio Moreira ^a ; Luiza Carneiro Boechat ^b

^a Universidade Federal de Minas Gerais, Brazil, luis@dees.ufmg.br

^b Universidade Federal de Minas Gerais, Brazil, lu_cboechat@yahoo.com.br

RESUMO

Neste artigo o procedimento Form-finding de geração de estruturas leves, intuído por Frei Otto, Otto et al. [1], é utilizado para formar uma tensoestrutura de bambu, cabos e membrana. O form-finding é uma conquista da forma ótima de um objeto baseada nos princípios de formação das formas naturais. Frei Otto procurou implementar estes processos através de modelos físicos reduzidos, numa época em que softwares eficientes não estavam facilmente disponíveis como atualmente. Apropriar-se do conceito Form-finding, adequá-lo ao desenvolvimento de diferentes formas com diferentes materiais, ampliar seu limite de aplicação e usufruir das diferentes possibilidades formais a que ele conduz, tem sido um dos objetivos do LASE – Laboratório de Sistemas Estruturais – onde esta investigação foi realizada. Com o advento de softwares capazes de calcular superfícies estáveis e concluir sua Análise Estrutural, que hoje participam dos Processos Form-finding; aumentou-se a facilidade e precisão com que se consegue gerar estas estruturas funcionais e de estética surpreendente, conseqüência de uma habilidade que se desenvolve com a utilização do método. A integração de modelos físicos e modelos matemáticos, para se alcançar uma solução otimizada num conjunto de possibilidades, mostra ser a melhor opção. A recursividade entre os modelos físicos e matemáticos é na realidade a fonte de um desenvolvimento consistente. O objeto alvo desta pesquisa é projetar e analisar um abrigo para um veículo de passeio. Nesse caso, o bambu, pela alta relação resistência/peso, demonstra combinar-se perfeitamente aos quesitos das estruturas leves: - leveza e baixo consumo de energia. Diversas formas geométricas foram experimentadas. As mais significativas constam neste artigo.

Palavras-chave: Form-finding; tensoestruturas; bambu; membrana; modelagem

ABSTRACT

In this paper the procedure form-finding for generating stable lightness structures, imagined by Frei Otto, Otto et. al [1] is used to form tensile structures of bamboo, cables and membrane. The form-finding is a conquest of the optimum deflected shape of an object based on the natural shape building. Frei Otto conducted these processes through reduced physical models, in a time when efficient software was not as easily available as nowadays. To adopt Form-finding concepts, make it suitable to different forms with different materials, enlarge its application boundaries and to usufruct from its formal possibilities has been one of the goals of LASE – Laboratory for Structural Systems, where this research was conducted. As of the coming of software able to calculate stable surfaces and analyze tension, part of the form-finding process, the speed and precision of creation of these functional and surprisingly aesthetic structures had increased. This fact results from the increasing ability to deal with tensile structures, which is caused by the spread of the method. The integration of physical and mathematical models, to the conquest of an optimum form, among many others possibilities, shows to be the best option. The pure mathematical optimization is far to turn obsolete the use of physical models as part of the shaping research. The dialectic feedback of theory-substance is indeed the source of all consistent developments. The target object of this research is a carport for a big vehicle. The bamboo of the structure, due to its high rate resistance/weight shows perfectly to attend to the

requirements for light structures: lightness and low waste energy. Many geometrical shapes were tested and the most important are presented here.

Key words: Form-finding; tensile structures; bamboo; membrane; modeling

INTRODUÇÃO

Construções leves não são fáceis de obter. Elas são uma conquista passo a passo, que segundo a metodologia do Instituto de Estruturas Leves da Universidade de Stuttgart, fundado por Frei Otto, Otto et al. [2009]; consiste na integração de materiais leves, estruturas leves e sistemas construtivos leves, num mesmo objeto.

Para Frei Otto, “a arquitetura moderna está em crise. Ainda no século XX as construções não são realmente funcionais em muitos casos. A funcionalidade tornou-se decoração e as pessoas continuam morando no mundo das idéias expressionistas e pensando que a arquitetura tem que expressar alguma coisa. Ao invés de procurar novas soluções, os arquitetos estão contentes em citar os elementos formais, massivos, uma reconstrução que representa um tradicionalismo da arquitetura moderna”.

Nas construções leves, contrariamente às tradicionais, privilegia-se a técnica e a ciência sobre os aspectos ornamentais ou decorativos, a efemeridade sobre a permanência, a autonomia da expressão estética sobre a projeção inflexível de uma forma. Observando-se os processos de formação autônomos das geometrias da natureza, principalmente quanto aos princípios físicos, mais do que biológicos, cunhou-se a expressão “form finding”, que seria aquele processo que, dado um conjunto de condições e seguindo-se os princípios naturais, faz surgirem formas e construções sob condições experimentais.

As construções leves surgem como uma necessidade, num momento histórico em que se estima que para cada novo habitante das cidades, sejam acrescentados 20 t de concreto ao ambiente construído, valor três vezes maior para um país como a Alemanha. Inversamente, para cada novo nativo africano, acrescenta-se 0,2 a 0,8 t de madeira e fibras naturais, Otto et al. [2009]. Com estas cifras infere-se da diferença entre a quantidade de lixo gerado nas duas situações, entre o consumo de energia em trabalho humano, máquinas e materiais e, ainda, entre o impacto ambiental dessas formas opostas de ocupação do espaço.

Esta investigação é parte das atividades de desenvolvimento de objetos tecnológicos do LASE – Laboratório de Sistemas Estruturais- do Dep. De Estruturas da Escola de Engenharia da UFMG –, em parceria com o LILD – Laboratório de Desenvolvimento em Living Design – PUC Rio; onde, há cerca de 20 anos, realizam-se experimentos com modelos físicos.

MATERIAIS E MÉTODOS

Como visto, o Instituto de Estruturas Leves classifica os diferentes aspectos de uma construção leve e os divide em três categorias principais: materiais leves, estruturas leves e sistemas de construção leves. Na presente investigação, bambus, cabos, tecidos, adesivos e membranas convergem para campos de jogos em modelos físicos, juntamente com geometrias e materiais diversos, resultado de um jogo de formas, Moreira [2].

O Bambu é um material muito leve

O material resistente do bambu é formado por dois tipos de células, cujas paredes têm uma composição polimérica, lignino-celulósica. Elas formam anatomicamente dois tecidos principais: - as fibras – esclerênquima –, com células cilíndricas alongadas e de maior densidade relativa, sobrepostas ao longo do eixo tubular do bambu e aglomeradas em

feixes; e células oblongas ocas – parênquima –, que envolvem estes feixes de fibras e os vasos condutores de seiva, Liese [3], sendo verdadeiros depósitos de açúcares, que alimentam os rizomas da planta e as novas brotações, Figura 1.

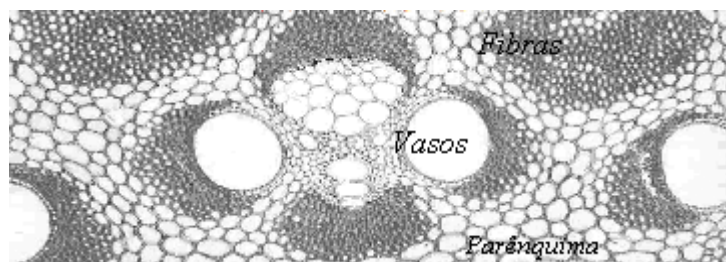


Figura 1: Anatomia da seção transversal do bambu
 Fonte: CEPLAM III - UFMG

Alta razão resistência/peso surge desta composição e distribuição anatômica. Os bambus *Phyllostachys pubescens*, utilizados na construção dos objetos deste artigo, por exemplo, apresentam uma densidade aparente de $8,0 \pm 0,6 \text{ kN/cm}^3$. Esta é certamente uma espécie de bambu com alta densidade. Por outro lado, as resistências médias à tração e compressão paralelas às fibras, são respectivamente $100 \pm 9 \text{ MPa}$ e $81 \pm 12 \text{ MPa}$.

A Tabela 1 compara a razão valor estrutural = resistência/peso, dos principais materiais de construção utilizados no Brasil com a do o bambu *Phyllostachys pubescens*, onde se constata facilmente a superioridade estrutural deste material, cujas transformações estruturais adaptativas ocorreram ao longo de 200 milhões de anos.

Tabela 1: Valor estrutural dos Materiais de Construção

Material	Concreto	Aço A36 (escoamento)	Madeira Paraju	<i>Phyllostachys pubescens</i>
R. Compressão (MPa)	20	250	83	81
R. tração (MPa)	-	250	139	100
D. aparente (kN/cm^3)	25	78,5	11,4	8
Valor estrutural na compressão	0,8	3	7	10
Valor estrutural na tração	0	3	12	13

A Tabela 2 compara a rigidez à flexão EI , produto que caracteriza as deslocabilidades dos elementos estruturais em flexão simples ou em flexo-compressão. Para os bambus *Phyllostachys pubescens* do lote ensaiado em nossos laboratórios, o Módulo de Young E médio é de 11370 MPa . O bambu de referência tem 1 cm de espessura média de parede t . Neste caso, um segmento de 1 m de comprimento e estas características médias de seção transversal pesa $2,3 \times 10^{-2} \text{ kN}$. As espessuras dos demais tubos foram então calculadas de forma que se tenha este mesmo peso final por metro. Ainda que sob essa comparação o bambu seja mais flexível que o aço e a madeira, valem os seguintes comentários, quanto ao funcionamento mecânico destes elementos.

Tabela 2: rigidez à flexão de tubos hipotéticos e tubos reais *Phyllostachys pubescens*

Material	Concreto	Aço A36	Paraju	<i>Phyllostachys pubescens</i>
$EI (\text{kN/m}^2)$	21,5	79,8	50,5	33,0
$t (\text{mm})$	3	1	7	10

Os bambus ocos têm uma relação Diâmetro/Espessura D/t de parede, que pode variar de 6 a 15. Quando comprimidos, os segmentos esbeltos e semi-esbeltos, estes com imperfeição de eixo, defletem-se lateralmente até atingirem a carga limite, que ocorre geralmente por esmagamento das fibras na região côncava, próxima ao centro do elemento. Os nós do bambu funcionam como enrijecedores que impedem a ocorrência de instabilidades locais sob tensões mais baixas, antes do esmagamento das fibras.

Por outro lado, o tubo de aço tem comportamento completamente diferente sob compressão. Ele não trabalha arqueado, quando comprimido, e pode ter problemas de instabilidade local, antes da instabilidade global. Para que não ocorra a instabilidade local, a relação D/t_{\max} não pode ultrapassar, segundo o AISC (Instituto Americano da Construção em Aço), o valor de $0,11E/f_y$. Ou seja, para o exemplo dado, 100 deve ser menor ou igual a $0,11 \times 210000/250 = 92$, o que não é verdadeiro. Logo, sob tensões inferiores ao escoamento, o perfil de aço iria flambar localmente, ou seja, a rigidez à flexão seria inferior a $79,8 \text{ kN}$. Por essa razão e por razões de riscos de amassamento por impactos no transporte, um tubo de aço com essa pequena espessura e 100 mm de diâmetro não é produzido para fins de mercado. Por outro lado, tentar gerar um tubo de madeira com as dimensões especificadas seria também uma cara ficção sem finalidades objetivas, visto que a tecnologia de tubos compósitos poliméricos consegue altas resistências a custos competitivos.

Portanto, à exceção destes últimos, se o objetivo é suportar um maior carregamento, com menores flechas ou deflexões laterais, nenhum outro material de construção convencional estaria disponível para preencher esta geometria tubular, com o mesmo peso do bambu; forma esta escolhida por ter dimensões adequadas à aplicação em estruturas treliçadas e mastros para tendas, Moreira e Melo [4], e por ser facilmente selecionada em diferentes espécies de bambu. Por outro lado, se o objetivo é a flexibilidade, e com isto a facilidade de formar arcos, então por razões essencialmente mecânicas, os bambus somente seriam superados pelos tubos poliméricos citados, cujo complexo processo de produção leva certamente a um maior consumo de energia que a produção fotossintética dos bambus. O módulo de Young relativamente baixo explica a menor rigidez à flexão encontrada.

Bambus e Cabos formam sistemas estruturais muito leves

A estrutura de uma construção leve ou um load-bearing (habilidade ou competência com que um objeto transfere forças) é um assunto bem mais complexo do que seu material constituinte. Ainda hoje, segundo Frei Otto, a otimização matemática permanece inapta para prever se uma mesma função poderia ser resolvida por um sistema estrutural completamente diferente daquele selecionado pelo processo matemático de otimização utilizado.

O processo de otimização do sistema estrutural aqui apresentado, em trânsito como todo objeto, é o atual estágio de um longo trabalho de pesquisa de design de estruturas leves de bambu, que teve início com o resgate das tendas Yourts dos povos Tuaregs, habitantes do deserto Saara; passando pelo desenvolvimento de estruturas tensegrity, Moreira e Ripper [5], sendo finalmente inspirado nas primeiras pipas meteorológicas.

As ligações amarradas, utilizadas na marinharia, por sua leveza, facilidade de execução e pela forma com que distribuem a tensão entre os diversos elementos componentes do objeto, estão tendo prioridade neste desenvolvimento, ainda que sejam de difícil controle mecânico. Contudo, foram estas as primeiras técnicas de ligação utilizadas pelos habitantes do deserto e continuam sendo as soluções mais leves e menos invasivas dos elementos que conectam.

O objeto alvo do empreendimento é uma cobertura leve para estacionamento para um veículo de passeio de grande e altura, como uma caminhonete, por exemplo. O sistema estrutural é de bambus e cabos. A forma aproximada de uma concha, por suas características aerodinâmicas, e por desempenhar a função desejada, foi adotada como referência. A pele de revestimento da estrutura seria lona de algodão costurada ou lona sintética eletronicamente soldada.

Colocada a questão arquitetônica e os materiais disponíveis, surgem novas questões técnicas e de design, que se relacionam com os princípios de funcionamento do objeto:

- 1) Como distribuir as barras de bambu na estrutura, suas dimensões transversais e comprimentos livres, visando a descrição da forma alvo num meio de inserção onde as cargas principais são vento e peso próprio?
- 2) Como conectar os cabos aos bambus? Quais os elementos de fixação? Como evitar o escorregamento dos cabos no corpo dos bambus?
- 3) Como conectar os bambus entre si?
- 4) Quais os nós a utilizar na amarração dos elementos?
- 5) Quais os cabos mais adequados e como tracioná-los?
- 6) Como modelar a membrana e como conectá-la ao sistema estrutural principal?

Todas estas questões vêm sendo respondidas ao longo dos anos e por isso puderam ser aplicadas ao desenvolvimento deste objeto, estando ainda sob investigação de uma série de aspectos mecânicos e de design.

As Figuras 2,3 e 4 mostram respectivamente, o modelo físico Conceitual, o modelo Digital e o modelo Construtivo, Moreira e Caliman [6].



Figura 2: Modelo Conceitual

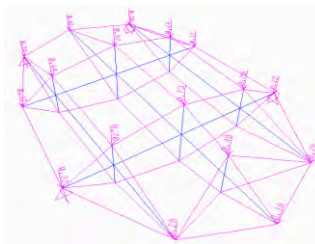


Figura 3: Modelo Digital

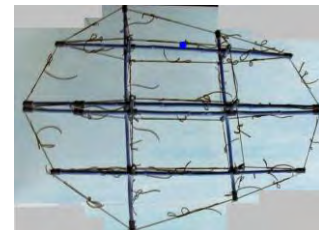


Figura 4: Modelo Construtivo

Reduzir componentes leva a Sistemas Construtivos mais leves

Os Sistemas Construtivos tornam-se mais leves à medida que alguns elementos possam ser subtraídos da ordem obtida, dentro do princípio da redução de massa, explorando o quanto possível a colaboração integrada dos diferentes componentes, para o funcionamento mecânico final do objeto. O atendimento a este requisito, de forma alguma leva necessariamente a objetos de menor custo, embora conduza à redução do peso. Isso porque a análise torna-se mais complexa, e o mesmo pode ocorrer com a fabricação e montagem do objeto final. Problemas de instabilidade acentuam-se e exigem maior investigação e aperfeiçoamento dos detalhes construtivos, aumentando-se as exigências quanto ao funcionamento de cada um dos componentes, agora sistemicamente interligados.

FORM-FINDING DO SISTEMA ESTRUTURAL

As inovações exigem que se transcendam velhos conceitos e pré-conceitos, que se vá além da inércia das técnicas e objetos já implementados; que tendem a se impor como melhores ou mesmo como única solução de uma questão, pelo simples fato de já existirem e serem eficazes.

Questões do tipo: - pintar ou não o bambu; lixar ou não a sua superfície; amarrar ou aparafusar os elementos entre si; não devem ter apelos românticos ou estéticos, a menos que intencionalmente colocadas com objetivos mercadológicos. As decisões a serem tomadas devem antes obedecer a critérios físicos para que se obtenha o melhor funcionamento do objeto no seu meio de inserção, para exercício eficaz de sua função. Neste objeto, a superfície do bambu será pintada com um selante fungicida de cor branca. Além da impermeabilização e proteção contra o ataque de fungos, a pintura branca terá o objetivo de diminuir a absorção do calor, já que aquecimentos diferenciais podem fissurar os tubos.

Três diferentes amarrações foram utilizadas: - o nó Fiel, que abraça o elemento e diminui o escorregamento; o nó cego, que dá o acabamento aos nós Fiel, Figura 5; e o nó de Caminhoneiro, para estiramento dos cabos, Figuras 6, dado em cada um dos trechos. O protótipo da estrutura, Figura 6, foi realizado com bambus de 8 a 10 cm de diâmetro externo médio e 8 mm de espessura de parede. O comprimento máximo do protótipo nas longarinas centrais é de 6 metros e a maior envergadura tem 4 metros.

Para evitar o escorregamento dos cabos nas conexões, uma bandagem de tecido e adesivo foi realizada em anel, conforme Figura 7.



Figura 5: Amarrações das barras



Figura 6: Protótipo



Figura 7: Nervura compósita

Todos os experimentos com modelos físicos aconteceram paralelamente à análise estática estrutural, através do software SAP 2000, análise estática e testes mecânicos de resistência das conexões. Os maiores esforços solicitantes na estrutura, Figuras 8 a 10, ocorrem por efeitos de sustentação do vento, ou seja, quando o vento atua para cima, Moreira e Calimann [6]. Considerou-se, segundo as curvas de vento, para a cidade de Belo Horizonte, Brasil, um vento de 30 m/s, que produz pressão dinâmica de $0,54 \text{ kN/m}^2$ e coeficientes aerodinâmicos +1, resultante para cima e -0,5, resultante para baixo, após analogia com coeficientes aerodinâmicos de outras coberturas mostradas na ABNT [7].

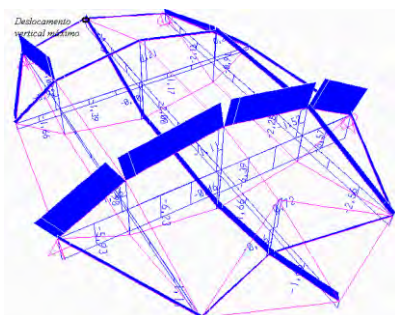


Figura 8: Forças axiais (kN)

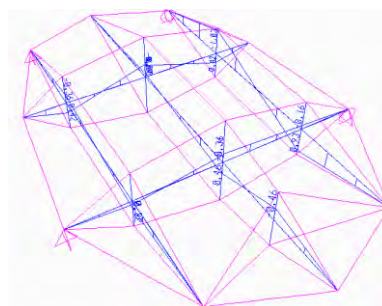


Figura 9: Momentos Fletores (kNm)

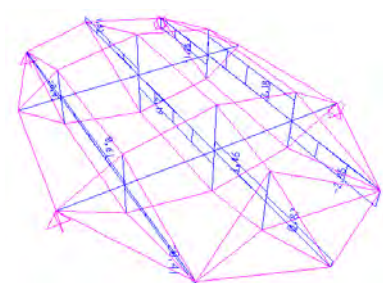


Figura 10: Forças Cortantes (kN)

Os valores máximos de cargas axiais no cabo e no bambu, respectivamente iguais a 6,29 *kN* e -6,53 *kN* são relativamente pequenos e facilmente absorvíveis em termos de resistência e estabilidade.

Do mesmo modo, o momento fletor máximo de 0,93 *kNm*, Figura 9, no local em que ocorre, é facilmente absorvível pelo bambu considerado. Por outro lado, as forças cortantes, por exemplo, a força de 3,16 *kN*, Figura 10, alerta para que sejam feitos testes de flexão com cargas concentradas, não somente para investigar a resistência ao cisalhamento na flexão, mas também para verificar a possibilidade de amassamento do tubo. O deslocamento vertical teórico máximo é igual a 32 *mm* no nó posterior, indicado na Figura 8.

FORM-FINDING DA MEMBRANA DE COBERTURA

A partir da organização de barras atingida pelo Form-finding do sistema estrutural de bambus e cabos, bem como dos aspectos estéticos – equilíbrio, simetria, leveza, dimensões, dentre outros – iniciou-se o Form-finding de fabricação da membrana de cobertura.

Na realidade, todo o processo Form-finding, que denominamos Design Interativo, aconteceu do seguinte modo: - a primeira expressão tri-dimensional do objeto, após sua idealização, definições de escalas, distâncias e quantidades de elementos, em desenhos manuais, a partir de requisitos de função e funcionamento, dos domínios da arquitetura e engenharia; aconteceu no modelo conceitual, Figura 2, com a estrutura suporte em barras de fibra de vidro e a membrana em nylon. Seguiu-se o traçado de uma estrutura suporte através do software AutoCAD, acoplado ao software *MPanel* para traçado de membranas. A estrutura suporte foi traçada no AutoCAD e representada por Polylines 3D. Foram buscadas várias modelagens da membrana, que pudessem ser capazes de permitir a reprodução física da forma digital, com um número mínimo de moldes. A interação modelo físico ↔ modelo digital está mostrada na Figura 11 em ordem cronológica. Diferentes papéis foram experimentados, até se suspeitar que a incompatibilidade das geometrias digital e física não era devida aos materiais utilizados nem à pequena escala dos modelos físicos, embora também contribuíssem para o desajuste dos dois modelos. Neste ponto entrou em cena o modelo 5, Figura 11. Neste, estudos qualitativos de moldes, traçados com giz sobre uma malha tensionada sobre um suporte de madeira, orientaram a modelagem que conduziu ao traçado final adotado, modelo 6, que foi reproduzido na escala 1:6 em papel vegetal.

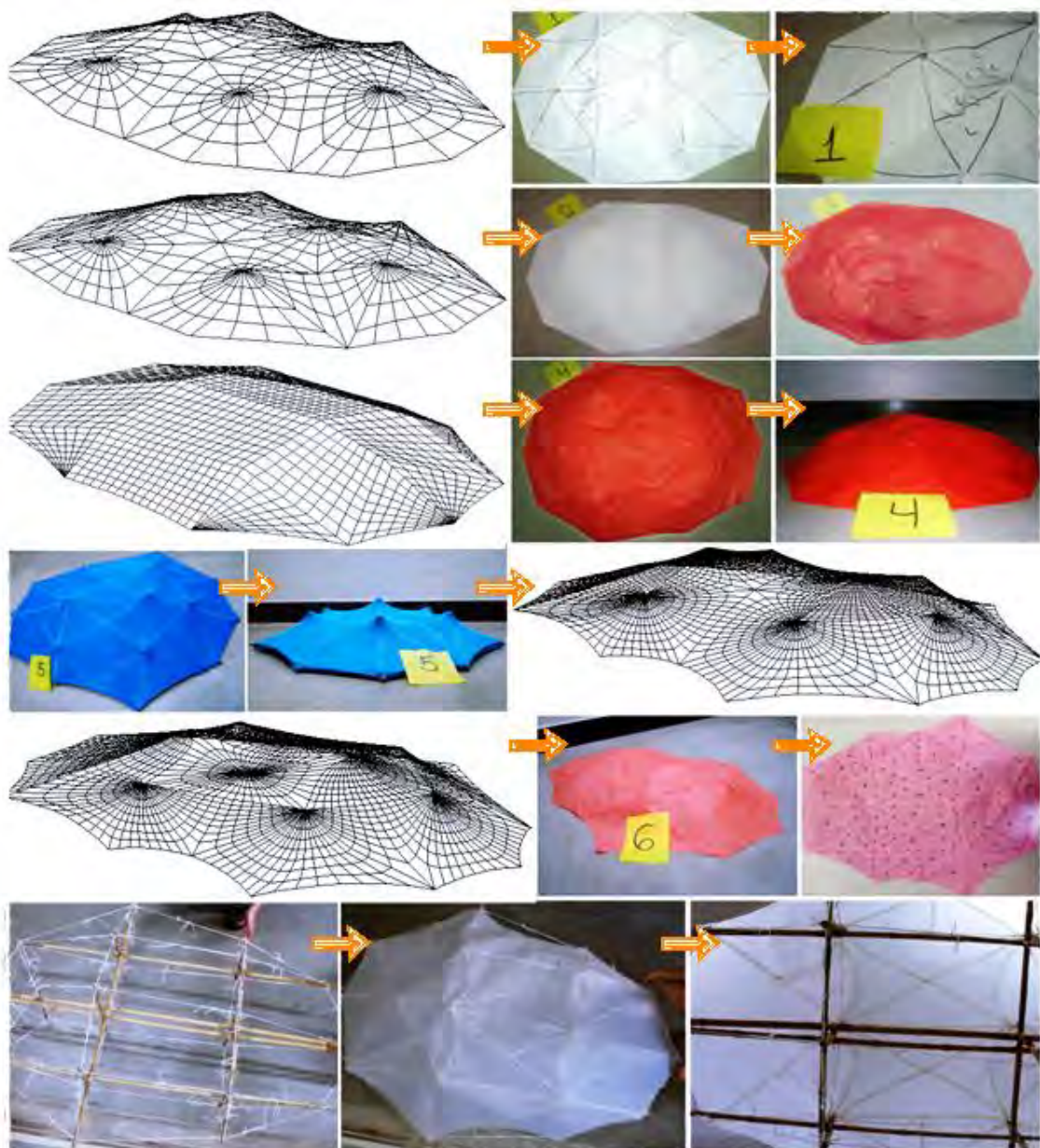


Figura 11: Elementos form-finding em sequência cronológica

Supondo-se apoios fixos, calculou-se o campo de tensões de membrana com o software *MPanel FEA*, que utiliza o método dos elementos finitos, para grandes deslocamentos e grandes deformações. Considerou-se que o material da membrana seria isotrópico e que o pré-tensionamento ao longo da urdidura e da trama seria o mesmo, relativa a um alongamento de 1% na malha da membrana. A tensão nos cabos da estrutura em que a membrana de contorno é fixa foi arbitrada como o dobro da tensão da malha. No caso da membrana, foram considerados os coeficientes aerodinâmicos + 1 e - 1. Neste caso, como foi dada uma pré-tensão à membrana, o objetivo foi exatamente comparar os estados de tensões resultantes das superposições dos efeitos nos dois casos. Nas figuras 12 a 16 têm-se os resultados de tensões principais σ_{11} e σ_{22} e deslocamentos *Disp* em metros *M*, para as duas condições consideradas. Dividindo-se as tensões dadas em *kN/m* pela espessura efetiva da membrana, *t*, tem-se a tensão em *MPa*. Por exemplo, se a espessura for de 1 *mm*, a tensão máxima seria de 26 *MPa*, concentrada nos suportes. Com estes resultados pode-se facilmente dimensionar os reforços exigidos para estas regiões de concentração de tensões, de acordo com o material utilizado na membrana. Fora destes pontos, as tensões

são relativamente baixas, sendo também utilizadas para dimensionar as zonas de costuras ou soldagens dos moldes. Na realidade, nesta primeira fase da investigação, estrutura e membrana foram analisados separadamente.

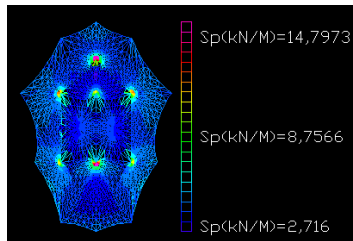


Figura 12: σ_{11} (+1)

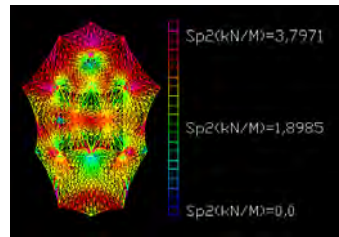


Figura 13: σ_{22} (+1)

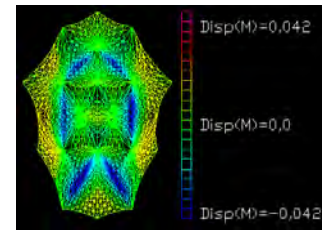


Figura 14: desloc. Verticais (+1)

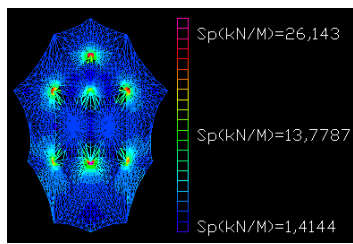


Figura 15: σ_{11} (-1)

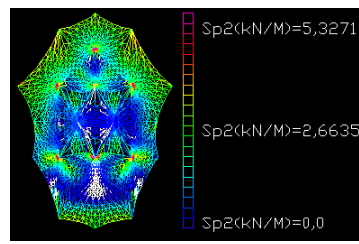


Figura 16: σ_{22} (-1)

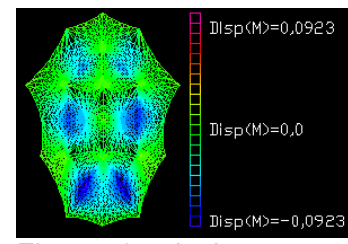


Figura 17: desloc. Verticais (-1)

CONCLUSÃO

Os procedimentos form-finding, baseados em experimentos físicos de conquista da forma, têm na realidade um alcance bem maior do que se poderia associar à primeira vista, ou seja, à estética final obtida quando se descreve uma superfície no espaço, através de uma membrana e sistemas de tracionamento e suporte. O form-finding, na realidade, encontra-se em cada detalhe do objeto e suas interações internas e externas; que seriam janelas form-finding que vão se abrindo à medida que nossa atenção se volta aos detalhes do objeto. Por exemplo, teríamos o form-finding dos tubos de bambu nervurados, o form-finding das amarrações dos elementos, o form-finding da proteção dos bambus contra intempéries e assim por diante.

Todas essas buscas, como já dito, são orientadas por princípios físicos, químicos e geométricos e atendem ao apelo do melhor funcionamento interno entre os componentes do objeto e o melhor funcionamento do objeto no seu meio de inserção. A extensão do empreendimento, frente à riqueza de produtos industriais disponíveis – tecidos, adesivos, linhas, cordas, pregos, parafusos, plásticos e dezenas de outros – e materiais naturais facilmente transformáveis e adaptáveis às necessidades atuais – bambu; madeira; fibras de coco, sisal, bananeira, piaçava, juta; dentre tantas outras e às muitas diferentes técnicas de fabricação – industrial; semi-industrial e artesanal; faz do form-finding uma atividade de pesquisa específica, que requer um laboratório específico, para acontecer juntamente com o desenvolvimento dos procedimentos form-finding, que aparentemente simples, não têm uma apropriação trivial por parte do praticante.

Quanto mais sistêmico for o funcionamento do objeto e quanto mais leve ele se tornar, quanto mais essencial se tornar a sua forma, eliminando-se excessos dentro do princípio da redução de massa; mais complexa torna-se a sua análise teórica e experimental no domínio da Engenharia de Estruturas. Ou seja, a excelência das análises de uma tensoestrutura como a que foi desenvolvida e apresentada neste artigo, será sempre uma atividade a posteriori ao objeto gerado.

Experimentos com modelos reduzidos em túneis de vento são fundamentais para uma justa modelagem aerodinâmica. Testes do protótipo e elementos isolados deverão ser efetuados juntamente com análise numérica dinâmica não linear, que deverá integrar o funcionamento da membrana à estrutura de sustentação. Além disso, o funcionamento das ligações amarradas, relaxação dos cabos e fluência do bambu em flexão e flexo-compressão, devidamente computados, conduzem ao melhor entendimento do objeto e de seu funcionamento, conduzindo a uma redução dos coeficientes de segurança e portanto a uma maior economia para o produto final.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao MCT/CT Agro pelo financiamento da pesquisa através do CNPq, processo CT Agro 574.694 2008-0. Nossos agradecimentos extensivos aos bolsistas CNPq Thiago de Faria Borges, Priscilla Dutra Dias, Matheus Andreazzi Fonseca, Gabriel Vasconcellos Ribas e Erick da Cunha Côrtes, pela investigação de técnicas e realização dos modelos construtivos e protótipo da estrutura suporte de bambus e cabos. Nossos agradecimentos também à *Meliar Design*, pela gentileza em ceder o software *Mpanel* para nossos estudos acadêmicos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Otto, F. et al. [1]; **Lightweight Construction Natural Design** – Frei Otto Complete Works ; Birkhäuser Verlag AG Basel Boston Berlin; Germany; 2009.

Moreira, L.E. [2]; **Jogo das Formas** – Ontogênese e Design do Objeto; Relatório de Pós-Doutorado; PUC – Rio; Rio de Janeiro, RJ; 2008.

Liese, W. [3]; **The anatomy of Bamboo Culms**; INBAR – International Network for Bamboo and Rattan; Beijing, People’s Republic of China; 1998.

Moreira, L.E e Melo, B.S. [4]; **Design and Mechanical Test of Bamboo Masts**; Proceedings of the 11th International Conference on Non Conventional Materials and Technologies; Bath; UK; 2009.

Moreira, L.E. et al. [5]; **Técnicas de Constituição de Objetos Tecnológicos e sua aplicação à geração de um Domus de Bambu Tensegrity**; Proceedings of the III - NOCMAT (III International Congress on Non Conventional Materials and Technologies); João Pessoa, Paraíba, PB; 2003.

Moreira, L.E. e Caliman, F. [6]; **Engineering Design of Aerial Coverings with self-stressed structures of Bamboos and Cables**; proceedings of the X NOCMAT – X Congress on Non Conventional Materials and Technologies – ; Cairo; Egito; 2010.

ABNT [7]; **Forças devidas ao Vento em Edificações**; Associação Brasileira de Normas Técnicas; 1988.