

ESTRUTURAS *TENSIGRID* DE BAMBU COM CABOS DE AÇO

Alunos: Felipe Vicente e Thiago José D. Fortes
Orientador: Khosrow Ghavami

Introdução

No desenvolvimento das estruturas ao longo do tempo, verifica-se que o aumento da eficiência das mesmas só foi possível com o domínio das técnicas de construir, com o descobrimento de novos materiais e com o surgimento de novos sistemas estruturais. “Se a análise se detiver nos períodos de maior uso de um determinado material, constatar-se-á que à medida que se adquire o conhecimento, qualitativo e quantitativo, da resistência desse material, constroem-se estruturas mais altas e esbeltas” (1). A busca pela utilização de novos materiais se faz importante na engenharia civil na solução de problemas ambientais. Um novo material pode substituir materiais já usados em um determinado sistema construtivo, ou pode identificar-se como material mais usado em um novo sistema estrutural. Por exemplo, o descobrimento dos metais como material de construção possibilitou não somente a construção de estruturas de aço, como a utilização do aço no concreto armado e, posteriormente, com a melhora da qualidade do aço, ocorreu a efetivação do concreto protendido como um novo sistema construtivo (1). Daí vem a importância de se propor estudar os materiais não-convencionais, que já foram materiais muito utilizados por engenheiros e arquitetos, nos seus tempos e países, como material convencional de construção e que hoje estão excluídos por razão da industrialização e de um sistema monopolizado e não-ecológico. Todos esses processos produtivos podem ser empregados também a esses novos materiais que além de serem ecologicamente corretos, têm demonstrado resultados comparáveis aos industrializados.

Por isso, às vezes é difícil separar a utilização de novos materiais do desenvolvimento de novos sistemas estruturais, pois “manifestações relevantes requerem materiais, técnicas de construção e teorias sofisticadas, disponíveis desde há apenas um século – ou mesmo desde há poucas décadas, no caso dos materiais sintéticos, dos cabos de aço de alta resistência e das simulações computacionais necessárias ao projeto” como exprime Pauletti (1). Através do uso mais racional e ecológico dos materiais, aliados às melhorias nas técnicas de construir e aos estudos de novos materiais, buscam-se a maior leveza das estruturas. Nesse sentido, destacam-se os sistemas estruturais retesados, pois têm como características intrínsecas uma leveza e a capacidade de vencer vãos, distinguindo-se pela simplicidade dos seus elementos estruturais e pela rapidez de montagem (1). Essas estruturas são também conhecidas como tensoestruturas, que têm rigidez dependente, basicamente, do estado de tensão.

A partir deste contexto, foi realizada a análise e a fabricação de uma tensoestrutura, que se baseasse no sistema *tensigríd* ou tensegrity, de bambu e cabos de aço, que serviu de modelo para observação do seu comportamento estrutural. Esta observação é importante, pois os mesmos estudos feitos no modelo podem ser aplicados a uma estrutura similar de maiores dimensões. Este trabalho dá continuidade ao programa de pesquisas de Materiais Não-Convencionais com utilização na construção civil, que vem sendo desenvolvido desde 1979 pelo Departamento de Engenharia Civil da PUC-Rio sob orientação do professor Khosrow Ghavami.

Definições

As **estruturas *tensigríd*** são classificadas como estruturas retesadas, pois são estruturas cuja existência depende da aplicação de um campo equilibrado de tensões, existindo uma clara dependência entre a geometria assumida e a protensão aplicada, onde a forma inicial da estrutura é obtida em uma etapa conhecida por “busca de forma”. São estruturas reticuladas, articuladas, formadas por elementos submetidos à tração (cabos) e à compressão (barras) ou, mais precisamente, flexo-compressão. Por essas características, elas constituem, também, um subgrupo dos sistemas espaciais reticulados (1).

Richard Buckminster Fuller o descreve como “princípio estrutural em que a forma da estrutura é garantida pela interação entre uma rede contínua de cabos tracionados e um conjunto de elementos comprimidos” (3). Esses sistemas são “estruturas espaciais reticuladas compostas por membros retificados, barras e cabos que definem um volume estável no espaço por efeito do equilíbrio entre tração e compressão”, explica Motro (6). Segundo ele, estruturas *tensigríd* caracterizam-se por serem: a) compostas por elementos comprimidos (barras) e tracionados (cabos); b) estruturas articuladas; e c) auto-equilibradas. Em outro trabalho, elabora uma nova definição que busca agrupar todas as tendências: “um sistema tensegrity é um sistema de um estado retesado estável, que compreende um conjunto descontínuo de componentes comprimidos dentro de uma série de elementos tracionados” (7).

Outras definições podem ser encontradas na literatura. Elas podem ser resumidas em uma definição restrita, que considera apenas as redes de cabos retesadas auto-equilibradas nas quais se incluem barras rígidas comprimidas e isoladas entre si, e uma definição mais abrangente, na qual são consideradas também as estruturas que transferem cargas de retesamento a um sistema de apoios, não sendo auto-equilibradas e isoladas entre si.

O **bambu** é de interesse à Engenharia Civil, pois possui elevada resistência com relação ao peso e quando comparado a armaduras de aço em concreto, essa relação é maior (Tabela 1) (2). Sua constituição fibrosa permite que possa ser cortado tanto longitudinal como transversalmente e sua forma circular e seção oca fazem dele um material leve. Em quase todo o mundo, é de fácil disponibilidade, de rápido crescimento e de baixo custo (4). Também é um material ecológico, pois minimiza a poluição e o consumo de energia na construção civil. É uma solução para o esgotamento dos recursos naturais por ser um material renovável.

Material	Resistência à Tração σ (N/mm ²)	Peso Específico ν (N/mm ³ x 10 ⁻²)	$R = \frac{\sigma}{\nu} \times 10^2$	R/R _{aço}
Aço	500	7.83	0.63	1.00
Bambu	140	0.80	1.75	2.77
Alumínio	304	2.70	1.13	1.79
Ferro Fundido	281	7.20	0.39	0.62

Tabela 1 – Relação entre a resistência à tração e o peso específico de alguns materiais.

Cabe ressaltar que as desvantagens no uso do bambu em estruturas rígidas são devidas a falta de estudos técnico-científicos, pois os materiais hoje industrializados também possuem desvantagens próprias assim como o bambu. Isto se deve também pelo fato do bambu ser abundante em países tropicais, que em sua maioria são países em desenvolvimento e que não dão a devida importância ao estudo destes materiais menos agressivos e que consomem menos energia. Essas desvantagens podem ser citadas: ele não tem uma geometria espacial regular, pois não possui um mesmo diâmetro em todo o seu comprimento, a espessura de sua parede também é inconstante. Possui tendência a rachar, é altamente combustível quando seco e não resiste à variação de umidade permanente. Neste sentido, impõe-se uma série de cuidados para obter uma maior durabilidade e resistência. Estes cuidados são os tratamentos

de conservação, que são praticados desde o corte até a utilização final, tais como: corte segundo a idade e grau de maturidade, cura, secagem e tratamentos preservativos contra fungos e insetos (4).

Objetivos

Realizar uma revisão bibliográfica da utilização de materiais não-convencionais na construção civil, em especial do bambu, e aplicá-la como solução para estruturas.

Utilizar este material como substituto de materiais não-renováveis.

Construir uma estrutura *tensigrid* que utilize materiais não-convencionais e analisar o comportamento estático desta estrutura, utilizando métodos numéricos e computacionais.

Metodologia

Para estudar o comportamento de uma estrutura *tensigrid* foi construído um modelo reduzido baseando-se nesta técnica. Destaca-se que a estrutura estudada possui algumas características das estruturas *tensigrid*, baseando-se no sentido geral das tensoestruturas. O modelo é composto por quatro andares representados por placas de vidros sustentadas por cabos de aço e tem sua estrutura principal formada por bambus.

O modelo foi projetado com dois pés principais de bambu tendo, em cada um deles, um suporte aparafusado com inclinação de 45° em relação ao piso, que caracterizam dois pés adicionais. Para o equilíbrio destes quatro pés foram colocados cabos de aço interligando cada par, formando um triângulo. Assim, os diferentes cabos presentes na estante têm funções estruturais distintas: dois deles têm como principal função a sustentação dos vidros e os outros dois, que interligam os pés, visam ao equilíbrio estrutural do modelo.

Foi feita a análise geométrica da estrutura e observou-se que a projeção do centro de massa no plano bidimensional de sua base não sairia de um retângulo. O retângulo em questão tem como vértices os quatro pés do modelo. Portanto foi possível a sua auto-sustentação, pois o seu peso adicionado aos eventuais carregamentos nos andares não comprometeria seu equilíbrio. Para conectar as duas colunas foram instaladas três hastes horizontais, sendo uma de bambu e duas de alumínio. Nas ligações entre bambus foi utilizado um sistema de encaixe e uma massa constituída de polpa de bambu e cola. Nas ligações entre o alumínio e o bambu foram utilizados parafusos, porcas e arruelas.

Durante o desenvolvimento do projeto foi diagnosticada a necessidade de colocação de um sistema de contraventamento numa das faces da estrutura. Este sistema tem como finalidade diminuir o número de deslocabilidades dos nós da estrutura aumentando a rigidez transversal gerando uma estabilidade global. “Pode-se obter um quadro contraventado combinando uma estrutura em quadro rotulado ou rígido com uma treliça vertical, aumentando assim a rigidez da mesma. O projeto pode ser feito de modo que pelo quadro sejam absorvidas as cargas verticais e pelas treliças verticais formadas pelos contraventamentos as seções do vento ou sísmicas. Este sistema torna a estrutura mais econômica” (8).

Realizou-se uma análise vetorial da estrutura através de um programa computacional denominado “*Ftool*”. Foi avaliado o peso próprio do modelo e então verificado o comportamento do bambu e dos cabos na sustentação da estrutura (Figura 1-4).

O tratamento preservativo realizado na estrutura se resumiu à aplicação de substâncias químicas que impedem o ataque de fungos e insetos. Os produtos utilizados para esta finalidade podem ser óleos, substâncias hidrossolúveis ou resinas sintéticas.

A estrutura se caracterizou principalmente pela sua esbelteza e auto-sustentação.

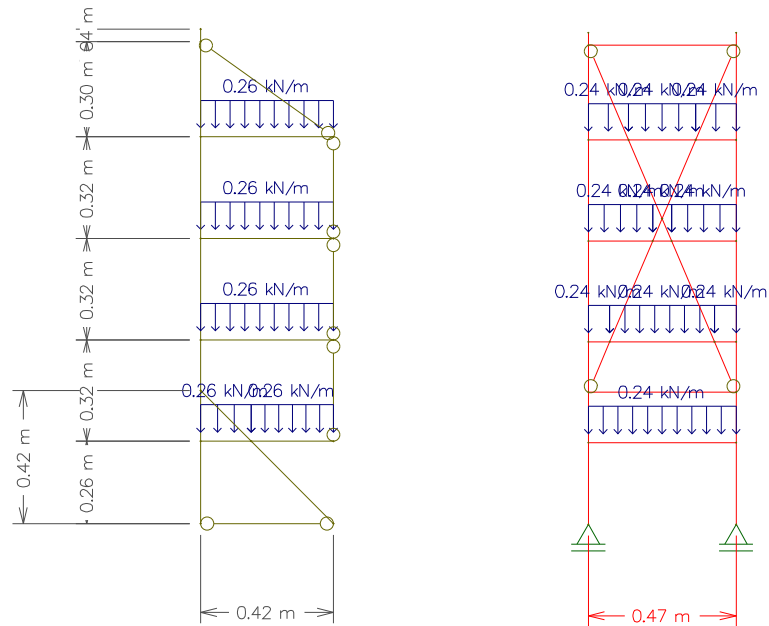


Fig. 1 - Modelo estrutural implementado no "Ftool". Vista lateral e frontal do modelo.

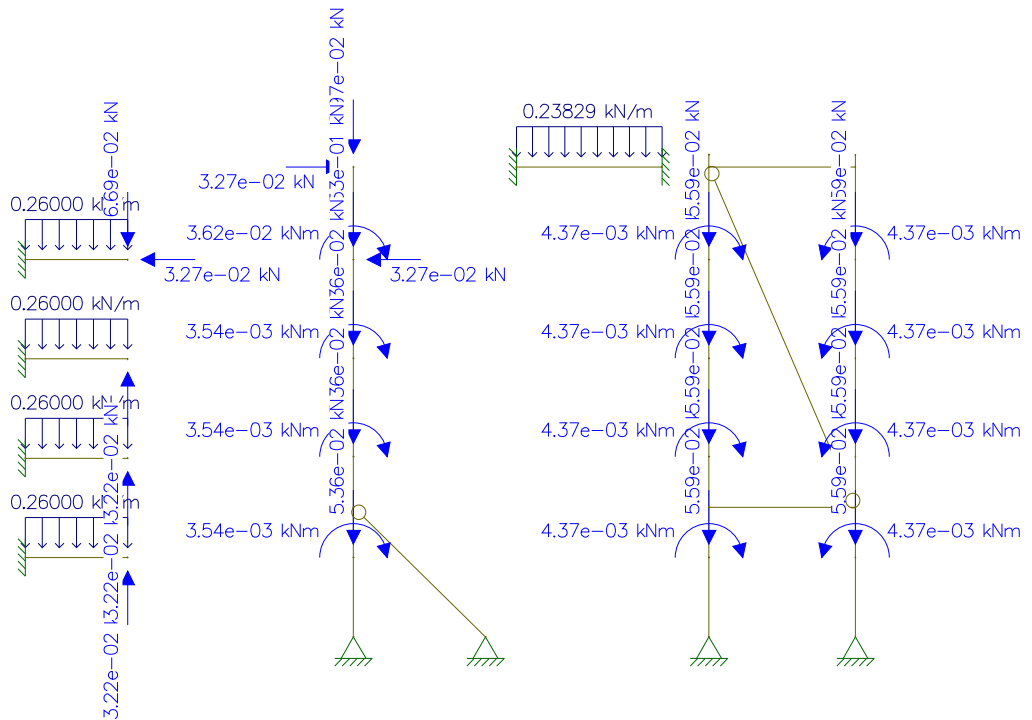


Fig. 2 - Reações da estrutura causadas pelos carregamentos nos andares.

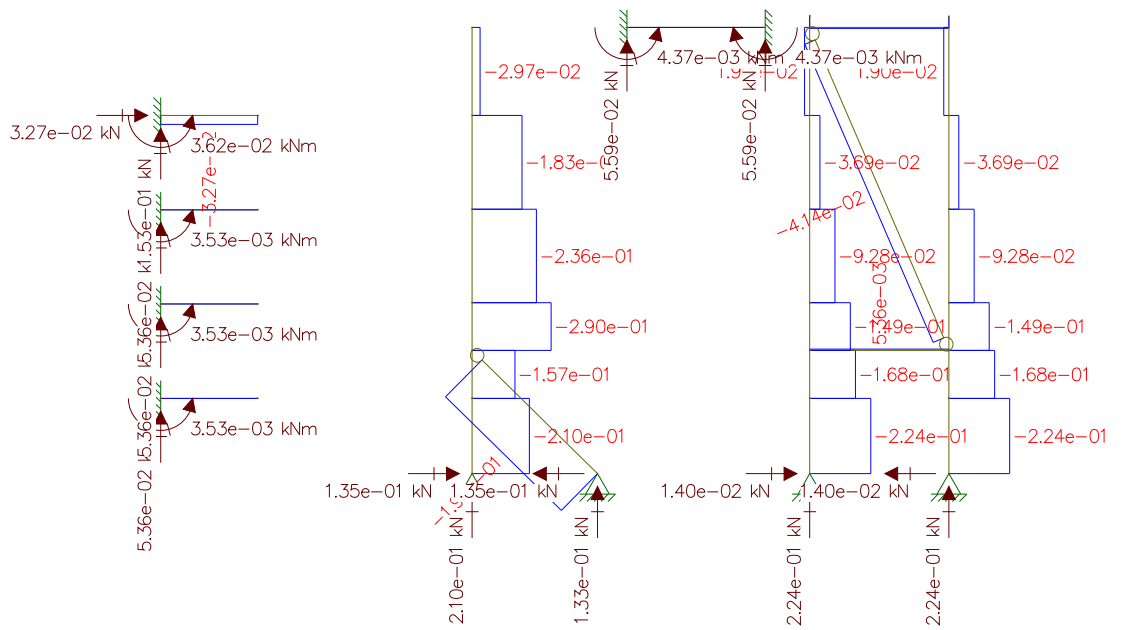


Fig. 3 – Diagrama de esforço normal.

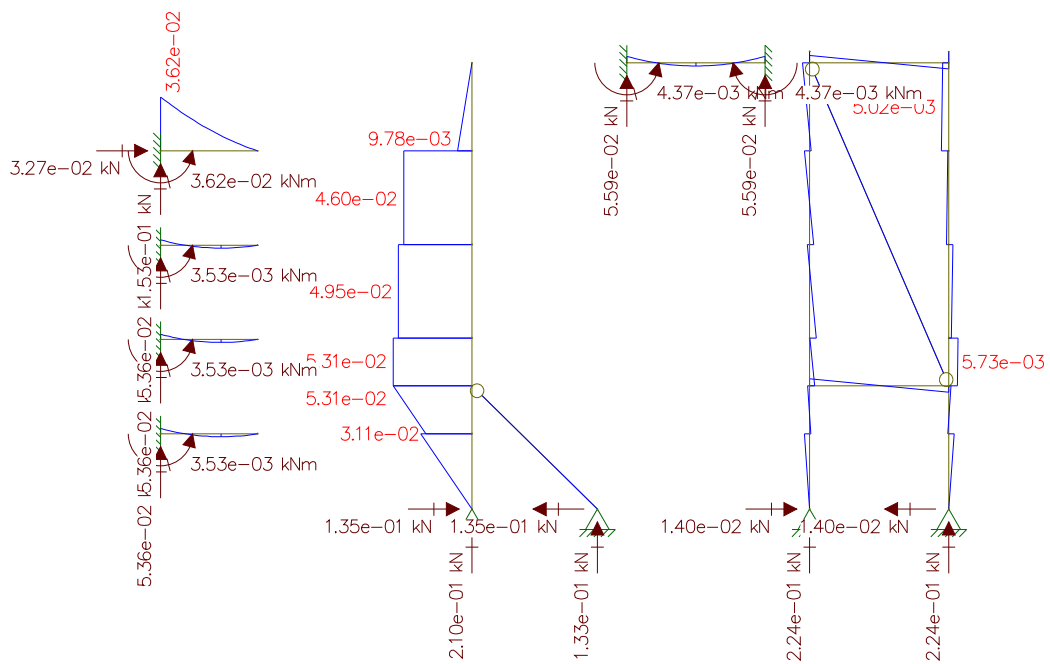


Fig. 4 – Diagrama de momento fletor.

Algumas estruturas *tensigríd* famosas:

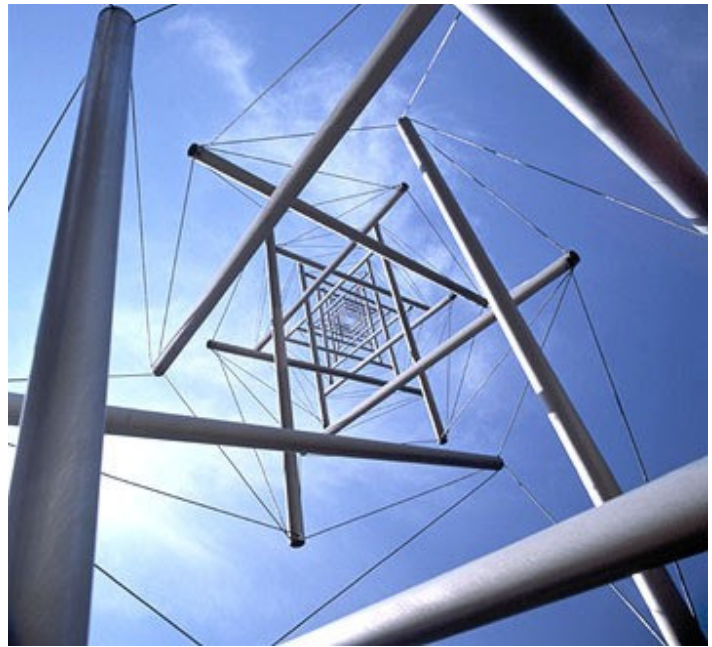
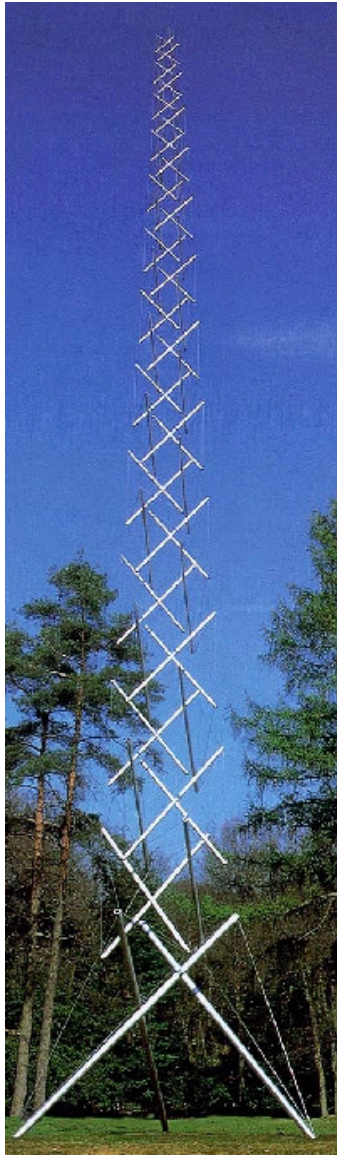


Fig. 5 e 6 – *Needle Tower*: Construída em 1968 por Kenneth Snelson, é uma das primeiras esculturas concebida com conceitos *tensigríd*.
<http://www.kennethsnelson.net/> (16/08/2007).



Fig. 7 – *Geórgia Dome*: Construído em 1992 para os Jogos Olímpicos de Atlanta 1996. Sua cobertura combina uma estrutura metálica tensegrity com painéis hiperbólicos de membranas.
<http://www.pbs.org/> (16/08/2007).

Modelo fabricado:



Fig. 8 e 9 – Modelo estrutural *tensigrity* de bambu com cabos de aço. Tensoestrutura.

Conclusões

Com a pesquisa realizada neste trabalho, foi possível aprender a importância e a viabilidade do uso de matérias não-convencionais usando princípios técnico-científicos de materiais não-renováveis. O bambu se mostrou um material eficaz, inclusive quando aliado às estruturas *tensigrity*, desde que seja utilizado e conservado de maneiras adequadas, podendo assim ser resistente e durável.

Na análise vetorial do modelo, pôde-se caracterizá-lo como uma tensoestrutura, pois as barras de bambu estão trabalhando em compressão e os cabos de aço estão trabalhando tracionados. Além disso, as barras também trabalham a flexão obedecendo a um caso particular do sistema *tensigrity*. (1)

Propõe-se, para trabalhos futuros, uma análise estrutural com base nas resistências das diferentes espécies de bambu e dos materiais do modelo, e o aprofundamento no estudo da fabricação de estruturas *tensigrity*. É de grande importância que os engenheiros busquem aprimorar suas técnicas e conhecimentos de novos métodos construtivos dentro de um desenvolvimento sustentável.

Referências

1 – DEIFELD, T. E. C. **Sobre a Análise e os Processos Construtivos das Estruturas Tensegrity**. São Paulo, 2005. 110p. Tese de Doutorado – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

2 – GHAVAMI, K. Bambu: um material alternativo na engenharia. **Engenharia**, v. 492, n. 0, p. 23-27, 1992.

3 – MICHALE, J. **R. Buckmisnter Fuller**. 1. ed. Cidade do México: Editorial Hermes S.A., 1962. 347p.

4 – CULZONI, R. A. M. **Características dos bambus e sua utilização como material alternativo ao concreto**. Rio de Janeiro, 1986. 134p. Tese de Mestrado - Departamento de Engenharia Civil, PUC-Rio.

5 – ENGEL, H. **Sistemas de estructuras**. 2. ed. Barcelona: Editorial Gustavo Gili, 2002. 351p.

6 – MOTRO, R. **Form finding numerical methods for tensegrity systems**. Spatial, Lattice and tension structures – proceeding of the IASS-ASCE International Symposium 1994, pp. 704-713. Nova Iorque, 1994.

7 – MOTRO, R. **Foldable Tensegrities**. 1. ed. Nova Iorque: CISM Springer Wien New York, 2001. 237p.

8 – BELLEI, I. **Edifício de múltiplos andares em aço**. 1. ed. São Paulo: Pini, 2004. 387p.