

## ASSOCIAÇÕES ENTRE UM DOMUS TENSEGRITY E TENSOESTRUTURAS

von Krüger, Paulo Gustavo – Prof. Adjunto do Departamento de Tecnologia da Arquitetura e Urbanismo - Escola de Arquitetura – UFMG – Belo Horizonte, MG, Brasil.

Rodrigues, Francisco Carlos - Prof. Associado do Departamento de Engenharia de Estruturas – Escola de Engenharia - UFMG - Belo Horizonte, MG, Brasil.

Moreira, Luís Eustáquio – Prof. Adjunto do Departamento de Engenharia de Estruturas - Escola de Engenharia – UFMG – Belo Horizonte, MG, Brasil.

Greco, Marcelo – Prof. Adjunto do Departamento de Engenharia de Estruturas - Escola de Engenharia – UFMG – Belo Horizonte, MG, Brasil.

### 1- INTRODUÇÃO

O conceito mais utilizado para definir uma estrutura *Tensegrity*, cuja melhor tradução seria Tração Integrada, consiste em um volume no espaço construído a partir de um campo contínuo de tração dos cabos e um campo descontínuo de compressão das barras.

Tanto a tração como a flexo-compressão trabalham co-relacionadas, ou seja, os cabos não estão trabalhando à tração se as barras não estiverem sendo solicitadas à flexo-compressão, e vice e versa.

Três autores são considerados os inventores do *Tensegrity*: Richard Buckminster Fuller, David Georges Emmerich e Kenneth D. Snelson (Jáuregui 2004). A ordem dos nomes aqui mencionados está em função das datas das concessões das patentes referidas às estruturas *Tensegrity*, sendo 1962, 1964 e 1965 respectivamente (Jáuregui 2004).

Diante de diversas controvérsias quanto ao verdadeiro inventor do referido sistema, talvez a versão mais aceita seja que este sistema estrutural foi proposto inicialmente pelo escultor Kenneth Snelson, quando ainda era estudante na *Black Mountain College*. Na mesma época (verão de 1948), Buckminster Fuller tornou-se o novo professor da referida instituição e, durante uma de suas palestras, Snelson, influenciado pelos modelos geométricos de Fuller, decidiu iniciar seus estudos sobre modelos tridimensionais (Jáuregui 2004).

Entretanto, foi Fuller quem criou a palavra *tensegrity* através da contração de duas outras: *tension* e *integrity*. Apesar do próprio Snelson preferir o termo “Floating Compression” (Snelson, 2005), a palavra cunhada e difundida por Fuller passou a ser aceita para definir o conceito de um sistema de interação entre um campo descontínuo de barras, que trabalham à flexo-compressão, e um campo contínuo de cabos, que trabalham à tração, criando assim um volume estável no espaço.

O grande diferencial desta estrutura é a substituição dos nós, que são vínculos articulados fixos, por vértices formados pelo conjunto de três ou mais vínculos articulados móveis (Figura 1).

A flexibilidade formal deste tipo de vértice permite que diferentes propriedades estruturais sejam estudadas em função dos diversos posicionamentos das barras, a partir do deslizamento destas nos cabos.

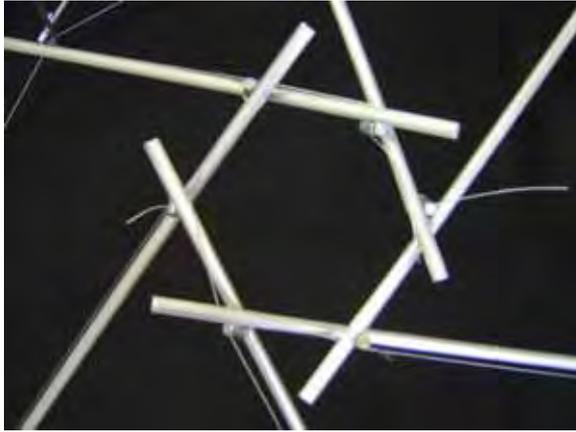


Figura 1 - Vértice formado pelo conjunto de seis vínculos articulados móveis

## 2- CÚPULAS GEODÉSICAS

A primeira geodésica que se tem notícia foi projetada pelo cientista alemão e chefe de design da indústria ótica Zeiss, Walter Bauersfeld (Figuras 2 e 3) em 1922, na cidade de Jena, Alemanha. Este domo foi construído para ser um planetário e sua estrutura em aço foi a armação da casca composta por cimento (Lotufo & Lopes s.d.), estrutura que teve seu uso consolidado graças a Buckminster Fuller, que metodificou os conceitos, as dimensões e a forma de construção das geodésicas.



Figura 2 – Construção do domo por Walter Bauersfeld (Rothman 1989).

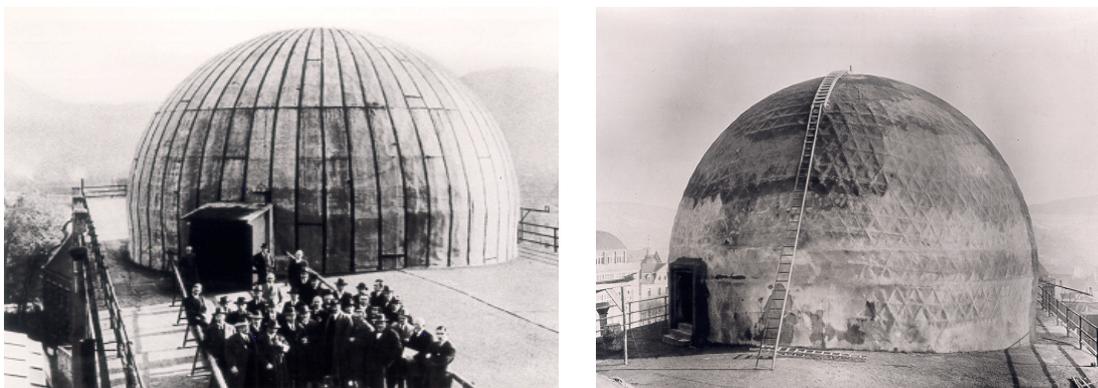


Figura 3 – Domo de Walter Bauersfeld concluído (Rothman 1989).

É dele o projeto do macro domo norte-americano (Figura 4). Esta estrutura, que teve a função de pavilhão na Exposição Internacional de Montreal, ocorrida em 1967, tem como dimensões 76 metros de diâmetro, altura máxima de 61 metros e superfície média de 14.000 metros quadrados. Foi construída com 24.000 barras, totalizando 600 toneladas de tubos, ou seja, o equivalente a  $40 \text{ kg/m}^2$  (Lotufo & Lopes s.d.).



Figura 4 – Domo para a Exposição Internacional de Montreal, 1967 (Greatbuildings 1994-2004).

### 3- DESENVOLVIMENTO DA CÚPULA GEODÉSICA *TENSEGRITY*

Proposto inicialmente para geração de esculturas, as conexões do domus *Tensegrity* foram posteriormente utilizadas como modelo para explicar ligações atômicas em nanoestruturas poliméricas, em forma de troncoicosaedro, Figura 5, denominadas “Buckball, fullereno ou nanobolas” (Medeiros 2004).

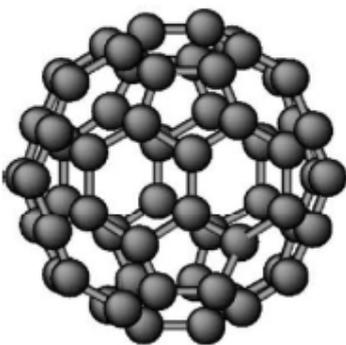


Figura 5 – Nanoestrutura em forma de troncoicosaedro (Franco 2001).

A superfície geométrica adotada para o Domus *Tensegrity* é o icosaedro (Figura 6). O icosaedro é um poliedro regular formado somente por triângulos, possuindo 20 faces, 12 vértices e 30 arestas. Entretanto, determinados poliedros podem ser subdivididos, formando diversas freqüências.



Figura 6 – Icosaedro.

Freqüência é o número de segmentos no qual as arestas são subdivididas (Lotufo & Lopes s.d.). Assim, pode-se construir icosaedros de freqüências diversas (Figura 7), variando em função da dimensão do poliedro ou da imagem que se queira obter (maior proximidade com uma cúpula esférica, por exemplo). O icosaedro de freqüência um é denominado de poliedro principal, e é a partir dele que se determinam as diversas geodésicas.

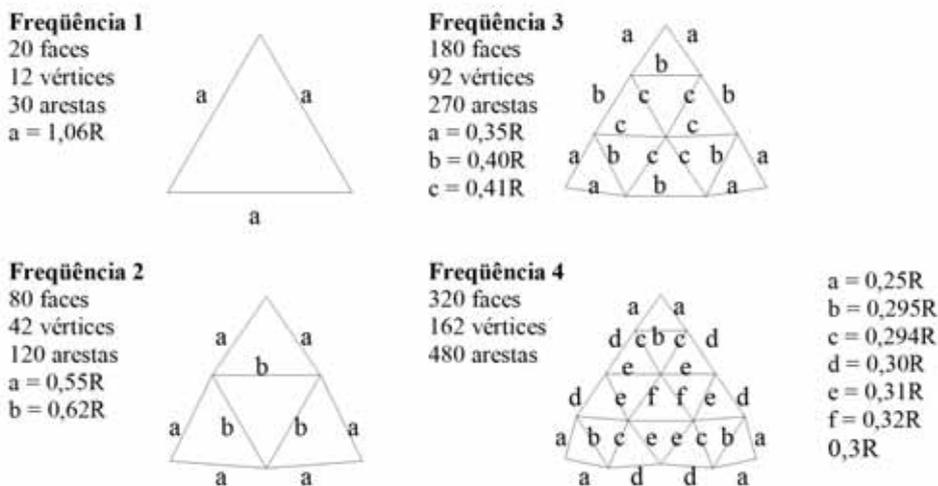


Figura 7 – Icosaedro de freqüências de 1 a 4 (Lotufo & Lopes s.d.).

O icosaedro foi escolhido por Buckminster Fuller como base para seus estudos sobre a geodésica e pode ser considerado o mais esférico dos poliedros regulares (Lotufo & Lopes s.d.).

Entretanto, a geodésica proposta por Buckminster Fuller possui barras que convergem em um ponto ou nó, que podem ser denominados de treliças geodésicas (Figura 8).



Figura 8 – Treliza geodésica

A Figura 8 representa um icosaedro de freqüência 2, cujos fatores de relação do raio são  $a = 0,55R$  e  $b = 0,62R$  (Figura 9). Caso fosse o icosaedro principal, existiria apenas a aresta  $a$ .

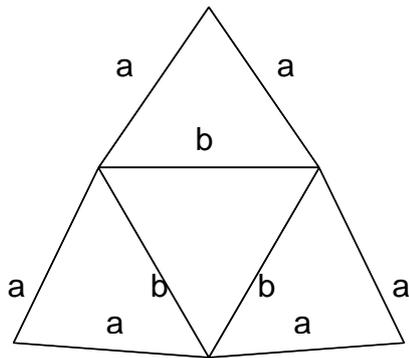


Figura 9 – Dimensionamento das barras a e b.

A Cúpula Geodésica *Tensegrity* apresentada neste trabalho é uma derivação deste icosaedro. No icosaedro de frequência dois, cinco ou seis barras convergem para um único ponto (ou nó), enquanto na Cúpula *Tensegrity* este mesmo nó torna-se uma estrutura nodal, como mostrado nas Figuras 1, 10 e 11. Na verdade, estas estruturas nodais formam planos que são as faces de um icosaedro de frequência dois truncado.



Figura 10 – Organização do Domus *Tensegrity*



Figura 11 – Estrutura nodal do Domus *Tensegrity* (Ripper et al 2004)

#### 4- APLICAÇÕES ARQUITETÔNICAS

A cúpula geodésica *Tensegrity* permite uso nas situações mais diversas, propiciando ainda que todos os seus componentes sejam passíveis de montagens e desmontagens sucessivas, o que facilita seu transporte.

Visando atender à demanda por espaços para eventos, mostras e shows, tal sistema possui flexibilidade dimensional e modulação compatível com o mercado, incluindo o uso de

acessórios disponíveis no mercado, além de poder ser empregado em eventos de médio porte (festas, bailes) e de grande porte (shows, amostras).

A seguir são relacionadas as diversas possibilidades de utilização da estrutura objeto de estudo deste trabalho:

- Estrutura para cobertura de stand e quiosque de venda (Figura 12), podendo ainda ser utilizado com mezanino, criando dois ambientes distintos dentro do espaço delimitado pela estrutura da cúpula (Figura 13);
- A estrutura como elemento estético delimitador de um determinado espaço que, montado dentro de áreas já cobertas, permitiria a sensação de espaço diferenciado apenas pela geodésica, sem o uso de divisórias ou outro tipo de artifício similar mais convencional;
- Criar uma área de meditação para o futuro morador de uma residência projetada por von Krüger (Figura 14);
- Estrutura de grandes vãos;
- Utilizando diversas geodésicas conjugadas que criam grandes espaços cobertos. Tem-se como exemplo a Figura 15, que conjuga diversas geodésicas de pequena dimensão, que servem como estrutura para a cobertura de uma grande área. Assim, cada geodésica teria a função de pilar e o espaçamento existente entre elas, coberto por uma membrana, criando um ambiente de dimensão que poderia variar em função de sua utilização.

No caso dos exemplos de espaços cobertos, pode ser utilizada como cobertura uma membrana tencionada. A membrana tencionada é composta por trama de poliéster (leve e flexível) ou de fibra de vidro matriz de material polimérico, tal como PVC e silicone, para proteção da superfície às intempéries, poluição atmosférica etc.

A cobertura pode ser exterior à estrutura (Figura 12) ou fixada internamente a esta, permitindo uma superfície cuja forma seja independente à cúpula geodésica *Tensegrity* (Figura 16).

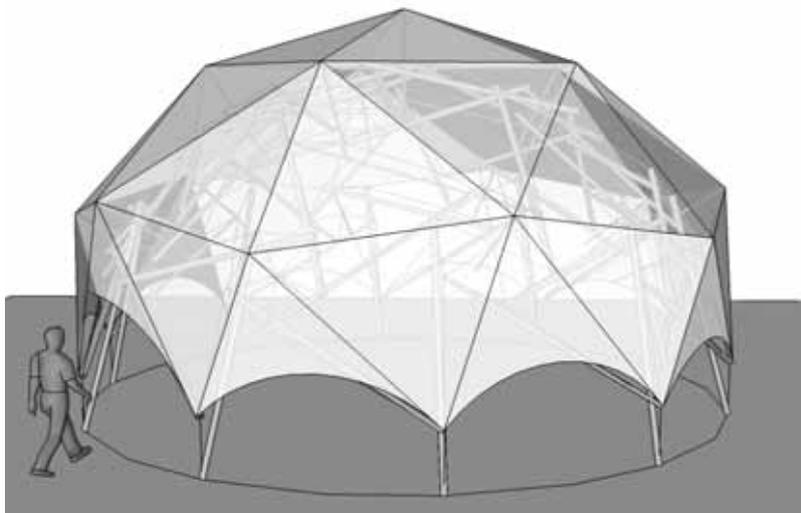


Figura 12 – Stand onde poderá ser utilizada a geodésica *Tensegrity* como estrutura para a cobertura.

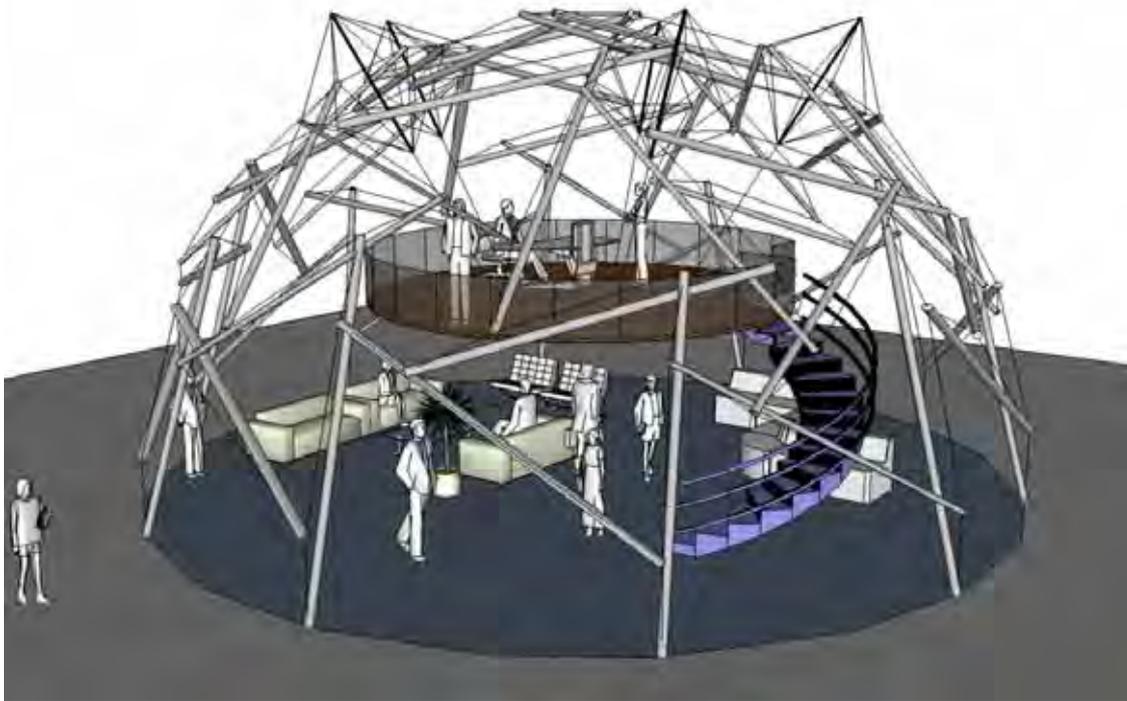


Figura 13 – Mezanino em uma cúpula (não foi representada a cobertura tensoestruturada).

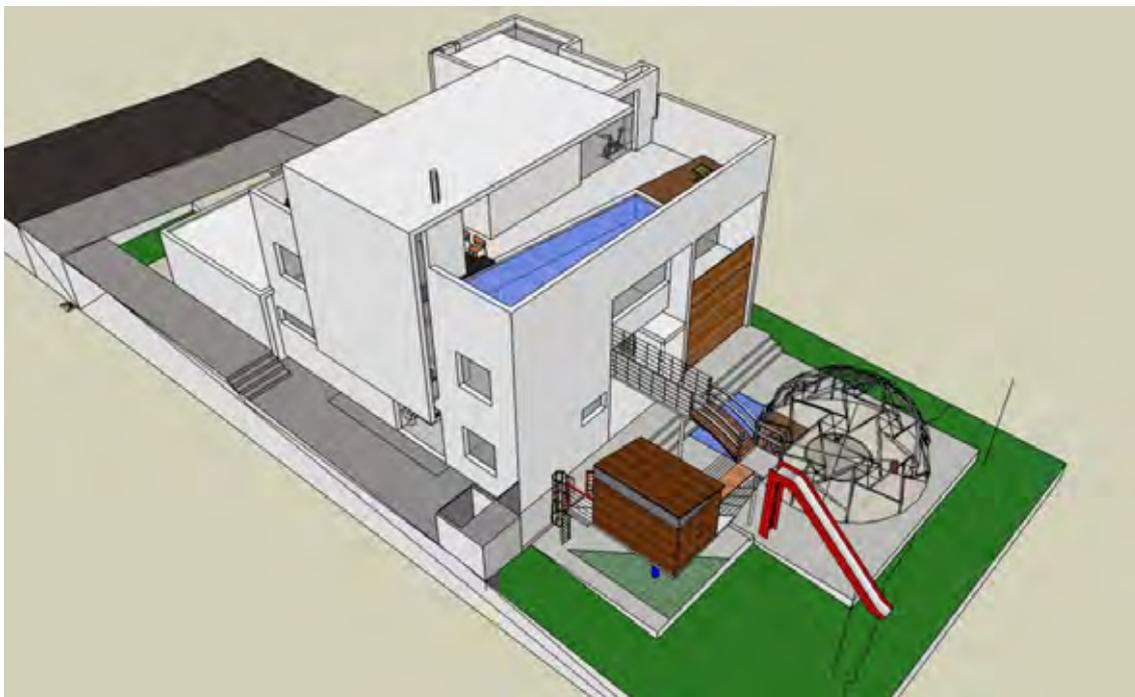


Figura 14 – Espaço de meditação para residência projetada von Krüger (não foi representada a cobertura tensoestruturada).

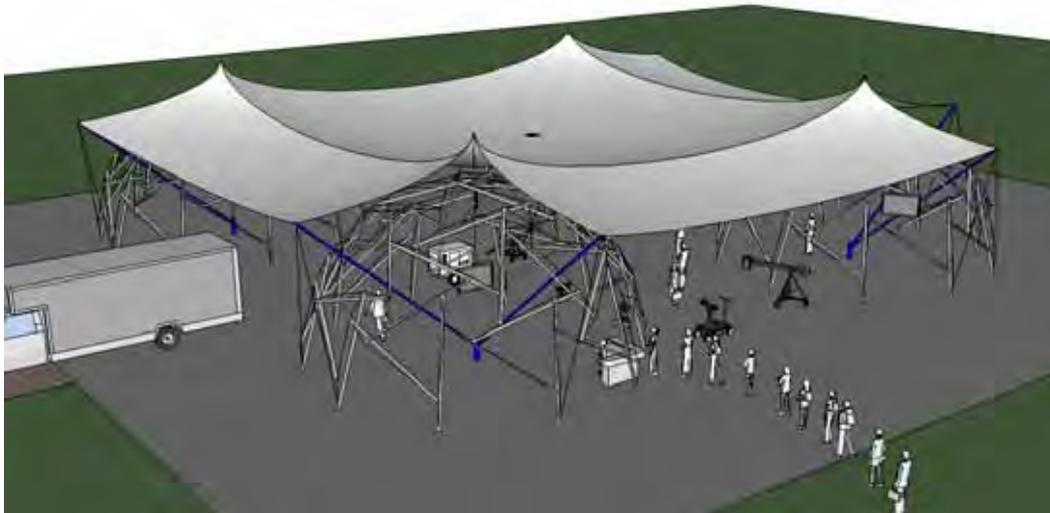


Figura 15 – Cúpulas funcionando como suporte das tendas delimitando espaços.



FIGURA 16 – Cobertura tensoestruturada interna à geodésica *Tensegrity*.

## 5- CONSIDERAÇÕES FINAIS

Por sua leveza e flexibilidade, a estrutura apresentada neste trabalho possibilita novas associações junto às membranas que compõem as tensoestruturas. Isto significa uma interação entre a tensoestrutura e a estrutura *Tensegrity*: as tensoestruturas como coberturas para a estrutura *Tensegrity*, e o *Tensegrity* como estrutura de esticamento das membranas; permitindo assim novas propostas de formas e de uso, aliadas a leveza e flexibilidade que caracterizam este tipo de sistema estrutural.

Este trabalho é o relato de uma etapa da tese de doutorado do Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas, do Departamento de Engenharia de Estruturas da UFMG e tem como contribuição não só pesquisar as características físicas das Cúpulas Geodésicas *Tensegrity*, mas também permitir o desenvolvimento de uma nova metodologia de pesquisa para a engenharia de estruturas por meio do uso de modelos durante o processo de criação de novos tipos e sistemas estruturais.

## 6- AGRADECIMENTOS

Nossos sinceros agradecimentos ao Professor José Luís Mendes Ripper e demais colegas do LILD, pela grande contribuição ao desenvolvimento dos primeiros domus *tensegrities* visando a aplicação na construção civil, bem como pelas aplicações arquitetônicas sugeridas neste trabalho.

## 7- REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

Franco, C. V. 2001. **Cientistas Transformam o Plástico em Supercondutores**. Disponível em:

<<http://www.qmc.ufsc.br/~franco/Supermateriais/plasticossupercondutores.pdf>>. Acessado em: 15 nov. 2004.

Greatbuildings 1994-2004. Produced by Kevin Matthews and [Artifice, Inc.](http://www.artifice.com) Disponível em: <[http://GreatBuildings.com/buildings/US\\_Pavilion\\_at\\_Expo\\_67.html](http://GreatBuildings.com/buildings/US_Pavilion_at_Expo_67.html)> Acessado em: 15 nov. 2004.

Jáuregui, V. G. 2004. **Tensegrity Structures and their Application to Architecture**. Belfast: Queen's University, School of Architecture. Dissertação de mestrado. Disponível em: <[http://www.alumnos.unican.es/uc1279/table\\_of\\_contents.htm](http://www.alumnos.unican.es/uc1279/table_of_contents.htm)>. Acessado em: 13 set. 2005.

Lotufo, V. A. & Lopes, J. M. A. s.d. **Geodésicas & Cia**. São Paulo: Projeto Editores Associados.

Medeiros, M. A. 2004. **Fulerenos**. Disponível em: <<http://www.quiprocura.he.com.br/fulerenos>>. Acessado em: 15 nov. 2004.

Ripper, J. L. M. et al. 2004. **Design de Estruturas Mínimas de Bambu**. In: IX ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA. Cuiabá.

Snelson, Kenneth. 2005. Disponível em: <<http://www.kennethnelson.net/>> Acessado em: 18 out. 2005.