

Tensegrity de Bambu. Estruturas adaptáveis e eficientes

Aluno: Gabriel Kozlowski Maia

Orientador: Khosrow Ghavami

I. Resumo

Os Tensegrities são compostos pela relação de elementos comprimidos com elementos tracionados que juntos formam um sistema. Os comprimidos são dispostos de modo a não se tocarem devido à tensão imposta pela rede, criada pelos elementos sob tração, que os envolvem. Este tipo de configuração, que impõe uma leveza quase misteriosa ao conjunto, também é percebida na estrutura dos átomos, na espiral do DNA, e na relação entre ossos e tendões. Estas estruturas têm sido estudadas por diversos ramos do conhecimento, e engenheiros e arquitetos foram despertados pelas possibilidades que este sistema proporciona. Com características como a adaptabilidade, expansibilidade, resistência estrutural e uso de materiais de forma econômica, têm sido estudados como alternativa construtiva somente há 60 anos.

Parte deste trabalho se propõe a apresentar uma visão geral destas estruturas com foco na explicação do sistema em si. Reúne as principais referências no assunto e aborda suas origens, os estudos e as pesquisas que foram chave para seu desenvolvimento. Pretende-se montar um documento explicativo que cubra o básico para o entendimento e disseminação deste sistema estrutural, pois vê-se nos Tensegrities, sistemas eficientes e promissores, porém que ainda são pouco difundidos.

Através de sua observação, percebe-se que na maioria dos casos eles são projetados com materiais metálicos, como as barras e os cabos de aço. A partir disto, foi visto que era possível contribuir ao apresentar um estudo onde as barras de aço fossem substituídas pelo bambu.

O Bambu é um material usado em construções desde início da civilização humana especialmente no Oriente. A cultura ocidental menosprezou seu potencial estrutural e por isso hoje, é visto como um material não-convencional na construção civil. Desde 1979 na PUC-Rio, diversos estudos sistemáticos têm se focado em analisar as características mecânicas e o potencial deste material, desenvolvendo estruturas que tem gerado resultados positivos. Sua utilização nas estruturas Tensegrity diminuiria o impacto ambiental envolvido em sua construção, grande parte proveniente da produção das hastes metálicas, além de ser uma maneira alternativa para aumentar sua eficiência. O bambu permite que se diminua o peso do sistema sem grandes perdas no desempenho mecânico e torna a estrutura de fácil manutenção, onde suas barras podem ser facilmente substituídas e retornadas à natureza.

Na segunda parte deste relatório, apresenta-se um projeto preliminar para um módulo básico de abrigo em Tensegrity de bambu. Um Módulo leve, efêmero e pré-fabricado que não precise de mão-de-obra qualificada para ser montado no local. Ele é desenvolvido dentro da possibilidade, inerente aos Tensegrities, de se dobrar tais estruturas, pois visa ser facilmente estocado e transportado para o abastecimento de áreas carentes. Uma estrutura sustentável que utiliza poucos tipos de materiais e pretende estender ao máximo seus ciclos de vida.

II. Agradecimentos

Ao Departamento de Engenharia Civil da PUC-Rio e ao CNPq, pela Bolsa de Iniciação Científica que possibilitou que este trabalho acontecesse.

Ao professor Luciano Álvares que me deu o empurrão inicial para pesquisar os sistemas Tensegrity e principalmente ao professor Khosrow Ghavami por apostar em mim, que venho do curso de Arquitetura e Urbanismo e não da Engenharia Civil (como a maioria de seus orientados). Ghavami, além de ter me introduzido ao universo do bambu, influenciou minha postura diante da vida em geral, discursando sobre ética e engajamento profissional. Eu sou muito grato pelo tempo que tenho passado junto a ele.

À Hana Lerner, grande companheira e que sempre apóia os períodos em que estou focado nos estudos. Ao meu pai Telmo Maia, por fazer uso das palavras corretas quando estive menos estimulado, e à minha mãe Elizabeth Kozlowski que sempre está disposta a me ajudar nos momentos mais difíceis.

Por fim, à minha irmã Maria Maia, pela boa companhia e inspiração para todos meus momentos.

III. Conteúdo

I. Resumo / Abstract	1
II. Agradecimentos	2
III. Conteúdo	3
1. Introdução	4
2. O que é Tensegrity	5
2.1. Situação Atual	6
2.2. Características Mecânicas e Comportamento Estrutural	10
2.2.1. conceitos básicos	10
2.2.2. características complementares	12
2.3. Desvantagens e desafios	12
2.4. Qualidades	13
3. O Bambu no Tensegrity	15
4. Proposta – Módulo Habitável	17
4.1. Conceituação	17
4.2. O Projeto	20
4.3. Processo para se dobrar a estrutura	24
5. Comentários finais	25
6. Referencias Bibliográficas	26
IV. Lista de Figuras	28
V. Anexos	30
1. A Torre Rostock	30
2. Propriedades Mecânicas do Bambu	31
3. Exemplos da utilização do bambu na engenharia e arquitetura	32
4. Analogia a um balão	35
5. Definições e Observações	35

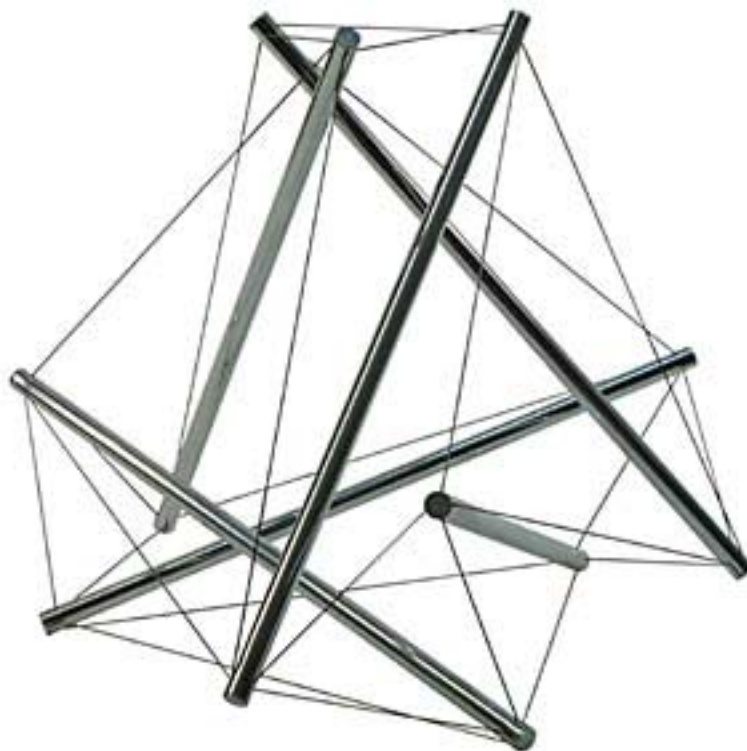


Foto1: Tensegrity

1. Introdução

O desperdício e mau uso dos recursos naturais são problemas constantes do mundo contemporâneo e os desastres, tanto os naturais como os causados pelo homem, estão cada vez mais recorrentes. Pessoas ficam desabrigadas devido à enchentes ou terremotos e, nem se quer é possível abastecê-las, pois ainda estamos despreparados para lidar com tais problemas e investe-se pouco para solucioná-los. Vê-se poucas alternativas em relação à moradias temporárias o que reforça o quadro precário da habitação no mundo. Estes tipos de desafios incentivam pesquisadores a procurarem novas tecnologias e materiais para tentar resolver questões já consolidadas, que a pesquisa por linhas convencionais não conseguiu solucionar.

O estudo do Tensegrity nasce em meados dos ano 40, e desde o início já com fardo de mudar a relação do homem com a mundo. Descobriu-se um sistema em que o modo como os componentes se relacionam é o mesmo de estruturas celulares e átomos. Diferente dos tradicionais sistemas estruturais utilizados, criou-se estruturas baseadas nos princípios do Tensegrity onde os componentes rígidos não se tocam, conseguindo extrema eficiência e economia de material. São estruturas que desafiam as leis da gravidade e complexas para se calcular. Hoje, seus estudos evoluíram bastante e somente agora começamos a perceber os reais potenciais deste sistema.

Estas estruturas são normalmente construídas com hastes metálicas que funcionam como componentes comprimidos, porém ao se levar em conta a energia despendida para a criação destas peças, percebeu-se que isto não condizia com o apelo sustentável que os Tensegrities têm. Este estudo voltou-se para a substituição destas peças por materiais naturais e chegou-se ao bambu, que já é conhecido pelo seu excelente desempenho estrutural sendo leve e resistente. O bambu tem sido analisado e testado como estrutura na PUC-Rio por 30 anos, o que possibilitou que este estudo ocorresse. Dentro do campo do Tensegrity, uma das áreas de maior interesse é a da mudança da forma e possibilidade de se dobrar estas estruturas, e foi então que se notou que este trabalho poderia apresentar uma nova perspectiva para abrigos temporários. Desenvolveu-se um projeto para um módulo habitável que pudesse ser dobrado, uma residência pré-fabricada que não ocupasse espaço, e que tivesse como premissa a criação de um método para abastecer as áreas de mais difícil acesso. A cooperação com o bambu foi essencial devido à função do projeto, precisava-se de um elemento estrutural leve, para facilitar o transporte, e que pudesse retornar à natureza após utilizado.

2. O que é Tensegrity

“Tensegrity é um princípio estrutural baseado no uso de componentes em compressão isolados dentro de uma rede de tensão contínua, de tal modo que os membros em compressão (normalmente barras ou hastes) não se tocam e os membros protendidos em tração (normalmente cabos ou tendões) delimitam o sistema espacialmente.”(Jaurégui, 2007)

A esta explicação genérica pode-se acrescentar algumas condições e características:

É um sistema (anexo V-4) composto pela relação entre dois tipos de componentes - um comprimido outro tracionado. Os componentes à tração constituem um conjunto contínuo e fechado e os à compressão formam um sistema descontínuo com comportamento exclusivamente local, onde cada nó recebe somente um elemento comprimido.

São estruturas auto-portantes e enrijecidas pelo estado inicial de *self-stress* (anexo V-1) que permite que tenham equilíbrio próprio. São estáveis, o sistema pode reestabelecer seu equilíbrio após um distúrbio e não precisa de nenhuma outra condição para se estruturar, é independente de forças externas (até mesmo gravidade) ou ancoragem.

Os Tensegrities são compactáveis, expansíveis, auto-balanceados, elásticos, leves e estruturas distribuidoras de cargas locais. Módulos elementares de Tensegrity de figuras iguais ou diferentes podem ser unidos de maneira a criar mastros, grades ou conglomerados.

Diversas definições podem ser encontradas na literatura que divergem principalmente em relação à abrangência do conceito, na definição restrita há uma distinção que os separa em Tensegrities puros (verdadeiros) ou falsos, estes últimos são as estruturas que transmitem esforços diretamente entre os elementos comprimidos e as que transferem cargas de retesamento a um sistema de apoios, não sendo, portanto, auto equilibradas (Deifeld, 2005). As obras mais relevantes já realizadas se encaixam nesta segunda linha e são coberturas de estádios esportivos.

Tensegrity é um princípio amplo e hoje é aplicado em diversos campos do conhecimento. Como na Biologia, principalmente, com Donald E. Ingber (1993; 1998; 2003), e outros, Wendling, Oddou e Isabey (1999), Volokh et al(2000), Yamada et al (2000), na Química Inorgânica com Tsu et al (2003), na Anatomia com Stephen M. Levin (1982), na Robótica com Aldrich ET al (2003), e outros.

Richard Buckminster Fuller (1956), um dos inventores do sistema, entendia que este esquema estrutural observado nos Tensegrities seria aquele governando toda a estruturação do Universo, tanto micro como macrocosmo. Esquema este de esferas ilhadas de compressão que são ligadas apenas pela atração das massas o que também caracteriza a integridade estrutural do núcleo do átomo. Uma das mais comuns analogias a este sistema é a comparação entre estruturas Tensegrity e estruturas pneumáticas. Muitos autores (Fuller, 1961, 1975b, 1982; Kenner, 1976; Pugh, 1976; Edmonson, 1987; Snelson e Von Baeyer, 1989; Motro, 2003; Burkhardt, 2004) admitem que construções infláveis são Tensegrities porque são sistemas auto-equilibrados compostos por um componente exterior tensionado que envolve os átomos de gás que atuam como componentes descontínuos à compressão.

René Motro (2003), um dos pesquisadores do assunto, propôs uma definição estendida que amplia o conceito de Tensegrity. Ele entende que um sistema Tensegrity é um sistema num estado estável de auto-equilíbrio, que compreende um conjunto descontínuo de componentes comprimidos dentro de um contínuo de componentes tensionados. Esta definição não diz que os componentes comprimidos precisam se tocar, e com isto, vai englobar diversos estudos que não seguiam o “purismo” das primeiras definições.

2.1 Situação Atual

O termo Tensegrity tem origem na contração das palavras em inglês “Tensional-Integrity”, cunhado em 1955 por Richard Buckminster Fuller. Há uma controvérsia em relação ao inventor do sistema, uma vez que, Kenneth Snelson, Buckminster Fuller e David Emmerich desenvolveram estudos paralelos na mesma época, e os dois primeiros freqüentemente mantinham contato. Não é um tipo de estrutura comumente conhecida, e o conhecimento dos seus princípios mecânicos e físicos não é muito difundido entre arquitetos e engenheiros. Hoje, o sistema é mais conhecido devido às esculturas do norte-americano Kenneth Snelson, que focou seu trabalho nos aspectos esculturais e estéticos e evitou aprofundar-se em aproximações físicas e matemáticas. Snelson desenvolveu suas próprias técnicas de construção que vem aperfeiçoando ao longo dos anos, muitos as vêem como uma ciência devido à apuração e delicadeza envolvidas em seu processo. A falta de compromisso entre forma e cálculo matemático em suas esculturas, e o fato de não terem função prática, o possibilitou desenvolver configurações assimétricas e livres de rigor geométrico, com dimensões que variam desde 10 cm à torres 30 m.

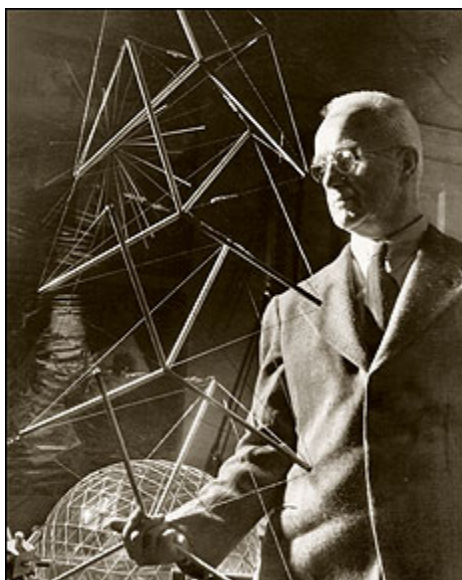


Foto 2: Fuller e Tensegrity

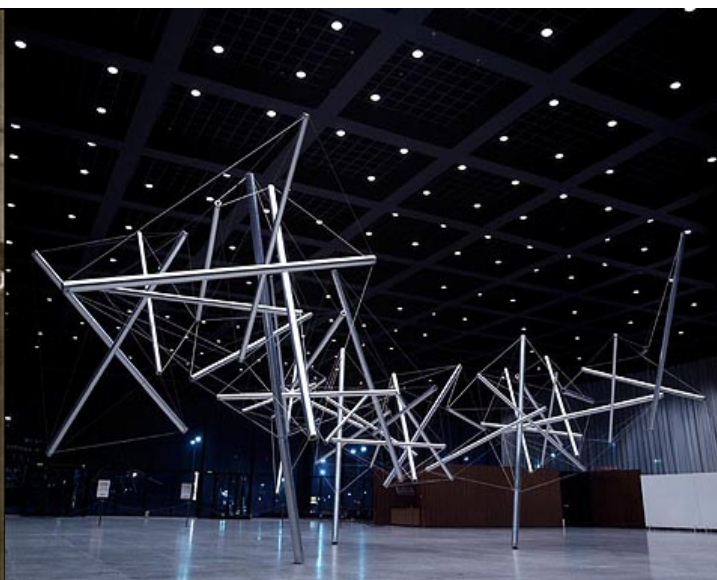


Foto 3: Escultura de Snelson. *Easy Landing*, 1977

Desde o final dos anos 50 o sistema vem sendo difundido e estudado. Os pesquisadores começaram e se intrigar com as formas difundidas por Fuller, que as apresentava como a resposta do funcionamento do universo. E a partir de então diversos estudiosos vem contribuindo para o enriquecimento da pesquisa nesta área. Aqui mencionam-se alguns passos importantes dentro do campo da engenharia civil e arquitetura, porém que fazem parte de um universo muito maior.

- Diversos autores (Jáuregui, Snelson, Motro, entre outros) constataam que o surgimento do sistema Tensegrity se deu após a aparição de dois modelos-chave. O “Gleichgewichtskonstruktion”(ou “Structure-Sculpture”) em 1920 de Karl Ioganson e o “X-Shape”, em 1951 de Kenneth Snelson.

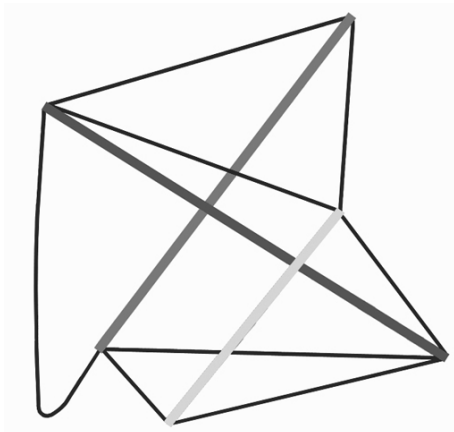


Foto 4: Esquema de “Structure-Sculpture” Foto 5: “X-Shape” <http://www.grunch.net/snelson/rmoto.html>

- Por volta dos anos 60 surgiram as primeiras patentes, consideradas originais, dos Tensegrities:

1. Emmerich D.G. (1959), *Charpentes Perles*, Patente Francesa No 59423, 26 de Maio 1959
2. Fuller, R.B. (1962) *Tensile-Integrity Structures*, Patente EUA No. 3,063,521, 13 de Novembro, 1962.
3. Emmerich, D.G. (1964), *Construction de réseaux autotendants*, Patente Francesa No. 1,377,290, 28 de Setembro, 1964
4. Emmerich, D.G. (1964), *Structures linéaires autotendants*, Patente Francesa No. 1,377,291, 28 de September, 1964
5. Snelson, K. (1965) *Continuous tension, discontinuous compression structures*, Patente Americana No. 3,169,611, 16 de Fevereiro, 1965.

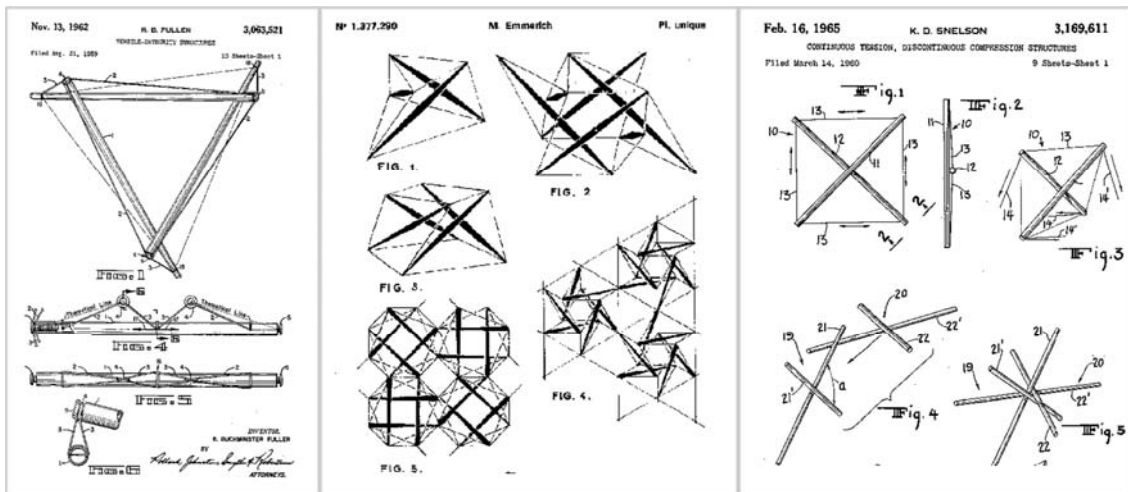


Foto 6: Patentes 2, 3, 5 [1]

- 1976, Anthony Pugh publica “An Introduction to Tensegrity” que cataloga uma variedade de modelos sob uma estrita classificação e tipologia. No mesmo ano, faz um domo geodésico de Tensegrity inspirado na patente de Fuller (1954), aonde os tendões foram substituídos por uma pele de plástico que tomou lugar no papel dos componentes em tensão contínua.

- No mesmo ano, Hugh Kenner desenvolveu o “Geodesic Math and How to Use It”, que demonstra como calcular com “qualquer grau de precisão” os detalhes pertinentes da geometria de estruturas regulares de geodésicas e Tensegrities.
- 1977, Oren Vilnay estabeleceu um novo conceito usando redes de plano regular (única camada) que podem ser empregadas para produzir superfícies curvas com pequena curvatura e vencer grandes vãos (Hanaor 1987, Motro 2003).
- O primeiro gride de dupla camada de Tensegrity foi proposto por Motro em 1987, onde os componentes em compressão estão em contato uns com os outros.
- 1987, Ariel Hanaor definiu um domo feito de módulos de Tensegrity e construiu no principio de nó-no-cabo (node-on-cable). Também em nos anos 80, começou a se pesquisar configurações planas de camada dupla. Huegy(1990) e Wesley (1996) patentearam outros tipos de domos, sendo Geiger o principal nome e pioneiro quando se fala de domos de cabos (cable domes).
- Robert W. Burkhardt (1994-2004) apresenta “Practical guide to Tensegrity Design”, o livro cobre o básico de fazer cálculos para o design e análise dos Tensegrities onde as hastes não estão conectadas umas às outras, que são as situações mais difíceis de serem calculadas. Trata das ferramentas úteis para projetar e analisar tais estruturas através da álgebra linear e calculo diferencial. Burkhardt (1999-2004) também desenvolveu “A Technology for Designing Tensegrity Domes and Spheres”,que é constantemente revisado.
- Connelly e Back(1998a, 1998b) desenharam um completo catalogo de Tensegrities com tipos prescritos detalhados de estabilidade e simetria, incluindo alguns que antes nunca tinham sido vistos.
- Gernot Minke(2002) separou as estruturas em sistemas abertos e fechados.
- Valentin Jáuregui (2007) elaborou sua dissertação de mestrado que cobre o estudo das origens, revisa a história e o progresso deste tipo de estrutura, além de definir os conceitos fundamentais e uma clara definição de Tensegrity.
- Em relação aos projetos de torres e mastros, os melhores resultados foram os construídos por Kenneth Snelson entre eles “4-Way Tower (1963), Tetra Tower (1963-2001), Needle Tower (1968), E.C Column (1969-81), Needle Tower II (1969) ,Zig-Zag Tower (1997) e Penta Tower (2001-03)”. No entanto há também A Torre de Rostock desenvolvida para a feira da cidade e para a International Garden Exposition (IGA 2003) pela firma de consultoria Schlaich Bergermann und Partner. Este foi um momento importante onde foi possível difundir tal sistema dentro de um importante evento internacional, sendo a mais alta estrutura de Tensegrity já construída. A estrutura foi calculada por Arturo Ruiz de Villa empregando o programa “Sofistik”.Um importante passo neste evento foi o planejamento da protensão e do processo construtivo que tiveram que ser muito bem projetados (anexo 1).
- René Motro, que começou a publicar seus estudos em 1973, é um dos mais importantes especialistas em Tensegrity no presente e comanda o Laboratório de Engenharia Civil da Universidade de Montpellier na França. Este pesquisador e laboratório se tornaram referencias na pesquisa deste tipo de sistema, juntos já desenvolveram diversos tipos de pesquisas e estruturas que continuam a empurrar as fronteiras neste campo. Entre seus trabalhos (muitos em conjunto com outros autores) pode-se citar: “Tensegrity Systems from Design to Realisation”(1986), “Tensegrity Systems for Double Layer Space Structures”(1987), “Tensegrity Systems: State of Art”(1992), “Multiparameter Formfinding Method”(1999), e seu livro “Tensegrity: Structural Systems for the Future”(2003) que explica todos os detalhes e

estudos recentes sobre este tipo de sistema. Além de publicações Motro e seu Laboratório desenvolveram um Software de ferramentas de design para estas estruturas, "Tensegrité 2000", e diversos modelos em escala real para avaliar e estudar tais estruturas. Junto com Hanaor, são principais nomes quando se fala de grides de camada dupla.

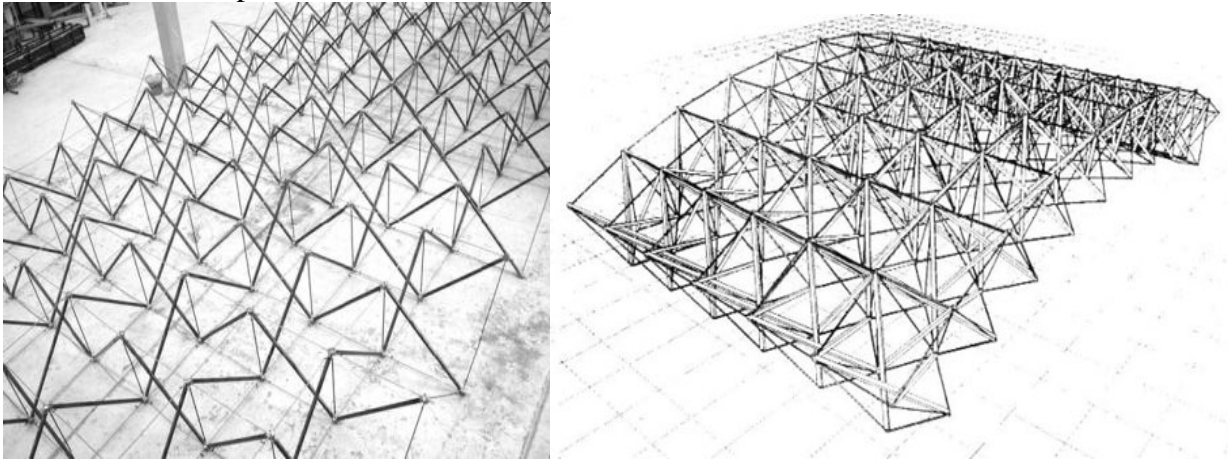


Foto 7: 1ª Gride de Motro, 2ª de Hanaor

- O conceito de membros em compressão ligados à membros em compressão, desenvolvido por Motro, tem sido aplicado para o desenvolvimento de estruturas inteligentes, e mecanizadas, como o que foi usada para o pavilhão da Swiss Expo 2002 (Blur Pavillion) projetado por Diller e Scofidio junto com Passera e Pedretti.

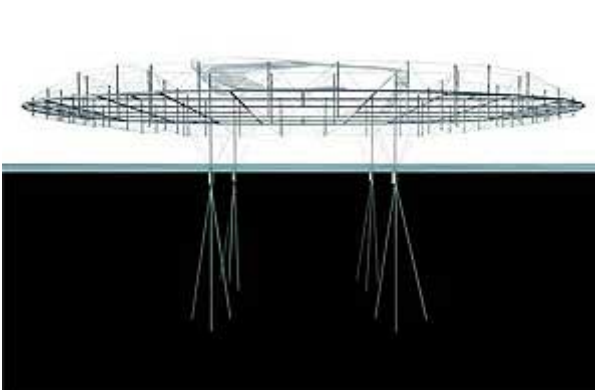


Foto 8: Blur Pavillion - Estrutura



Foto 9: Blur Pavillion - Vista

- Dobrar estruturas de Tensegrity tem sido um dos principais tópicos dos últimos 10 anos. Muito do futuro do sistema esta nesta característica significante. Pellegrino e Tibert (2003) têm trabalhos muito úteis e significativos do ponto de vista de mastros "dobráveis" e outras estruturas para uso espacial, como antenas, nesta tecnologia. Eles apresentaram um mecanismo de desdobramento automático de mastros de Tensegrity, e como constatou Evelthon, o modelo desenvolvido foi estática e dinamicamente analisado e se mostrou rígido axialmente mas fraco em flexão.
- Outros especialistas tem feito pesquisas recentes com este tipo de estruturas como A.Hanaor, R.E.Skelton, H.Furuya, H.Y.E.Park, K.A Liape, e Rene Motro e seu laboratório, este último fazendo uma exaustiva revisão de todas as opções que estes sistemas podem oferecer e seus potenciais.
- Passera & Pedretti desenvolveram com Motro uma estrutura dobrável controlado por computador.

- Liapi (2002) desenvolveu um método para rápida montagem destas estruturas compostas de unidades prismáticas Tensegrity de base quadrada, empregando um padrão de um mecanismo de desdobramento que vai prevenir o resultado dos cabos frouxos.
- Em relação aos métodos de *busca da forma*, que dizem respeito à busca de uma configuração geométrica equilibrada do sistema, muitos autores tem dado diversas contribuições. Em 1994 Motro, Belkacem e Vassart, publicam “Form finding numerical methods for Tensegrity systems” que expande o universo da pesquisa neste assunto e classifica os métodos como geométricos, analíticos e numéricos. Logo depois Connelly e Terrell (1995) vem contribuir com um artigo sobre a rigidez global do sistema, Motro e Vassard (1999) apresentam a busca por parâmetros múltiplos, Sultan et al (1999) propõe outro método com “Reduced prestressability conditions for tensegrity structures”, e então, mais recentemente Tibert & Pellegrino(2001) fazem uma revisão de todos os métodos de *busca da forma* na literatura e os classificam em dois grupos, os métodos Cinemáticos e os métodos Estáticos, deixando clara as ferramentas para se trabalhar com os sistemas Tensegrity.

Hoje o sistema se encontra ainda em fase de desenvolvimento, porem já tendo tido importantes exemplos construídos que demonstram um pouco de seu potencial.. É um sistema em fase de consolidação e abraçado por empreitadas audaciosas como a Exposição de 2002 da Suíça, sempre dando um retorno positivo tanto do seu desempenho estrutural e economia, como do público que o experimenta, que costumam se encantar e intrigar com tais estruturas.

2.2 Características Mecânicas e Comportamento Estrutural

2.2.1 conceitos básicos

Os sistemas Tensegrity trabalham sobre a luz da *Synergia*, onde seu comportamento não é ditado por nenhum de seus componentes separadamente (Fuller, 1975; Levin, 1982), mas pela soma, na cooperação e convergência das partes para um mesmo fim. Na Sinergia o valor do conjunto dos componentes do todo é superior ao valor de cada um individualmente. Nos Tensegrities os descarregamentos e transmissão das cargas, para qualquer ponto em que forem aplicadas, são uniformemente distribuídos entre todos os membros da estrutura. Suas características mecânicas e seu estado de equilíbrio geométrico vão depender de sua estrutura relacional: a lista de elementos e modo de agrupamento e montagem.

A rigidez dos sistemas Tensegrity é condicionada pela estabilização de mecanismos infinitesimais com estados de self-stress. Tal rigidez só é possível se a geometria for consistente com uma situação estável de auto-equilíbrio estático e é através do processo de *busca da forma* – que diz respeito ao compromisso entre forma e requerimentos de estabilidade, onde o objetivo compreende assegurar uma relação entre geometria e “self-stress” – que se irá determinar tal configuração geométrica equilibrada. Para se conseguir a condição de estabilidade espacial são necessários que cada nó receba três elementos a tração e um elemento à compressão (apesar de existirem algumas configurações específicas onde pode haver apenas dois cabos por nó), não há partes redundantes, no entanto mais tendões podem ser acrescentados para consolidar a estrutura.

Existem três estágios geométricos que podem ser identificados na consolidação de uma estrutura Tensegrity, e vale aqui mencioná-los a fim de esclarecer as características que formam o sistema e validar a necessidade dos processos que as estabelecem. Os estágios vão diferenciar a fase em que a estrutura se encontra e determinar seu estado para utilização (Motro, 2003).

- O primeiro é o sistema que, em termos mecânicos, é chamado de “estrutura indeterminante” (cinematically indeterminate): O sistema é instável e não tem uma forma definitiva, qualquer ação de uma força externa muda sua configuração.

- O segundo é chamado de “geometria equilibrada de self-stress nulo”: O sistema ainda é mecanicamente “cinematically indeterminate”, porém neste estágio o mecanismo é infinitesimal e o sistema possui uma única geometria confiável. Esta geometria pode ser calculada pelo processo de *busca da forma*. A estrutura ainda se mantém inapropriada para uso pois ainda não tem rigidez.

- No terceiro estágio o sistema é “self-stressed”: A geometria é deformada pelo “self-stress”, se comparada com o estágio 2, mas manterá suas características gerais. Agora, os elementos internos estão comprimidos e os externos tracionados. Apenas aqui, a estrutura se consolida, realmente, pela integridade tensional, como um Tensegrity.

A fim de simplificar a explicação destes estágios, seu funcionamento, e a relação entre geometria e estabilidade, Motro propõe uma analogia a um balão (anexo IV).

O processo de *busca da forma* irá definir a geometria equilibrada de self-stress nulo, e neste processo que se definirá a geometria e o “self-stress”. Os métodos de busca da forma podem ser experimentais, como os utilizados pelo escultor Kenneth Snelson, ou utilizar um processo que parta dos requerimentos mecânicos do sistema. Este último método tenta assegurar um compromisso entre forma e as forças de protensão para o desenho da estrutura. Hoje existem diversos métodos matemáticos de *busca da forma* que se dividem, segundo Tibert & Pellegrino (2001), em Métodos cinemáticos (soluções analíticas, programação não-linear, relaxação dinâmica) e Métodos estáticos (soluções analíticas, método das densidades de forças, método da minimização da energia, redução das coordenadas), porém ainda são métodos que requerem muito tempo de desenvolvimento para sistemas complexos.

O processo de *busca da forma* está estritamente ligado à pré-estabilidade do sistema, que é um dos desafios deste tipo de estrutura, e correspondente à sua rigidez. Este processo é basicamente relacionado com os estados de protensão e de self-stress, mecanismos infinitesimais e finitos (anexo V-2), e estabilização de mecanismos infinitesimais, sendo o self-stress considerado a chave deste tipo de sistema. Como observa, sabiamente, Motro (2003): “Os sistemas Tensegrity requerem o processo de busca da forma para se alcançar o estado equilibrado de self-stress nulo: neste estado geométrico, um estado de self-stress pode ser introduzido, mecanismos finitos desaparecem, mas ocasionalmente algum mecanismo infinitesimal permanece. Estados de self-stress podem ou não estabilizar estes mecanismos infinitesimais; é necessário checar esta estabilização.”

Graças à sua auto-estabilidade, eles não dependem da gravidade, não precisando ser ancorados ou colocados sobre nenhuma superfície, são estáveis em qualquer posição (Perlberg, 1977).

Estes, então, são os conceitos fundamentais, a base de pré-requisitos para entender o comportamento estrutural e características mecânicas deste tipo de estrutura. À estas, são acrescentadas outras características complementares que compõem estes sistemas.

2.2.2 características complementares

Como os componentes em compressão são descontínuos eles só trabalham localmente. A compressão é localizada em linhas de ação específicas e curtas, o que faz com que não estejam sujeitos à grandes cargas de flambagem. Devido à descontinuidade da compressão, eles não sofrem torque de maneira alguma. A resposta à carga não é linear, eles são mais flexíveis sobre cargas leves, mais sua rigidez aumenta rapidamente quando a carga é maior, como uma ponte suspensa (Kenner, 1976; Smaili 2003; Wang 2003).

Nas estruturas de Tensegrity dobráveis a introdução de mecanismos finitos vão possibilitar a transformação da forma e introduzir a instabilidade necessária para que o processo aconteça.

De acordo com Irving (2001), devido à geometria disjunta o momento fletor nas barras em compressão é minimizado, deixando apenas tensões axiais para governar o desenho estrutural. Mais ainda, a geometria disjunta amortece as vibrações que podem ser causadas por forças laterais.

A resiliência (anexo V-3) ou rigidez da estrutura depende dos materiais empregados e pelo seu modo de montagem/ agrupamento, podendo ser muito flexíveis ou muito rígidos e fortes. Estas estruturas tem alta resistência se comparadas a outras estruturas de peso similar.

2.3 Desvantagens e desafios

Apesar do domínio do sistema já ter evoluído muito em menos de 60 anos, diversas áreas precisam de aprofundamento e investigação. Ainda não é um sistema no qual seja fácil de se trabalhar pois todos os processos envolvidos em sua criação são de grande complexidade. O desenho estrutural requer precisão e não admite a convencional forma de representação (desenhos planos como elevações, cortes e fachadas), sempre são utilizados modelos volumétricos gerados em computadores ou um sistema de coordenadas espaciais. O cálculo estrutural deve levar em conta diversas variáveis que, hoje, tornam o processo longo e de difícil execução. Algumas das principais implicações são listadas a fim de esclarecer tais desafios, situando a fase em que as estruturas Tensegrity se encontram.

Como estas estruturas não são convencionalmente rígidas, elas sempre apresentam uma “flexão infinitesimal” e devem ser self-stressed para resistir à deformação na direção da flexão (Pellegrino e Calladine, 1986). Elas também tendem a apresentar suscetibilidade à vibração por causa esta flexão infinitesimal.

Processos como a *busca da forma*, os mecanismos de estabilização e o comportamento mecânico sob a ação de cargas externas ainda são pontos a serem aprofundados.

Motro, em “Tensegrity Structural Sistem for the Future” (2003), apresenta um panorama dos desafios na concepção de um modelo: “Se a confiabilidade de todo o self-stress for assegurada (tendo a escolha do estado inicial sido muito bem feita), designers (ainda) tem que resolver um problema muito específico relacionado com a implementação (e monitoramento) deste self-stres. Este problema também deveria ser resolvido para membranas: é necessário ter o equivalente a um padrão de corte para reunir os componentes de modo que no final o sistema esteja simultaneamente na correta geometria e no escolhido estado de stress inicial. Esta não é uma questão óbvia desde que muitos fatores têm que ser considerados: sensibilidade à imperfeições na fabricação, controle da distribuição de self-stress, e , finalmente, controle simultâneo da geometria.”

Junto aos novos processos de dobrar estruturas Tensegrity, vêm uma gama de novos problemas a solucionar, problemas que envolvem o desenho, o modelamento numérico e estudos mecânicos e tecnológicos. Outras questões a se levar em conta são as trajetórias descritas pelos nós no desdobramento e o ponto de contato entre as barras, que necessitam ser estudadas mecanicamente e requerem complexas análises numéricas, e evitar que os cabos frouxos se entrelacem com as barras ao se desdobrarem através de um domínio preciso da composição do sistema neste momento.

Devido a estes problemas, os modelos matemáticos necessários para analisar, calcular e projetar estas estruturas ainda estão sendo desenvolvidos e precisam ser mais pesquisados antes que o uso extensivo destas estruturas possa ser possível, apesar de hoje já existirem programas desenvolvidos especificamente para esta função, como exemplo o programa *Tensegrity 2000*. A complexidade de fabricação também ainda é uma barreira para o desenvolvimento destas estruturas, o que pode levar à problemas no processo de construção.

Apesar de ser um sistema muito promissor, Hanoar (1987) constatou que ainda há grandes deformações e pouca eficiência estrutural se comparado com sistemas tradicionais.

2.4. Qualidades

Tensegrity é visto como um importante campo da engenharia estrutural a ser desenvolvido. É um sistema completo, que possui qualidades que estão em sintonia com as necessidades atuais, em um cenário onde o desperdício e o descuido ambiental não são tolerados e onde são buscadas soluções inteligentes para antigos e novos problemas.

Nestas estruturas, como só há dois tipos de componentes, tração e compressão, e cada elemento do sistema, por estar separado e bem definido, vai desempenhar especificamente somente uma destas funções, pode-se dizer que cada elemento requer apenas rigidez unilateral, o que torna o sistema econômico pois os materiais sempre estarão trabalhando na sua melhor forma.

Sendo os elementos tracionados os predominantes do sistema, e como estes não precisam de grande quantidade de material para serem resiliêntes, resistentes e suportarem enormes quantidades de tensão com uma secção muito fina, aliado à uma correta escolha dos elementos comprimidos, o sistema pode se tornar muito eficiente, leve e econômico. A leveza é empregada para diminuir o consumo de energia da construção e uma vez tendo a tecnologia evoluído junto à um aperfeiçoamento do processo de montagem, o custo da obra diminuirá significativamente.

O uso deste sistema pode influenciar, como um todo, na eficiência do tempo de construção e no planejamento, controle e administração do projeto de construção em geral. Pode ser um sistema modular (aplicação da patente de Liape 2002), podendo ser produzindo em serie e tem um potencial mínimo de acidentes e fácil construção. Para grandes construções, o processo é relativamente fácil de ser desenvolvido uma vez que a estrutura é auto-escalável, funciona como o próprio andaime da obra



Foto 10: Easy-K Installation, 1970

A “estrutura indeterminante” dos Tensegrity às vezes é uma vantagem. Nos sistemas dobráveis, somente uma pequena quantidade de energia é necessária para mudar sua configuração (Tibert, 2002). Ao usar elástico, as estruturas de Tensegrity podem ser auto-erectíveis ou auto-dobráveis, a energia potencial nos cabos elásticos é usada para desdobrar a estrutura na sua configuração estável. Dobrar as estruturas reduz seus volumes no espaço, possibilitando o transporte e armazenamento destes objetos.

O uso de elementos estandarizados e a ênfase na transformação da forma podem mostrar ter mais aplicações diretas à estruturas utilitárias como portáteis, fold-up, kioskes, e itens de mobiliário desmontáveis. Diversos módulos individuais de Tensegrity, iguais ou diferentes, podem ser agrupados a fim de formar grides, mastros, e estruturas de grande porte.

A adição de elementos em Tensegrity à sistemas de construção integradas e as possibilidades de sua combinação com outros tipos de sistemas portantes, resultando em estruturas híbridas, oferece um grande campo de possibilidades de desenvolvimento de projetos. Atualmente pode-se aplicar em grandes vãos sistemas abertos em Tensegrity combinados com membranas têxteis como cobertura. Em relação aos domos de Tensegrity, estes podem cobrir grandes áreas com apenas suporte mínimo nos seus perímetros, o que possibilitaria que as estruturas fiquem suspensas à áreas congestionadas ou perigosas, áreas urbanas ou terrenos delicados ou abalados.

Como atestado por Pugh (1979), como estas estruturas são altamente resiliêntes e os testes mostram que podem suportar grandes cargas de choque estrutural, ele as qualificaria como ideais para áreas onde os terremotos são um problema. Nas treliças de Motro o sistema se sustenta até mesmo após o rompimento de um cabo.

Apresentado suas vantagens, e aqui ressalva-se a leveza e o uso de materiais de forma econômica entre elas, torna-se evidente que as estruturas de Tensegrity tem um apelo sustentável que não pode deixar de ser notado. Suas unidades têm características de células de baixo impacto no meio ambiente, e se utilizadas de maneira adequada, possibilita que seus materiais possam ser constantemente substituídos e reutilizados, o que pode estender o ciclo de vida de seus materiais.

3. O Bambu no Tensegrity

Considerando-se o impacto ambiental envolvido na produção de aço e os problemas relativos à poluição e desperdício de energia, parte-se para uma pesquisa com materiais naturais que possam substituir os fabricados. Com o uso de materiais ecológicos é possível minimizar o consumo de energia, conservar recursos naturais e reduzir a poluição do processo em geral. A baixa energia de produção se comparada a outros materiais como aço e concreto pode resultar em baixo custo da construção.

Com o intuito de aumentar o potencial dos sistemas Tensegrity e utilizar as qualidades do sistema da melhor maneira possível, propõe-se o Bambu como membro à compressão, no lugar das hastes de aço normalmente utilizadas.

Os bambus são gramíneas, pertencentes à família *Poaceae* e à subfamília *Bambusoide* formando parte da ordem *Graminales*. O bambu é presente em toda zona tropical e parte da zona subtropical da terra, sendo que existem mais de 1600 espécies de bambu no mundo, 440 provenientes da América, 1000 da Ásia e Oceania, e algumas poucas da África (López, 2003). É uma planta de crescimento rápido (um dos mais rápidos da natureza) com constante produtividade por bambuzal, em apenas alguns meses atinge seu comprimento final e em alguns anos atinge sua resistência mecânica máxima. Não precisa de replantio, é uma fonte natural e auto-renovável de matéria prima.



Foto11: desenho de bambuzal

Em 2000, O *International Network for Bamboo and Rattan (INBAR)*, elaborou o documento que foi analisado pelo *International Conference of Building Officials (ICBO)*, e se tornou o primeiro conjunto de normas para o uso de bambu nas obras de Engenharia nos Estados Unidos da América, permitindo legalmente sua utilização como elemento estrutural.

Seu uso na construção civil possibilita um baixo custo de produção e uma grande economia de energia. Segundo Ghavami (1994), se comparado à energia necessária para produzir um m³ por unidade de tensão de projetos com materiais convencionais, como concreto e aço, a energia de produção do bambu é cinquenta vezes menor para a mesma resistência. É um material eficiente, características como o baixo peso específico reduz o custo de manuseio e transporte, e sua forma tubular acabada já é estruturalmente estável.

As características mecânicas do bambu são influenciadas principalmente por fatores como: espécie, idade, solo do bambuzal, condições climáticas, época da colheita, teor de umidade das amostras, localização das mesmas com respeito ao comprimento do colmo, presença ou ausência de nós nas amostras tesadas e o tipo do teste (Ghavami, 1989). Porém, devido à quantidade de testes já realizados mostra-se que é possível tomar números confiáveis para seu uso como elemento estrutural. Devido à orientação das fibras do bambu ser paralela ao eixo do colmo, sua resistência a tração é alta, podendo chegar ao redor de 300 MPa. Já a

resistência à compressão costuma ser 30% menor e oscila entre 20 e 120 MPa pois varia muito com a espécie (Ghavami e Marinho, 2002). No Anexo 2, apresenta-se um gráfico com curvas típicas de tensão de compressão x deformação do bambu até carga máxima, acompanhado de um quadro que apresenta as resistências à tração e à compressão e os respectivos módulos de elasticidade de algumas espécies estudadas na PUC-Rio.

Apesar de trabalhar melhor tracionado, seu desempenho à compressão continua sendo bastante satisfatório e suas propriedades mecânicas como flexibilidade, resiliência e resistência ao longo das fibras, são ideais para este tipo de estrutura auto-tensionada (Verschleisser, 2004). O bambu vai reduzir o peso destas estruturas a ponto de torná-las extremamente leves e resistentes.

Este tipo de sistema ainda possibilita que haja substituição de peças de uma maneira relativamente fácil, sem precisar de grandes reforços estruturais temporários, o que encaixa com a demanda do material e torna possível respeitar o ciclo de vida do bambu, podendo retornar à natureza após ter envelhecido sem gerar dejetos químicos ou tóxicos. Para garantir sua durabilidade, é necessário não expor o material à incidência direta do sol e da chuva, e assim trabalha-se sempre com a estrutura pelo interior, com as peças dentro do invólucro de lona tensionada. O bambu trabalhará em conjunto com os cabos de aço e para isso desenha-se algumas ligações que poderiam ser utilizadas para esta transição.

Seu uso é uma maneira de propor incrementar o potencial sustentável das estruturas Tensegrity sem que haja grandes perdas em sua eficiência.



Foto 12 e 13: Bambuzal

4. Proposta – Módulo Habitável

4.1. Conceituação

Quando foi decidido aliar o bambu com o sistema Tensegrity percebeu-se o enorme potencial desta cooperação, o que levou a uma pesquisa das possíveis aplicações em estruturas utilitárias.

Ultimamente muitos estudos em volta dos Tensegrities tem se preocupado com sua utilização como elemento estrutural, ou como parte de um sistema que recebe cargas ou as distribui (grides, mastros, vigas, entre outros). Porém pouco proveito tem sido tirado de uma de suas características intrínsecas que é a “interioridade”. Diz-se “interioridade” pois os elementos tracionados conformam um rede contínua na periferia dos comprimidos, como uma pele que os envolve. Os elementos comprimidos sempre estão no interior junto a um grande vazio. Fuller (1995) já comparava esta configuração com a configuração do átomo: um invólucro, o vazio e seu núcleo. Esta característica é melhor percebida ao se observar sistemas onde os tendões foram substituídos por algum tipo de pele, como o apresentado por Pugh (1976), utilizando pele de plástico. Então, foi visto que não havia necessidade de juntar diversos módulos para se conseguir um espaço habitável, este já existia no interior de cada uma das configurações geométricas descobertas. Já havia um espaço pronto para ser ocupado, só era necessário mudar a escala.

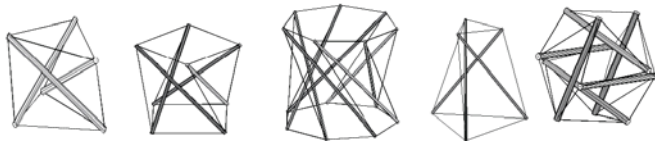


Foto 14: Diversos configurações geométricas.

A idéia foi criar um moradia pequena, provisória e transportável que partiu da vontade de abastecer áreas carentes, de difícil acesso ou onde houve algum incidente, de maneira fácil e rápida. Espelhou-se em projetos como o das casas temporárias, construídas com tubos de papel e lona, para vítimas de terremotos no Japão, pelo arquiteto Shigeru Ban em 2001.



Foto 15: Abrigo temporário

Com este projeto em mente, a possibilidade de se dobrar estruturas Tensegrity abriu caminho para o desenvolvimento de um abrigo que pudesse ser pré-fabricado e estocado sem ocupar espaço. Tornaria o processo de transporte mais fácil e eficaz, podendo transportar grandes quantidades de uma vez só, e permitiria que o abrigo já viesse quase totalmente pronto sem precisar de mão de obra qualificada para sua montagem no local.

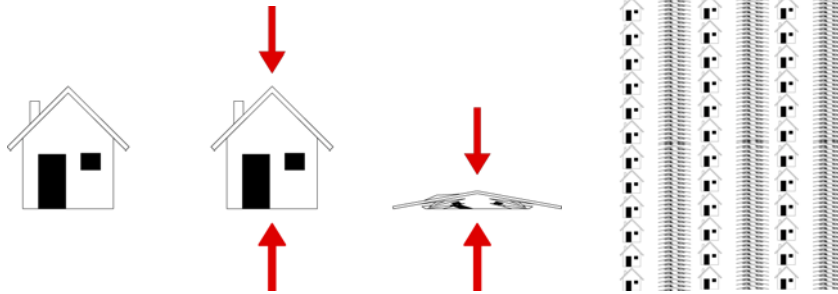


Fig.01: dobrar casas poderia otimizar a produção, armazenamento e transporte

Fig.02: se dobrado, um módulo habitável poderia ocupar até 7 vezes menos espaço.

Para o início do projeto, escolhe-se o modelo regular de Tensegrity de seis hastes, chamado *Icosahedron*, devido ao fato de ter membros paralelos e ângulos retos. Neste modelo é possível inscrever um cubo em seu interior, o que se tornaria a área útil habitada.

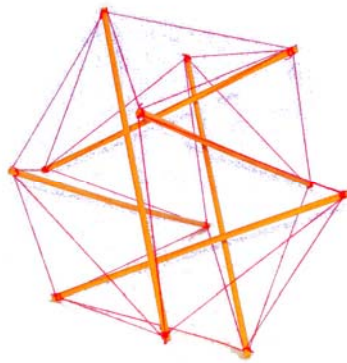


Fig.03: Modelo regular de 6 hastes

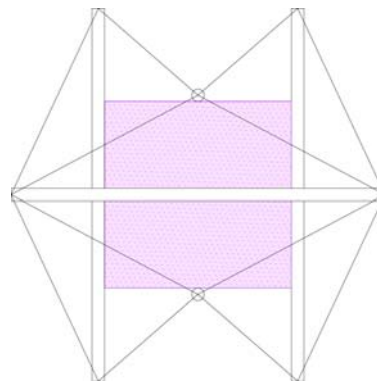


Fig.04: Vista planificada do cubo inscrito no interior do módulo.

A partir da existência deste cubo fictício, decidiu-se que o espaço mínimo interior teria como área útil de piso 3 x 3 m, e esta seria a dimensão máxima da esteira que serviria para esta função. Com a dimensão do cubo decidida modelou-se a estrutura geral que teve cada uma de suas hastes medindo 6 m de comprimento e 20 cm de diâmetro.

Os planos formados pelos ângulos dos cabos seriam, então, fechados com lona, configurando um polígono regular de vinte faces.

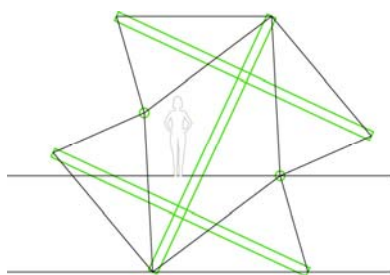


Fig 05: cabos e tubos

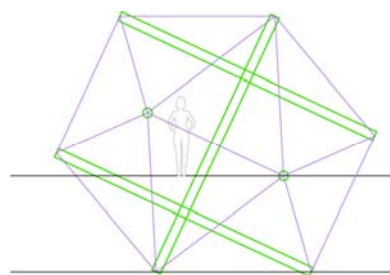


Fig 06: Tubos e linhas das lonas

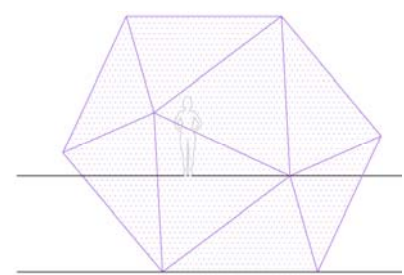


Fig 07: Geometria fechada pela lona

A lona foi escolhida como material de cobertura pois é leve e possibilita que o módulo se dobre sem resistência alguma.

Uma das necessidades observadas na concepção do projeto era que o Módulo pudesse ter suas peças reutilizadas ou trocadas e seus materiais pudessem ser reciclados após seu uso. Por isto todas as ligações foram desenhadas para se encaixarem e nada é soldado, e o bambu possibilitou que as peças principais pudessem ser trocadas e devolvidas à natureza quando necessário. Tentou-se criar um ciclo fechado, onde o consumo de energia fosse o menor possível após o primeiro gasto inicial (produção dos primeiros modelos).

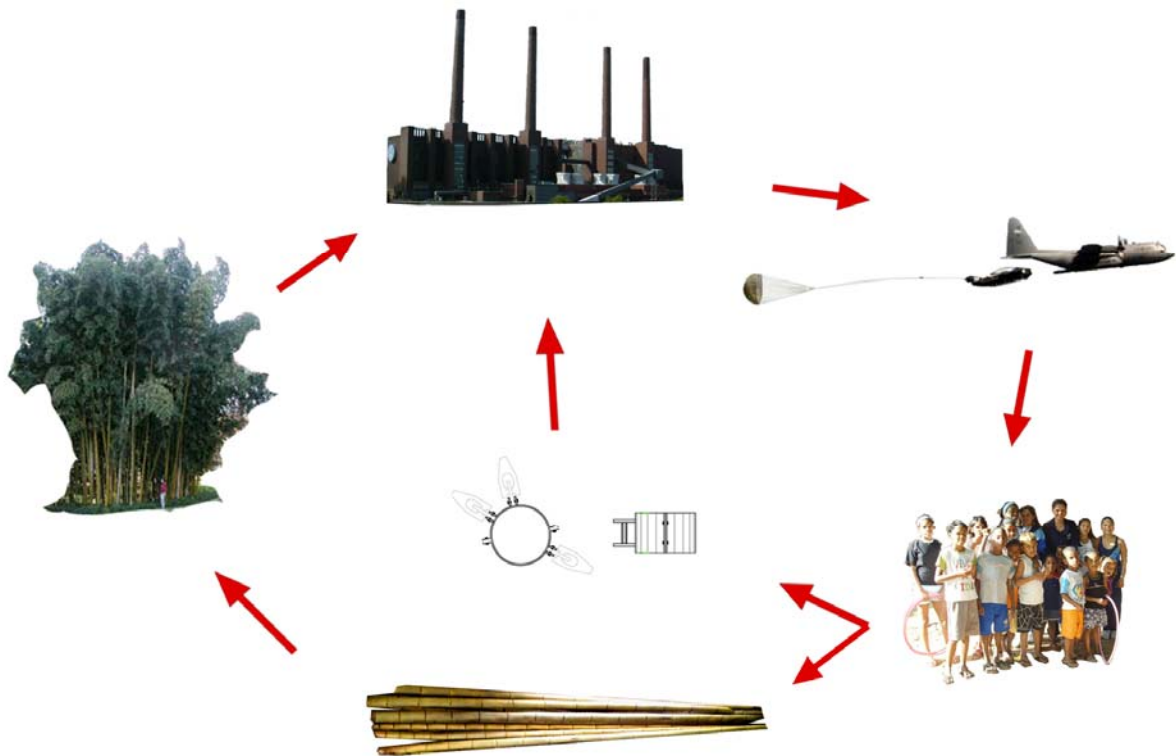


Fig.08: ciclo do produto

Após abastecido a população, quando já não fosse mais necessário – talvez devido à reestruturação da sociedade local – as peças de bambu poderiam retornar à natureza e as ligações metálicas seriam reutilizadas para a produção de outros Módulos que viriam a abastecer outras áreas necessitadas.

4.2. O Projeto

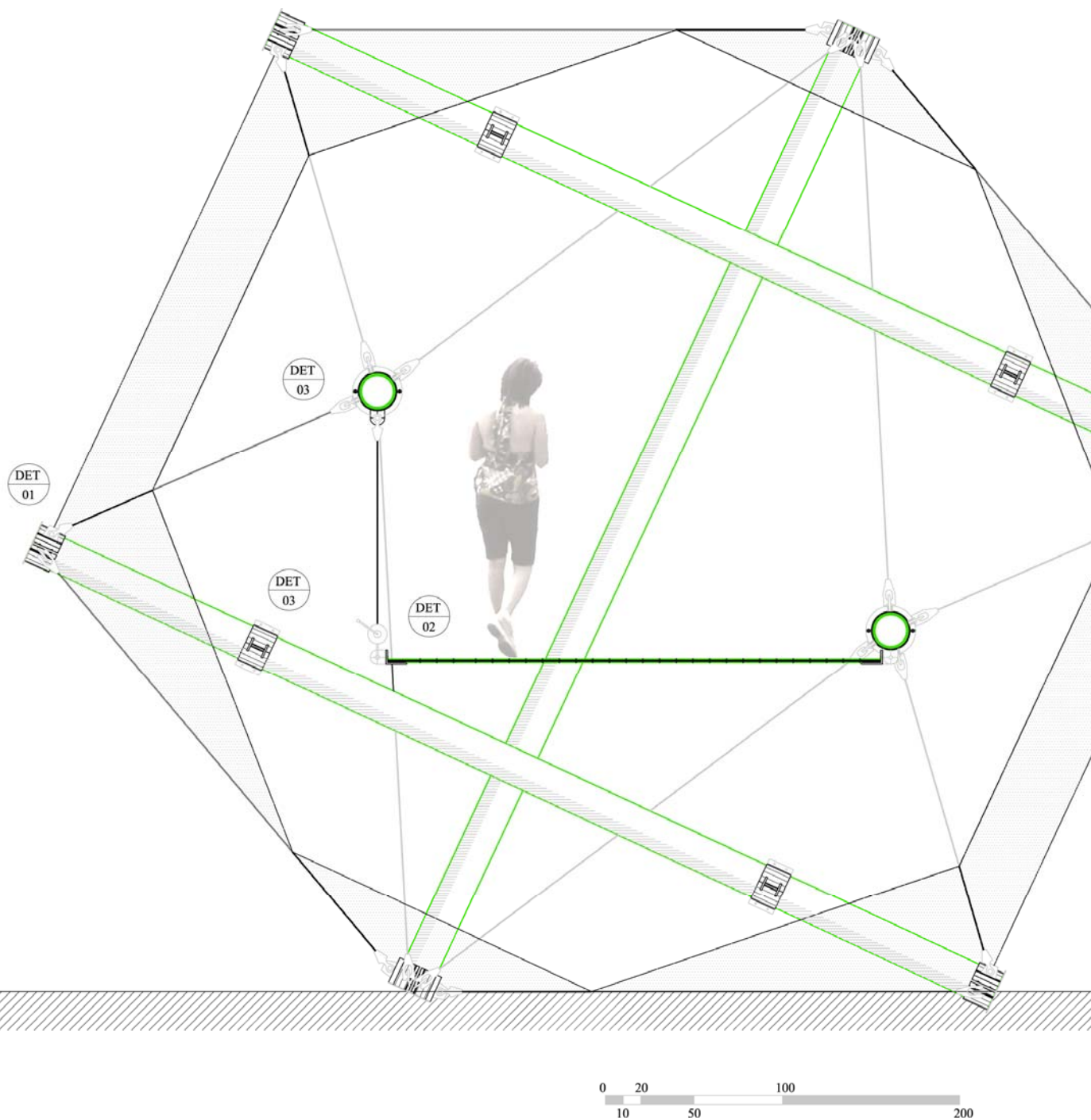


Fig.09: Sessão do Módulo

- Detalhe 1: Peças de ligação entre o bambu e os cabos de aço.

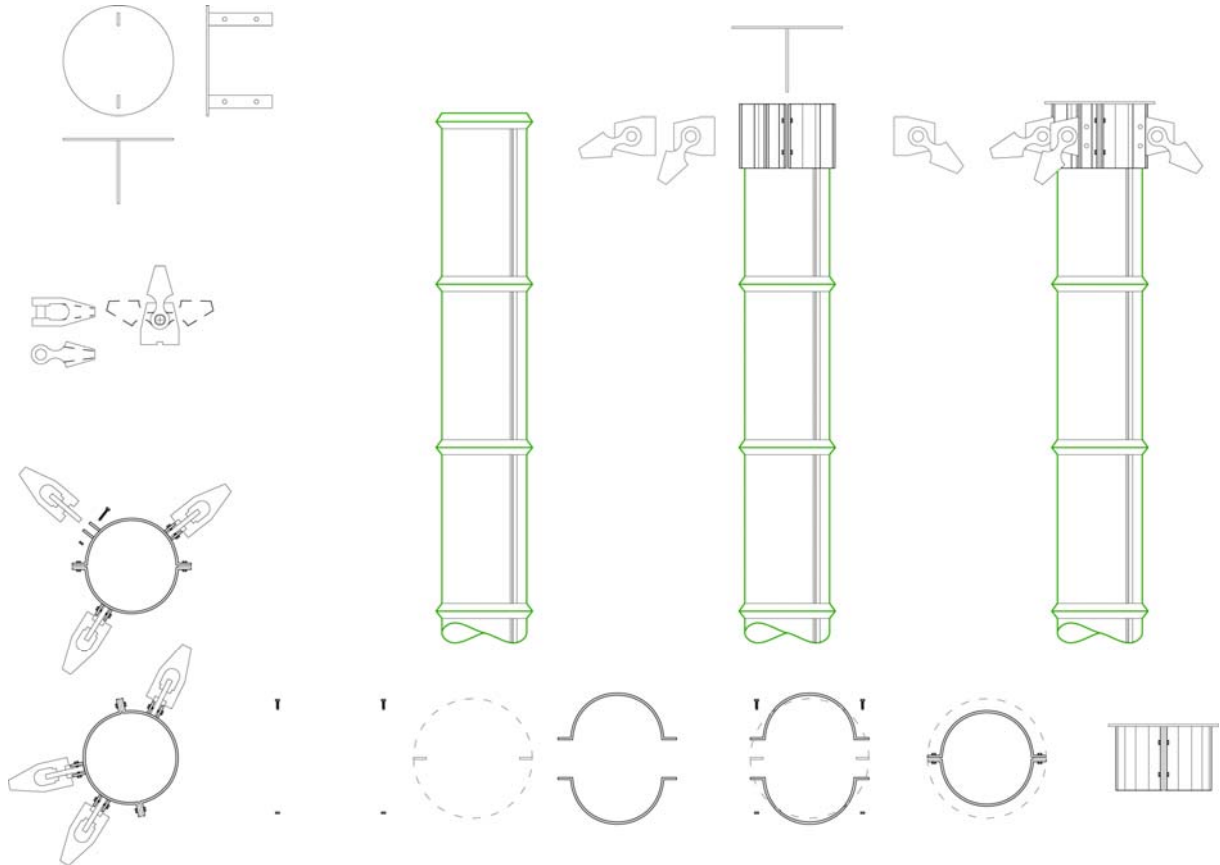


Fig.10: Ligações e soquetes (peça que recém os cabos-de-aço)

A “chapa de topo” é fixada junto às chapas laterais, ela atua comprimindo o bambu quando os esforços estiverem presentes nos cabos e evitaria que as chapas laterais deslizassem. À estas últimas seriam fixadas peças verticais, já posicionadas no correto ângulo em que os cabos sairiam, para receber os soquetes móveis. Os soquetes tem liberdade em um eixo o que torna o processo de montagem mais fácil, pois assim só é necessário garantir um ângulo (mencionado anteriormente), e possibilita acompanhar os cabos no processo de dobragem.

- Detalhe 2: Piso e peças de ajuste de nível

Era preciso resolver o piso em acordo com dois desafios principais. O primeiro diz respeito ao dinamismo que se propõe que o módulo tenha. Era necessário que não houvesse hierarquia de lado, que o Módulo pudesse se manter em pé em qualquer posição e que o piso acompanhasse essa flexibilidade. O outro, vem acompanhado ao processo de dobragem do sistema. Não poderia haver um piso fixo ou rígido pois a variação de seu tamanho neste processo não permitiria.

Partiu-se para uma solução onde o piso fosse separado do Módulo e guardado em seu interior. Esta seria a única parte do projeto para ser montada no local e por isso procurou-se uma maneira de tornar o processo o mais simples possível. O piso foi resolvido como uma esteira de enrolar que é simplesmente apoiada em duas barras metálicas, e estas são ligadas à outras peças presas nas hastes. Estas outras peças (detalhe 3) resolveriam a questão da falta de hierarquia quanto da posição do conjunto.

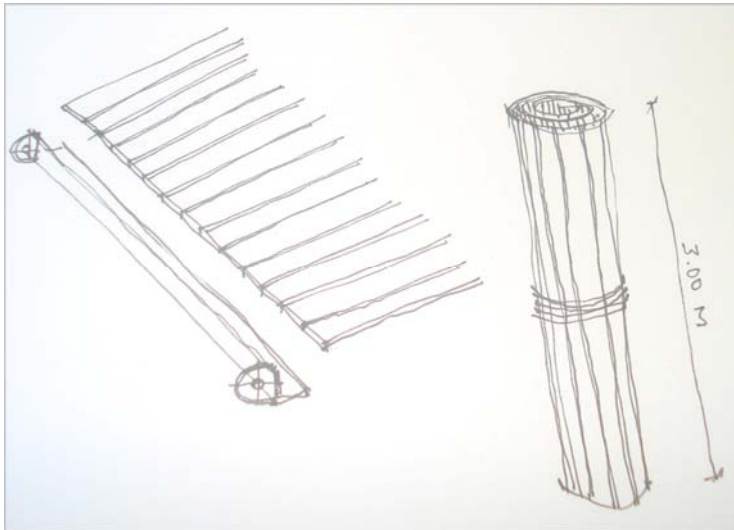


Fig.11: Piso esteira

A área útil de piso é 3 x 3 m. Dependendo do ângulo que o módulo está em relação ao solo, seria possível que esta área fosse maior (devido à distância que toma das hastes), porém 3 x 3 é o mínimo denominador comum para qualquer posição e arrumação.

- Detalhe 3: Ligações do piso com tubos

Duas peças para sustentar o piso são colocadas em cada uma das hastes a fim de possibilitar que o módulo seja assentado em qualquer posição (Fig.13). Assim, não há hierarquia de lados e nem "cabeça para cima ou para baixo". Para seu lançamento de aviões, isto possibilita que caia de qualquer maneira em qualquer terreno.

Como não havia modo de assegurar o ângulo que o Módulo faria com o solo, era necessário garantir que o piso sempre ficasse em nível (Fig.15). Para isso foi utilizado um enrolador para fixar um de seus lados, ele faria o ajuste necessário independente da posição em relação ao chão. (Fig. 14)

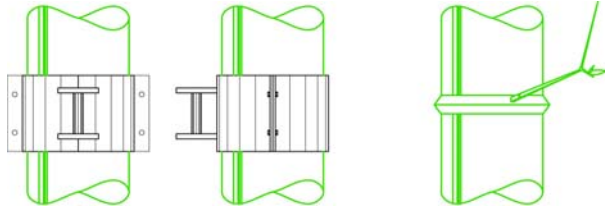


Fig.12: peças de sustentação do piso

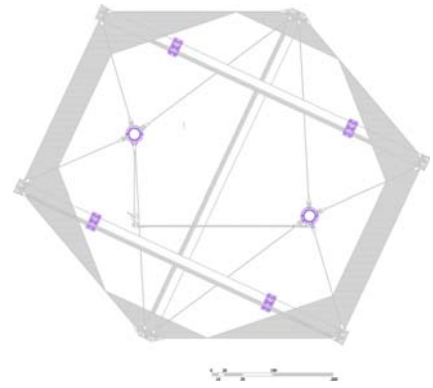


Fig.13: duas peças (em roxo) por tubos. Flexibilidade de posição

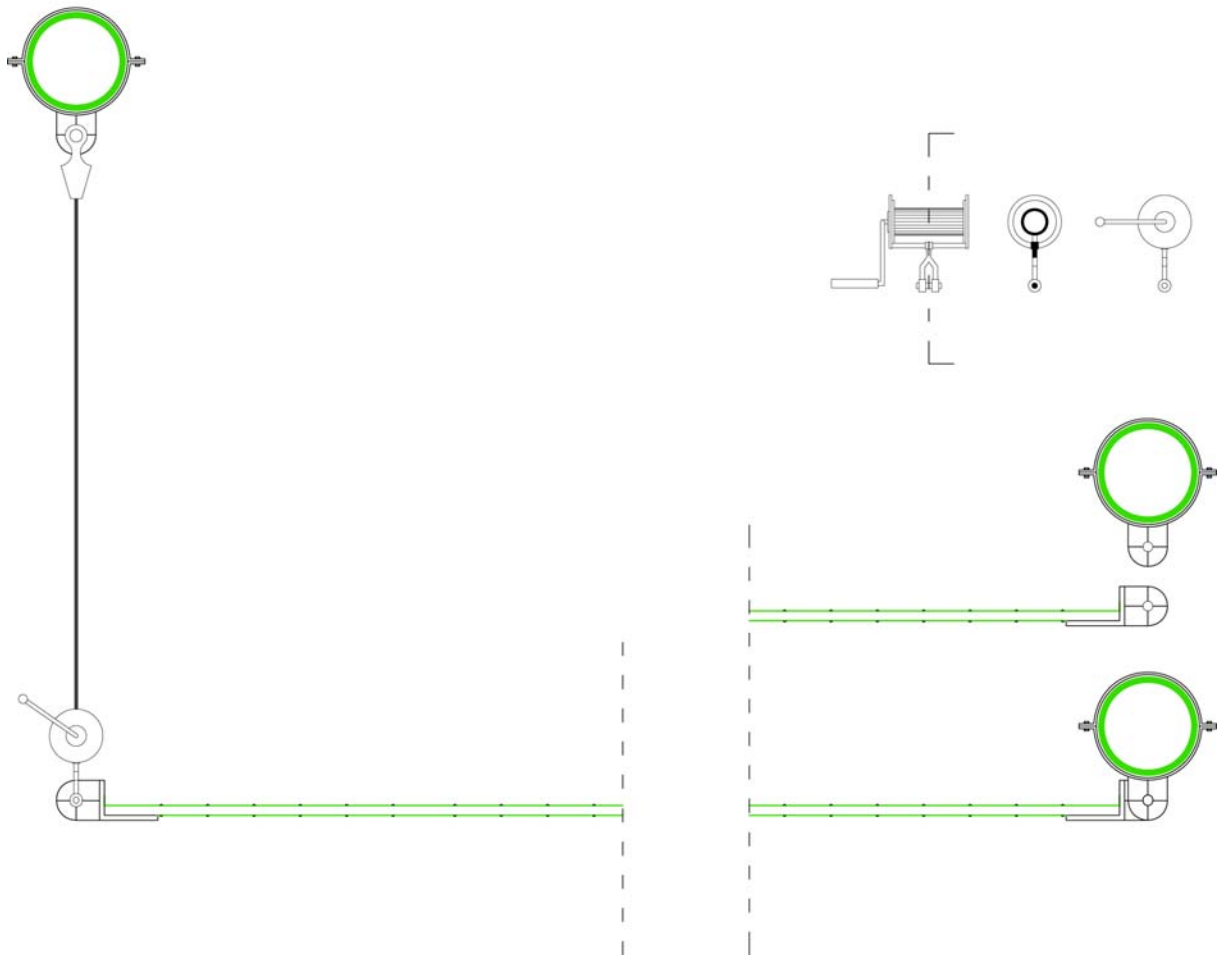


Fig.14: Conexão entre piso e tubo.

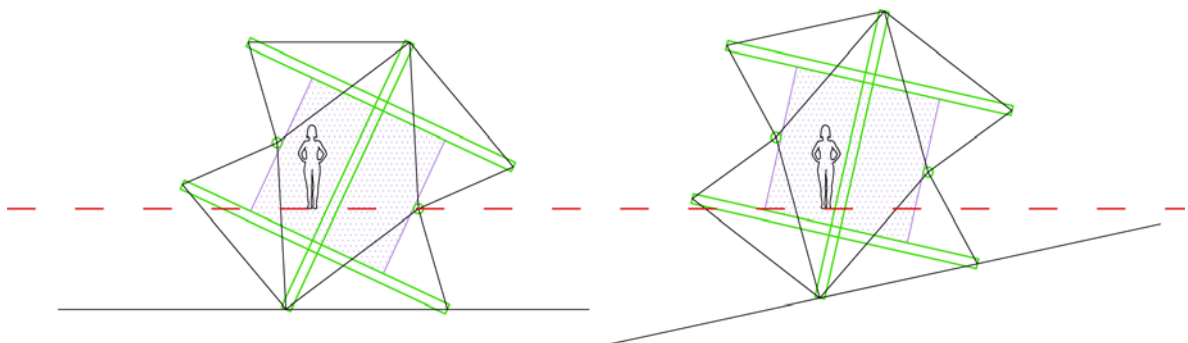


Fig.15: O enrolador garante o nível do piso independente do ângulo com o solo

4.3. Processo para se dobrar a estrutura

Os métodos existentes para dobrar estruturas Tensegrity são "strut mode folding" ou "cable mode folding". Para que o processo aconteça, no primeiro há a variação da dimensão das hastes, e no segundo dos cabos. Opta-se pelo segundo método pois modificar a dimensão das peças de bambu seria complicado e este método é considerado mais eficiente e tem tido melhores resultados. Utilizando o sistema desenvolvido por Pelegrino (1993) de "cabo ativo", (active cable) é possível dominar melhor a configuração e o processo de dobragem. Neste sistema um cabo contínuo passa por uma extremidade de cada haste. Este cabo seria afrouxado para introduzir os mecanismos finitos necessários para que a estrutura se dobre, ou por outro lado, seria puxado possibilitando que ela se desdobrasse. Para este Módulo de seis hastes, o sistema de "cabo ativo" leva à uma única geométrica dobrada possível (Motro, 2003). (Fig.17)

O cabo ativo passa por um sistema de polias (Fig.18), sendo a última com mordedor ou catraca. Esta impede que ele retorne após ser puxado, somente se desejado. Deste modo torna-se possível desdobrar o Módulo apenas por puxar o cabo ativo, sem se preocupar com sua fixação. Não corre-se o risco do cabo deslizar acidentalmente permitindo que a estrutura se dobre. Com este sistema, há a possibilidade, aqui proposta, do módulo ser atirado de sua posição dobrada para se desdobrar no ar, sem que seja preciso algum acompanhamento após sua largada. Uma das propostas visaria o abastecimento aéreo de áreas carentes, onde o cabo ativo fosse ligado a um sistema de pára-quadras de modo a ambos serem ativados no momento de seu lançamento pelo avião. Tal sistema já existe para pára-quadras, onde este é fixo no interior do avião e é ativado pela pressão exercida pelo peso do paraquedista ao pular.

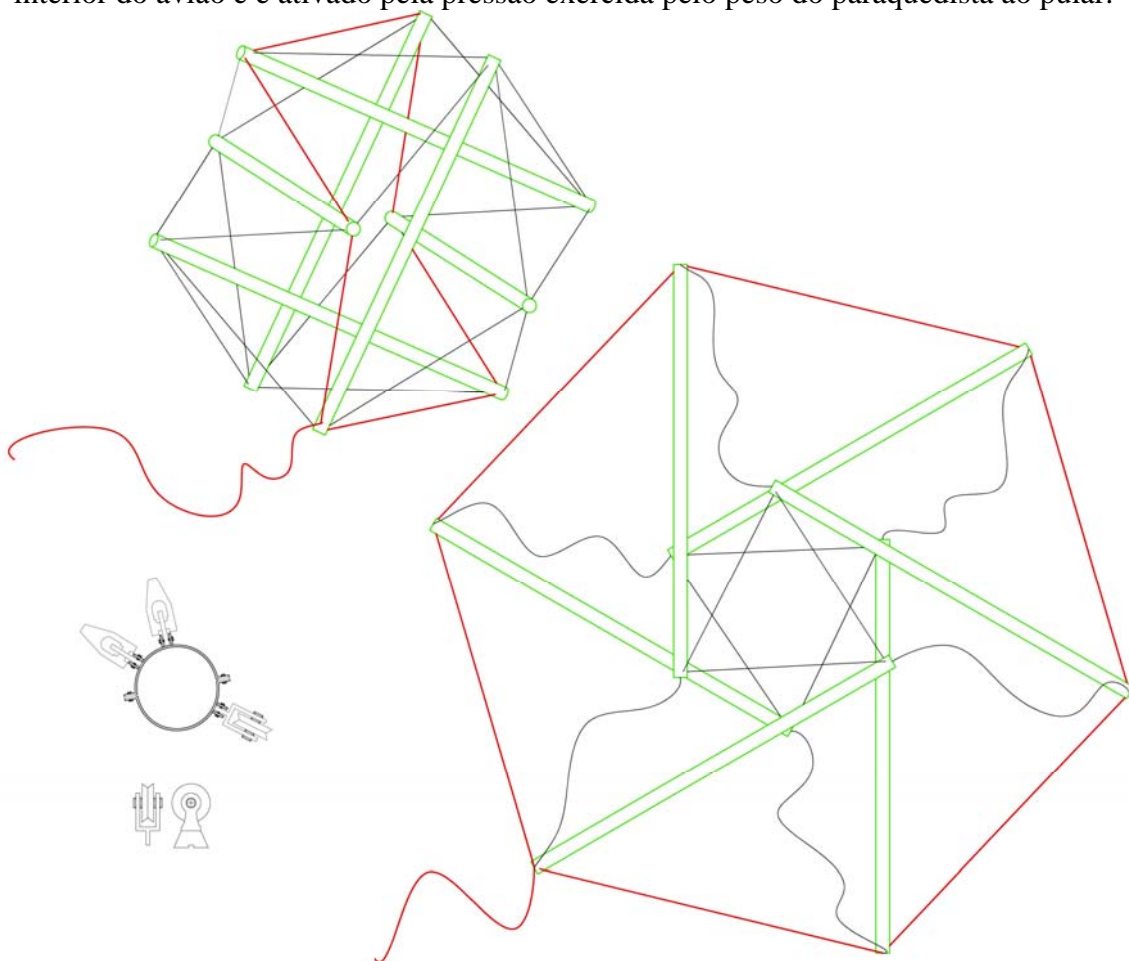


Fig.16: perspectiva "cavo ativo"; Fig.17: Planta :configuração dobrada; Fig.18: Roldana

5. Comentários finais

Vivemos em um mundo dinâmico e mutante à procura de soluções para a questão ambiental. É uma época que procura conscientização ecológica e deveríamos mudar nossa postura em relação ao modo como utilizamos os recursos do planeta. Cada vez menos há tolerância para o desperdício de consumo de energia e por isso aumentam o número de iniciativas no caminho oposto.

As características dos sistemas Tensegrity vão de encontro com a demanda contemporânea e são cada vez mais desejadas em estruturas. Estes sistemas podem ser a solução de diversos problemas – como a construção em áreas de terremotos – que vem sendo discutidos há bastante tempo. Sua adaptabilidade, a possibilidade de receber diferentes materiais e de funcionar em sistemas mistos, tem gerado bons resultados e abre o campo de atuação significativamente. Os novos estudos com ênfase na mudança da forma e no processo de dobragem são vistos como o futuro desta tecnologia, podendo substituir diversos sistemas estáticos já consolidados.

Quando é proposto um Tensegrity de bambu, verifica-se que os materiais naturais são uma alternativa concreta ao fabricados, e podem ser mesclados à alta tecnologia com ótimos resultados e eficiência. Ao estudar os trabalhos realizados por pesquisadores na área de materiais não-convencionais, vê-se que a utilização de materiais ecológicos na construção civil já é uma realidade, tomando cada vez mais espaço dentro do âmbito da engenharia e arquitetura. E cabe às novas gerações dar continuidade a tais linhas de pesquisa.

Este estudo mostrou a importância desta nova tecnologia e destes “novos” materiais, que estão sendo difundidos cada vez mais, porém que ainda são áreas onde há muitas variáveis a pesquisar. No modelo proposto do abrigo é necessário criar um protótipo e executar ensaios no laboratório para verificar seu desempenho mecânico. Deve-se aprimorar as ligações e testá-las junto aos cabos de aço.



Fig18: Módulos de Tensegrity de Bambu jogados de pára-quedas para abastecer áreas carentes.

6. Referências Bibliográficas

1. JÁUREGUI, V. G. **Tensegridad. Estructuras Tensegríticas en Ciencia y Arte**, Santander: Universidad de Cantabria, 2007.
2. DEIFELD, T. E. C. **Sobre a Análise e os Processos Construtivos das Estruturas Tensegrity**, São Paulo, 2005. 96p Título de Doutor (Especialização em Engenharia) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.
3. FULLER, R. B. **Tensegrity**, Portfolio and Art News Annual, No.4. pp.112-127, 144, 148. 1982.
4. MOTRO, R. **Tensegrity: Structural Systems for the future**, London: Kogan Page Science. 2003
5. FULLER, R. B. **Synergetics: Explorations in the Geometry of Thinking**, Colier Mamillan Publishers, London, 1995.
6. POUGH, A. **An Introduction to Tensegrity**, Berkeley, California: University of California Press. 1997
7. BRURKHARDT, R. W. **A Practical Guide to Tensegrity Design**, Cambridge (USA): Software Services. 1994
8. SCHLAICH, M. **The Messeturm in Rostock – ein Tesegrityrekord, Stahlbau**, Vol.72, No.10, PP.697-701, 2004.
9. TIBERT, G. **Deployable Tensegrity Structures for Space Applications**. Tese de doutorado não publicada. Royal Institute of Technology, Stockholm. 2002. Disponível em: <http://www2.mech.kth.se/~gunnar/TibertDocThesis.pdf>
10. TIBERT, G., PELEGRINO, S. **Form-Finding of Tensegrity Structures – A Review**, International Journal of Space structures, 2001.
11. VERSCHLEISSER, R. **Aplicação de estruturas de Bambu no Design de objetos. Como construir objetos leves, resistentes, ecológicos e de baixo custo**, 2008. 229p Título de Doutor (Especialização em Design) – Departamento de Artes e Design da PUC-Rio

12. GHAVAMI, K. **Desenvolvimento Alternativo para Construção da habitação de baixo custo: Bambu**; revista Debates Sociais – Pobreza & Desenvolvimento, Rio de Janeiro, Vol.27, No 52/53, pp119-132. 1994.
13. GHAVAMI, K., MARINHO, A. **Propriedades Mecânicas dos colmos dos Bambus das espécies: Mosó, Guadua Angustifolia para utilização na engenharia**. Publicação – RMNC-2 Bambu 02/2002, Departamento de Engenharia Civil Pontifícia Universidade Católica, Abril 2002.
14. GHAVAMI, K., MARINHO, A. **Propriedades físicas e mecânicas do colmo inteiro do bambu Guadua Angustifolia**. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.9, n.1. 2005
15. PETRONI, D.P.S. **Determinação das Propriedades dos Bambus das Espécies *Dendrocalamus giganteus* e *Guadua angustifolia* para Construção de Habitação de Baixo Custo**. Rio de Janeiro, 2005. 61p Iniciação Científica (Engenharia Civil com Ênfase em Estruturas) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.
16. GHAVAMI, K., BARBOSA, N. P. **Bambu**, capítulo 7 no livro *Materiais da Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais*. Editora IBRACON. ISBN 978-85576-190, 2007. PP 1559 - 1589

IV. Lista de Figuras

1. **Tensegrity:** <http://www.sheepish.org/itp/tensegrity/>
2. **Fuller e Tensegrity:**
http://www.boston.com/news/globe/ideas/articles/2005/10/23/buckys_world
3. **Escultura de Snelson.** *Easy Landing*, 1977: <http://www.kennethsnelson.net/icons/scul.htm>.
4. **Esquema de “Structure-Sculpture”** <http://justyna.adverhome.com/index.php?f=tensegrity>
5. **“X-Shape”** <http://www.grunch.net/snelson/rmoto.html>
6. **Patente 2, 3, 5 [1]** http://www.alumnos.unican.es/uc1279/table_of_contents.htm
7. **1ª Gríde de Motro, 2ª de Hanaor:** <http://justyna.adverhome.com/index.php?f=tensegrity>
8. **Blur Pavillion - Estrutura** http://www.arcspace.com/architects/DillerScofidio/blur_building/
9. **Blur Pavillion – Vista** http://www.arcspace.com/architects/DillerScofidio/blur_building/
10. **Easy-K Installation, 1970:** <http://www.kennethsnelson.net/icons/scul.htm>
11. **desenho de bambuzal:** <http://jornale.com.br/bambu/wp-content/uploads/2008/07/6186bambu3.jpg>
- 12 e 13. **Bambuzal**, retirada de: “Determinação das Propriedades dos Bambus das Espécies *Dendrocalamus giganteus* e *Guadua angustifolia* para Construção de Habitação de Baixo Custo.”[15]
14. **Diversos configurações geométricas.** Desenhado pelo autor
15. **Abrigo temporário** <http://www.shigerubanarchitects.com>
16. **Processo de montagem da torre.** Imagem em “The making of a Tensegrity tower”
17. **Torre de Rostock:**
<http://www.intania62.net/modules.php?name=Forums&file=viewtopic&p=396>
- 18 e 19. **Treliça espacial:** retirada do cap. 47 “Bambu”, livro “Materiais da Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais (2007)”.
20. **Painéis com bambu :** retirada do cap. 47 “Bambu”, livro “Materiais da Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais (2007)”
21. **Reforço no concreto:** retirada do cap. 47 “Bambu”, livro “Materiais da Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais (2007)”

22. Armadura de bambu : retirada do cap. 47 “Bambu”, livro “Materiais da Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais (2007)”

23. Bambu como forma permanente : retirada do cap. 47 “Bambu”, livro “Materiais da Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais (2007)”

24. Casa de bambu : retirada do cap. 47 “Bambu”, livro “Materiais da Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais (2007)”

25. Andaimos de bambu: <http://www.gadling.com/2007/07/20/gallery-asias-crazy-bamboo-scaffolding-2/>

26. Pavilhão ZERI desenhos: http://www.koolbamboo.com/large_structures.htm

27. Pavilhão ZERI vista : http://www.koolbamboo.com/large_structures.htm

28. Formas do balão: criada pelo autor

Observações:

1. Todas as figuras (Fig) apresentadas no capítulo 7 “Proposta – Módulo Habitável” e capítulo 8 “Conclusão” foram criadas pelo autor.
2. Todas as imagens foram coletadas dos sites no dia 12/08/09

V. Anexos

Anexo 1: A Torre Rostock

A Torre consiste na adição de módulos self-stressed de figuras iguais que podem ser conectados devido à rotação implicada à cada um destes módulos. São seis módulos iguais rotacionados de 8.3m de altura cada, feitos de três tubos de aço estabilizados por três cabos diagonais e três horizontais. Junto com a agulha de aço inoxidável do topo, a torre mede 62,3 m de altura. Neste projeto o grau do pré-tensionamento foi determinado pelo vento, pois a torre é tão leve que seu próprio peso pode ser negligenciado. A análise dinâmica começou estudando as vibrações da estrutura e, então, um estudo aerodinâmico foi desenvolvido para discernir a influencia do vento. A torre é fixada em uma base de concreto que providencia o peso necessário para prevenir que a torre voe. Em “The making of a Tensegrity tower”, Klimke e Stephan, apresentam todo o processo envolvido na construção desta torre, e detalham como os principais desafios, por exemplo, garantir a protensão, foram solucionados.

Após a conclusão, o engenheiro Mike Schlaich observou alguns pontos importantes (Jáuregui, 2007):

- É possível construir estruturas de Tensegrity de grande escala.
- Softwares de computador estão disponíveis que descrevem o desenho estrutural e a análise deste tipo de estrutura.
- Não é problema para as “construtoras” fabricarem e erigirem este tipo de estrutura com a precisão requerida.
- O caro custo do design adicional e processo de construção podem ser compensados pela economia de material e peso.
- O potencial de coberturas de Tensegrity é considerável. Neste campo muitas estruturas praticas, leves e graciosas ainda podem ser produzidas (Schlaich, 2004).

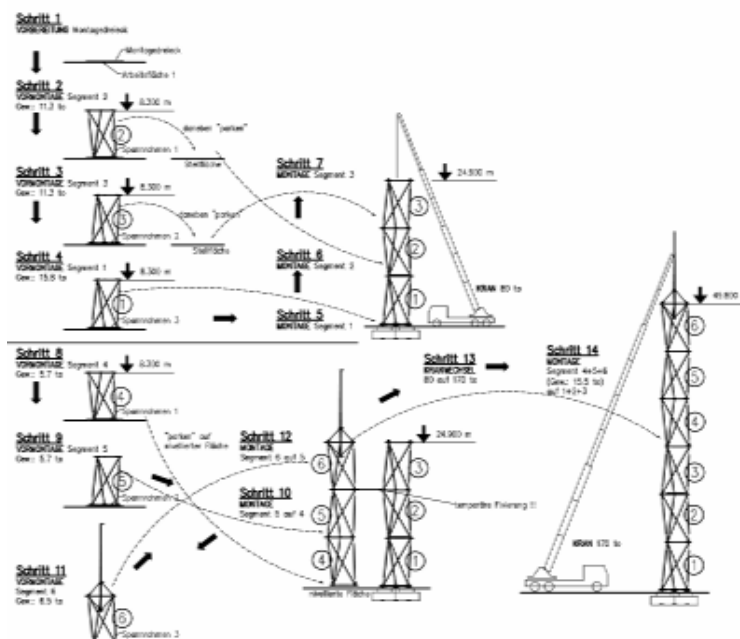


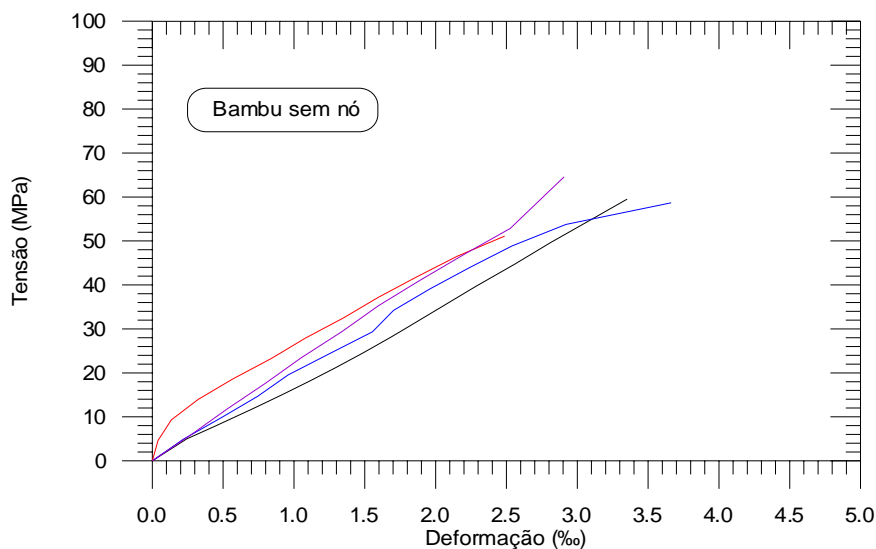
Foto 16: Processo de montagem da torre.



Foto 17: Torre de Rostock

Anexo 2:

A. Gráfico executado por Lima Jr., Dalcanal, Willrich e Barbosa em 2000 e retirado do capítulo 47 “Bambu” no livro Materiais da Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais (2007).



Curvas típicas tensão de compressão-deformação do bambu com e sem nó até carga máxima

B. Quadro das Propriedades Mecânicas de espécies de bambus estudados na PUC- Rio

Espécie/local		Tração				Compressão			
		Resist (MPa)		Módulo elast. E_t (GPa)		Resist (MPa)		Módulo elast. E_c (GPa)	
		c/nó	s/nó	c/nó	s/nó	c/nó	s/nó	c/nó	s/nó
<i>Bambusa multiplex</i> Disticha (RJ)*	Base	68,80	98,00	11,11	14,08	20,60	30,00	3,05	4,15
	Interm	-	-	-	-	-	-	-	-
	Topo	79,8	108,4	11,95	14,92	20,00	26,50	3,54	4,27
	Média	74,30	103,2	11,53	14,50	20,30	28,25	3,29	4,21
<i>Bambusa tuldoide</i>	Base	112,0	140,5	9,99	12,66	30,20	37,80	2,97	3,24
	Interm	-	-	-	-	-	-	-	-
	Topo	95,80	98,00	8,55	11,19	30,00	38,3	2,83	2,78
	Média	103,9	119,2	9,27	11,92	30,10	38,05	2,90	3,01
<i>Guadua superba</i>	Base	108,8	142,6	8,33	10,48	36,40	50,60	2,46	3,12
	Interm	-	-	-	-	-	-	-	-
	Topo	115,8	151,0	9,42	11,83	35,00	45,00	2,83	3,55
	Média	112,3	146,8	8,87	11,15	35,70	47,80	2,64	3,33
<i>Bambusa vulgaris Schard</i>	Base	131,6	176,4	8,46	10,02	37,50	53,00	2,59	2,86
	Interm	106,1	153,5	8,50	10,22	39,50	46,00	2,36	3,19
	Topo	145,6	182,0	9,45	12,67	42,00	59,00	2,80	3,67
	Média	127,7	170,6	8,80	10,97	39,66	52,66	2,58	3,24
<i>Dendrocallamus giganteus</i>	Base	106,8	147,0	12,98	19,11	58,66	56,61	12,07	15,29
	Interm	143,6	188,1	16,73	15,70	53,96	63,77	15,15	11,26
	Topo	114,0	157,6	13,44	10,71	54,04	72,87	9,79	10,41
	Média	121,5	164,2	14,38	15,17	55,55	64,42	12,34	12,32

Anexo 3:

Exemplos da utilização do bambu na engenharia e arquitetura.

- Treliça Espacial (Ghavami e Moreira, 1993).



Fotos 18 e 19: Treliça espacial

- Bambu como reforço interno de painéis revestidos com uma argamassa leve à base de cimento, cal e resíduos (de borrachas, de EPS, pedaços triturados do próprio bambu) (Cardoso Jr., Sartori e Silva, 2004)



Foto 20: Painéis com bambu

- O bambu como reforço no concreto em vigas de pequeno porte (Ghavami, 2001).



Foto 21: Reforço no concreto

- Varas de bambu usadas em pilares de concreto como armadura (Ghavami, 2005).



Foto 22: Armadura de bambu

- Bambu em lajes com forma permanente. Os colmos cortados ao meio e postos paralelos uns aos outros (Achá, 2002)



Foto 23: Bambu como forma permanente

- Casa em Itanhangá, Rio de Janeiro (1998) construída inteiramente com bambu, incluindo a decoração interna, divisórias e telhas.



Foto 24: Casa de bambu

- Andaimos utilizados em construções em Hong Kong



Foto 25: Andaimos de bambu

- Pavilhão da ZERI (Zero Emission Research Initiative) para Expo 2000 em Hanover, arquiteto colombiano, Simón Vélez.

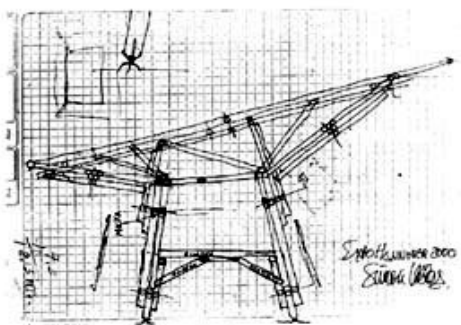
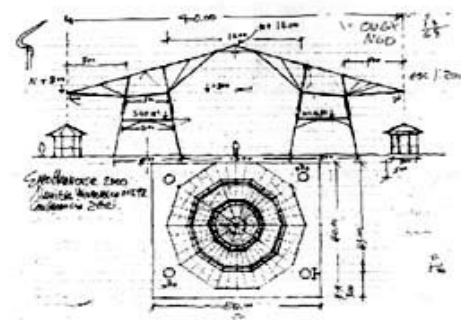


Foto 26: Pavilhão ZERI desenhos



Foto 27: Pavilhão ZERI vista

Anexo 4:

Analogia a um balão. (Motro, 2003)

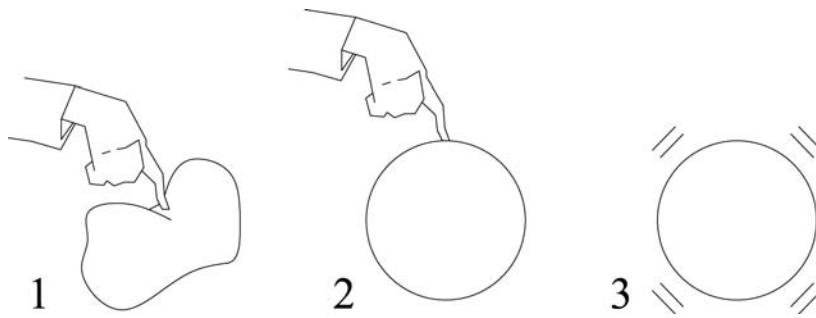


Foto 28: Formas do balão

No estágio 1: a membrana não está totalmente inflada, o balão não tem forma ou geometria conhecida

No estágio 2: A pressão de ar é idêntica tanto no interior como no exterior da membrana. O volume de ar é igual ao volume que cabe dentro do invólucro. Possui uma geometria equilibrada porém ainda não tem rigidez.

No estágio 3: A pressão interna é maior, o ar interior está sobre pressão e a membrana está tracionada. O volume de ar é maior do que o que cabe no interior do invólucro. A pressão confere uma rigidez ao balão, e o deforma levemente porém mantém sua forma inicial. Há um balanço entre a pressão do ar e a tensão na membrana.

Anexo 5:

Definições e Observações

1. Self-stress é a auto-tensão do sistema, decide-se por não traduzir pois acredita-se que o termo em inglês é mais significativo que os possíveis termos portugueses para a mesma condição

2. O movimento chamado de “mecanismos”, é aquele que acontece quando com a alteração de uma geometria há um movimento dos elementos que não requer energia. Quando as articulações podem mover-se livremente sem que haja variação nos comprimentos dos elementos, é chamado de *mecanismo finito*. Por outro lado, se houver variações, mesmo que muito pequenas, nos comprimentos, então o movimento é um “*mecanismo infinitesimal*”. A estabilização dos “mecanismos infinitesimais” pelos estados de pré-stress é uma característica fundamental dos sistemas Tensegrity.

3. Resiliência é propriedade do material de retornar à forma ou posição original após cessada a pressão sobre o mesmo.

4. Os Tensegrities podem ser entendidos como *sistemas* pois são compostos por um conjunto de elementos com um modo específico de agrupamento. Uma das definições do dicionário para *sistema*: “Combinação de partes reunidas para concorrerem para um resultado, ou de modo a formarem um conjunto: Sistema nervoso; sistema planetário.”