

## 4. Tensegrity

Até o último século, como já vimos no cap. 2, as técnicas e as filosofias de construção têm sido muito simples: Tudo ficava no lugar graças ao peso próprio, de tal maneira que as continuidades de esforços eram basicamente compressivas. Por exemplo: cada componente de um domo de pedra é "puxado para baixo" por meio de toda a sua estrutura, mas é a forma do domo que é responsável pela sua estabilidade.

Em domos de concreto, madeira ou aço o peso é bem menor porque podemos distinguir entre "pele" e "ossos", mas mesmo assim a continuidade compressiva é o principal responsável por manter a maior parte da carga.

Desde a metade do século XX têm-se aceitado o fato de que Tensegrity é um princípio estrutural novo e muito particular. Um dos seus aspectos exclusivos, surpreendentes e poucas vezes entendido, é o equilíbrio hastes(escoras), isoladas flutuando no ar. As pessoas se perguntavam: Como é possível estas se manterem nesta posição simplesmente ligadas por cabos?

As **estruturas tensegrity** se baseiam num princípio completamente diferente do convencional. Em vez de recorrer à estratégia do peso e suporte, elas são feitas como um **sistema de esforços omnidirecionais equilibrados** (Kenner,1976, citado por Valentim, 2005 p.43). Além disso, elas não precisam estar apoiadas (ou suportadas por fundações) uma vez que, são auto-equilibradas e pre-tensionadas de modo a não dependerem de fatores gravitacionais para o seu próprio equilíbrio.

A definição deste termo é essencial para a consideração de algumas estruturas tensegrity como **verdadeiras** e outras como **falsas**. Durante as duas últimas décadas muitas estruturas, sistemas e fenômenos naturais foram consideradas (qualificadas) como tensegrity quando, na verdade elas não o eram.

A palavra **Tensegrity** é uma invenção. Ela é formada pela contração Tensional-Integrity (Integridade Tensional).

Tensegrity descreve estruturas cuja forma é mantida por uma **malha** em estado contínuo de tensão.

Segundo Fuller: Tensegrity descreve um principio de relação estrutural no qual a forma da estrutura é garantida por um sistema abrangente, contínuo e fechado, de comportamentos tensionais e não pelos comportamentos descontínuos e exclusivamente localizados de elementos comprimidos.

Tensegrity oferece a capacidade de ceder progressivamente sem, basicamente, quebrar ou se despedaçar.

"Trabalhar com tensegrity ajuda a descobrir a geometria que permite à Natureza construir estruturas altamente eficientes e elegantes. Se utilizássemos nosso conhecimento tecnológico atual, bem como os recursos naturais disponíveis, com a mesma eficiência que a Natureza o faz, poderíamos elevar o padrão de vida de todos sem sacrificarmos os recursos naturais não renováveis. Nossa permanente habilidade de fazer, mais com menos, está nos trazendo ao ponto em que teremos bastante para todos neste planeta. O problema é que a grande maioria das pessoas não está consciente disto com a consequência de que nossas instituições sociais, políticas e econômicas ainda são baseadas num conceito inadequado de sobrevivência". (Sieden, 2000 p.103)

A integridade de toda a estrutura está fundamentada numa **rede** fechada e finita, de abrangência tensional e, de compressões em **ilhas** localizadas.

Ainda segundo Fuller, elementos de compressão muito alongados tendem a fletir e falhar. Compressões são desintegrações porque não são atômicamente sólidas, permitindo a penetração de energia entre as suas entidades separadas que se aglomeram invisivelmente (durante o ato da ação da compressão). À medida que o elemento comprimido tende a fletir, o ponto onde isto ocorre se torna o fulcro de uma alavanca e o resto superior do elemento comprimido age como braço da mesma alavanca tornando-se cada vez mais efetivo na função de acelerar a falência do elemento, esmagando primeiro o lado interno do ponto onde está acontecendo a ação. A penetração acelerada pela ação da alavanca chega à dispersão precessional quando chega a 90°.

Segundo Horácio Macedo, no seu Dicionário de Física Ilustrado: "**Precessão** é o movimento que o eixo de rotação de um corpo que gira, sujeito à ação de um par externo, executa em torno de um outro eixo." (Macedo 1976 p.278)

Quando um corpo rígido efetua um movimento de rotação, sob a ação de um **par**<sup>1</sup> externo a direção do eixo de rotação é invariável se o suporte do vetor do par coincide com o eixo.

Se esta coincidência não ocorrer, e o eixo puder ser deslocado, o corpo gira em torno dele, que por sua vez, gira em torno de um segundo eixo fixo.

É o que acontece, por exemplo, com um pião girando com a ponta apoiada num plano horizontal; o torque resultante do seu peso faz com que o seu eixo descreva uma superfície cônica de eixo vertical. (Macedo, 1976 p.278)

1 **"Par/ Torque** (Conjugado de Torção) *Mec.* Sistema constituído por duas forças de mesmo módulo, paralelas, com sentidos opostos e suportes distintos, que agem sobre um mesmo corpo. Provoca a rotação do corpo em torno de um eixo e é equivalente a um vetor axial cujo suporte é este eixo." (Macedo, 1976 p.255)

Buckminster Fuller pensou que se você fornece a tecnologia que eficientemente vai de encontro às necessidades dos seres humanos você pode influenciar, profundamente, os seus valores com a consequência que as instituições mudariam gradualmente para refletir estes novos valores. Esta é a base da sua "Revolução da Ciência do Design". Segundo Fuller, **tensegrity** é uma ferramenta que te induz a participar na revolução da Ciência do Design na medida em que te permite modelar a geometria dos princípios encontrados nas eficientes estruturas naturais.

#### 4.1. Tensegrity-Algumas Analogias

Desde o nascimento da "compressão flutuante", termo cunhado por Snelson há 50 anos atrás, tem-se procurado por explicações mecânicas e estruturais, com o fim de encontrar analogias para entender os princípios da tensegrity de uma maneira mais clara.

As mais comuns têm sido a comparação entre Tensegrity e Estruturas Pneumáticas.

Segundo Valentim(2005 p. 44), muitos dos principais autores envolvidos com pesquisas em tensegrity, a saber: Fuller(1961,1975b e 1982); Kenner (1976); Pugh(1976); Edmonson (1987); Snelson e Von Bayer(1987); Motro (2003); Burkhardt (2004), admitem que: construções infláveis são tensegrity porque são sistemas auto-equilibrados, compostos por um componente tênsil externo que engloba os átomos de gasolina que se comportam como componentes descontínuos em estado de compressão. Ambas: tensegrity e pneumáticas, são estruturas leves, comprimíveis, expansíveis, auto-balanceadas, elásticas e distribuidoras de cargas.

No entanto, quando lidamos com tensegrities propriamente ditas levamos em conta componentes comprimíveis outros que gás e ar. Desta forma as pneumáticas são apenas extensões da definição apropriada. Neste trabalho os membros principais serão hastes e cabos utilizados para compressão e tensão, respectivamente.

Uma segunda analogia para explicar os conceitos fundamentais da Tensegrity é a comparação com a roda raiada. Fuller recorria sempre a este exemplo porque ele pensava que, com isto, inaugurava uma nova era de pensar em termos de *tensão contínua* e *compressão descontínua*.

Ao contrário do que muitos pensam o sistema principal de transferência de carga de uma roda raiada não está nas forças de compressão suportadas pelos raios verticais atuando na base do aro; na verdade a carga axial da roda, aplicada sobre o eixo, está suspensa nos raios vindos do topo do aro, trabalhando em tração. O efeito é que a ovalização, procurada pelo aro, não acontece porque os raios horizontais não permitem mantendo-o sempre integralmente em compressão e, portanto, perfeitamente circular.

Resulta daí que; tanto para as estruturas pneumáticas quanto para as estruturas tensegrity a Gravidade fica num plano secundário, quando se trata de estabilidade.

A técnica de construção a ser proposta aqui se baseia na aplicação dos princípios da estrutura construída por Tensegrity, traduzida para o português, como: Estrutura Auto-tensionada, mesma forma usada pelos franceses que a descrevem como Structure Auto-tendante.

Um dado muito importante, sempre a ser lembrado é que uma estrutura auto tensionada é auto-portante o que quer dizer **que não precisa de fundações para existir e realizar seu trabalho**. Ela é universal na natureza apresentando características de resistência, leveza, economia de material e simplicidade.

## 4.2. Tensegrity-Breve Histórico

Tensegrity é um sistema estrutural, descoberto muito recentemente (há 50 anos apenas), com o qual é possível criar formas surpreendentes que resultam em um aglomerado de escoras (hastes) unidas por cabos, flutuando no espaço.

Este tipo de estrutura, por ser ainda pouco estudada, faz com que o conhecimento do seu mecanismo e princípios físicos não estejam bem difundidos nem aceitos pela maioria dos arquitetos, designers e engenheiros. Portanto, durante ainda um bom tempo, muitas e muitas horas de pesquisas e polêmicas estarão presentes no futuro próximo até o momento da sedimentação dos seus princípios.

### 4.3. Tensegrity - Origens

Três pessoas são consideradas inventoras da Tensegrity: Kenneth Snelson, David Georges Emmerich e Richard Buchminster Fuller. No meu entender, para dar os créditos, vale a ordem histórica e não a que coincide com a chegada, no domínio público, das três entradas de pedidos de patentes de invenção que, no caso, aconteceram de maneira inversa, a saber: Fuller em 13/11/1962; Emmerich em 28/09/1964 e Snelson em 16/02/1965.

Apesar de os três se considerarem inventores, **Renè Motro** (2002) lembra que foi Emmerich o primeiro a informar sobre o sistema de proto-tensegrity criado por um artista lituano chamado **Karl loganson** em 1920 com o nome de "Gleichgewicht Konstruktion" (Construção Equilibrada).

Sabe-se que loganson exibiu um prisma tensegrity na exposição Concretista em Moscou no período de 1920 a 1921. Os originais foram destruídos pelo movimento revolucionário que estabeleceu o comunismo na Rússia, mas, as fotografias, exibindo a obra na exposição, sobreviveram. Pela imagem pode-se deduzir que o conjunto se compunha de três hastes conectadas por sete cabos manipuláveis por um oitavo cabo, que permitia alterar a configuração do sistema.

Em 1921 loganson descreveu sua motivação com as seguintes palavras:

"Da pintura à escultura, da escultura à construção, da construção à tecnologia e invenção - este é o meu caminho e vai ser certamente o objetivo de qualquer artista revolucionário". (Robbin Tony: A New Architecture, Ed. Yale University Press, 1966 como citado em **Arbeitsblatter "Tensegrity"** da Universidade de Munique, 2002 p.3)

Mas, Valentim (2005 p.7) aponta para o fato da ausência da pré-tensão, que é uma das características do sistema tensegrity, não nos autorizando portanto, a achar a Estrutura-Escultura de loganson como sendo a pioneira (a ancestral) das estruturas tensegrity.

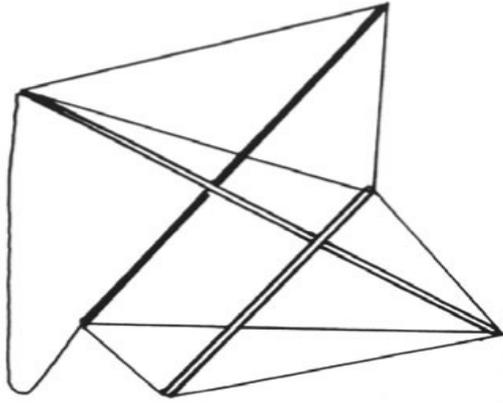


Figura 27: Escultura de Karl Moson (1921)

O ponto mais controverso aqui foi a disputa, que durou mais de trinta anos, entre Snelson e Fuller. Por intermédio de Valentim (2005 p.7) vamos saber que Snelson, numa carta que enviou a Renè Motro e que este publicou no International Journal of Space Structures, conta que foi aluno no Black Mountain College em 1948, onde assistiu às aulas sobre modelos geométricos ministradas por Bucky. Influenciado pelas lições de Fuller, ele começou a desenvolver algumas esculturas, dentre as quais estava uma que ele chamou de "Módulo X," que ele mais tarde consideraria a primeira estrutura tensegrity da história.

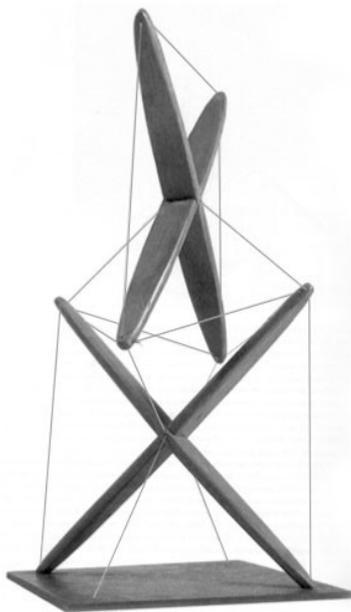


Figura 28: Módulo X original de Snelson (Arquivo Kenneth Snelson)

Quando ele mostrou o módulo X para Fuller para pedir uma opinião este percebeu de imediato que ali estava a resposta, a solução para muitos anos de procura. Nas palavras de Fuller (1961) " Por vinte e um anos, antes de conhecer Kenneth Snelson, eu venho revirando os conceitos da Tensegrity. Apesar da minha descoberta, classificação e desenvolvimento de ambas: uma geometria vetorial multi-dimensional e da Tensegrity tri-dimensional, eu não fui capaz de integrá-las no sentido de descobrir uma Tensegrity simétrica multi-dimensional para quatro, cinco e seis eixos".

Ao mesmo tempo, mas independentemente, o húngaro vivendo em Paris, David Georges Emmerich, provavelmente inspirado pela estrutura de loganson, começou a estudar diferentes tipos de estruturas com prismas tensesis e outros sistemas mais complexos que ele chamava de "structures tendues e autotendues" (estruturas tensionadas e auto tensionadas).

Como resultado ele definiu e patenteou suas "malhas autoportantes" que eram exatamente os mesmos tipos de estruturas que vinham sendo estudadas por Fuller e Snelson.

#### **4.4. Tensegrity - A Controvérsia**

Apesar de, no começo, Fuller mencionar Snelson como o autor da descoberta, ele, depois de algum tempo passou a se referir à dita estrutura como sendo: "minha Tensegrity". Na verdade foi ele que cunhou o termo Tensegrity à partir da contração de "Tensional-Integrity" fazendo as pessoas acreditarem que a invenção tivesse sido sua. Como escreveu Snelson em várias publicações:

"Criando este nome estranho Fuller usou-o como estratégia para se apropriar da idéia como sendo sua".

No início Fuller reconhecia os créditos de Snelson mas, com o correr do tempo, ele deixou de mencionar o seu ex-aluno, pedindo até para ele ficar no anonimato por algum tempo pois, ele era mais jovem e teria tempo para colher louros no futuro! (carta de Snelson a Motro, já mencionada). Mesmo assim Fuller nunca deixou de achar que, se ele não tivesse catalizado as idéias de Snelson, a Tensegrity jamais teria sido inventada como uma estrutura nova e útil.

A "exatidão das informações" como dizia Snelson para não mencionar a "batalha de egos", continuou até 1980 quando Fuller escreveu uma carta de 28 páginas em resposta à carta, de uma página, de Snelson. Nestas cartas eles procuraram esclarecer a autoria da descoberta e não do inventor, porque como Fuller argumentava: "Inventores não podem inventar os eternos princípios das leis cósmicas do Universo". Paradoxalmente, segundo Valentim (2005 p.9), Bucky patenteou estas leis universais em 1962.

Afinal quem inventou a Tensegrity? É evidente que a resposta não é evidente! Na opinião de Valentim Gómez Jaureguí (2005 p.10) a Sinergia (termo usado com tanta frequência por Fuller) desenvolvida por ambos, professor e aluno, resultou na palavra **Tensegrity**. Como Valentim tirou de Stephen Kurtz: "Se Fuller admite a sua dívida com Snelson pela invenção do princípio da Tensegrity, Snelson, da mesma forma, reconhece a sua dívida ao trabalho visionário de Fuller".

#### **4.5. Tensegrity - Evolução**

Após um breve reconhecimento público no MOMA (Museu de Arte Moderna de Nova York), Snelson voltou a trabalhar em Tensegrity como escultura evitando mergulhos muito profundos na física e na matemática devido, à sua formação de artista plástico, e, na sua opinião, na dificuldade de aplicação dos sistemas tensegrity no desenvolvimento de objetos úteis, não artísticos como em desenho de Produto e Arquitetura. Além do mais, a construção de um sistema tensegrity requer uma técnica fina e delicada que ele vem aperfeiçoando ao longo de décadas, gerando uma ciência e uma arte muito próprias. Algumas pessoas afirmavam que Snelson é o único capaz de realizar suas esculturas (construções).

Neste mesmo período, Fuller e Emmerich trilhavam por outro caminho estudando as tipologias de tensegrity possíveis, especialmente sistemas esféricos(domos) e uni-dimensionais (torres e mastros).

Eles o fizeram utilizando modelos e experimentos empíricos, como suas ferramentas principais e , diferentemente de Snelson, procuraram por possíveis aplicações na arquitetura e na engenharia.

"Pouco depois de ver as esculturas de Snelson (Dragon e Needle) Bucky estudou algumas composições simples e produziu uma família de quatro mastros Tensegrity caracterizados por terem, respectivamente: três, quatro, cinco e seis faces. Fuller também descobriu aquilo que ele chamou de "Icosaedro tensegrity de seis hastes ilhadas" (octaedro expandido).

"Subseqüentemente este trabalho foi continuado por outros autores que criaram sistemas tensegrity como: o "equilíbrio de vetores" (cubo-octaedro), a "esfera tensegrity de trinta ilhas"(icosaedro), a "tensegrity de seis tetredros tensegrity ilhados"( tetraedro truncado) e a "octatensegrity de três ilhas". Como consequência disto uma hierarquia de estruturas tensegrity principais foi criada e as leis abrangentes de se estruturar com tensegrity universal, se completaram". Valentim (2005 p.11).

Bucky fez também várias tentativas de projetar domos geodésicos em tensegrity (apesar de estes não apresentarem estabilidade por falta de triangulação) e patenteou alguns dos seus trabalhos ligados ao assunto. No entanto a aplicação da tensegrity não foi tão bem sucedida como ele pensava. Ele jamais conseguiu produzir a cúpula tensegrity para cobrir o centro da cidade de Nova York e teve que optar pela cúpula geodésica, sem tensegrity, para abrigar o pavilhão dos Estados Unidos na Expo-Montreal no Canadá, em 1967.

Dai em diante, pessoas influenciadas pelo trabalho de Fuller, começaram a explorar este novo sistema estrutural e sua possível aplicação em design, arquitetura e engenharia.

Renè Motro um dos mais importantes especialistas em Tensegrity no presente, publicou, em 1973, um documento interno no Laboratório de Engenharia Civil na Universidade de Montpellier na França, Intitulado: *Topologie des structures discrètes. Incidence sur leur comportement mécanique. Autotendant icosaédrique*. Este documento se referia ao comportamento mecânico deste tipo de estrutura. Segundo Valentim (2005 p.14) o laboratório de Montpellier e o seu diretor Renè Motro, tornaram-se referencias mundiais em termos de estudos sobre tensegrity.

Alguns anos depois, em 1976, Anthony Pugh e Hugh Kenner, ambos da Universidade da Califórnia, em Berkley continuaram este tipo de pesquisa enveredando, cada um, por dois caminhos diferentes. Pugh escreveu a "Introdução à Tensegrity" que é interessante pela variedade de modelos que define e uma rigorosa classificação e tipologia que apresenta. Kenner, por sua vez, publicou a "Matemática Geodésica e como utilizá-la", excelente obra que

nos ensina a calcular "até qualquer grau de precisão" os detalhes pertinentes à geometria de estruturas geodésicas e tensegrity, regulares (comprimentos e ângulos do sistema estrutural) além de explorar seus potenciais.

Embora este último trabalho seja mais explícito em termos de assuntos geométricos e matemáticos ele falha no que concerne ao comportamento da tensegrity submetida à cargas.

Mais tarde, em meados dos anos 80, Robert Burkhardt iniciou uma investigação, em profundidade, mantendo inclusive correspondência com Fuller no sentido de obter mais detalhes sobre a geometria e matemática da tensegrity.

Vinte anos depois ele publicou uma obra, muito completa e útil que ele revisa regularmente e dispõe na Internet, com o título "A Practical Guide to Tensegrity Design" (Burkhardt 1994-2004).

Recentemente vários trabalhos têm dado volume ao corpo de conhecimento sobre Tensegrity. Vamos aqui apresentar uma seleção dos mais relevantes feita por Valentim Gomés Jáuregui (2005 p.15).

**Connely e Black** (1998) focalizaram a sua procura numa generalização tri-dimensional para Tensegrities. Utilizando as ferramentas matemáticas da Teoria de Grupos e da Teoria da Representação, além das capacidades oferecidas pelos computadores eles produziram um catálogo completo de tensegrities com a prescrição, detalhada, dos tipos de estabilidade e simetria, incluindo algumas que nunca foram vistas.

Outros autores como: Pedretti, S. Pellegrino, A.G. Tilbert, A.M.Watt, W.O. Williams, D. Williamson, R.F. Skelton, Y.Kono, Passera e outros que estudaram e publicaram trabalhos sobre a física, a matemática (dos pontos de vista: geométricos, tipológicos e algébricos) e a mecânica das estruturas tensegrity.

No entanto, afora os autores mencionados acima e os trabalhos de René Motro e seu grupo em Montpellier, não se tem notícia, até os dias que correm, de outros trabalhos tentando aplicar este novo conhecimento a qualquer campo em particular.

Bucky continuou procurando por algo mais abrangente e abstrato, mais genérico, algo que fosse capaz de se tornar uma Lei Universal Maior.

Ele nunca recusou aplicar tensegrity em campos técnicos, mas na sua opinião "Tensegrity era a base do Universo", onde macro e micro-cosmos, os sistemas solares e os átomos eram estruturados pelos princípios da Tensegrity.

"Este esquema de esferas isoladas em compressão, que são somente mantidos agrupados pela atração das massas, também caracteriza as integridades estruturais do núcleo atômico. As descobertas na tensegrity introduzem princípios estruturais novos e muito diferentes que parecem ser aqueles que governam toda a estruturação de ambos os Universos: macro e microcósmicos" (Fuller em *Synergetics*, 1975, 713.08)

"Todas as estruturas devidamente compreendidas, desde o sistema solar até o átomo, são estruturas Tensegrity. O Universo é integridade omnitensional".

( Fuller em *Synergetics*, 1975 - 700.04)

A escrita de Bucky, o Fullerês não era fácil de ler, o leitor precisava de alguma prática para transformar aquela linguagem, quase codificada, em textos simples e de simples digestão.

Assim, decodificando os trechos relativos ao assunto discutido acima, aprendemos que, de acordo com as idéias expostas em *Synergetics*, a compressão obriga os componentes de uma estrutura de ampliarem a cintura da sua parte central para evitar a falência estrutural até se chegar à deformação máxima que é a esfera, considerada por Bucky de ser a melhor forma de suportar cargas.

De uma maneira inversa os elementos sob tensão não precisam de muito material, especialmente aqueles recentemente descobertos que são fortes e resilientes capazes de resistir à enormes cargas com uma secção muito pequena. Fuller achava que não tinha limite para a cintura dos cabos. Assim poderíamos ter grandes extensões de cabo sem ameaça de ruptura. Ele transfere este raciocínio para o Universo onde a atração entre os planetas ( que no caso são as hastes) pode ser realizada por este "cabo" sem diâmetro. Desta maneira a Terra, a Lua e todos os elementos do Universo estão invisivelmente unidos entre si.

Numa outra escala, Bucky estava convencido de que a atração atômica (especialmente a interação invisível entre átomos, núcleos e elétrons) era um outro tipo de tensegrity, onde compressão e tensão estão sempre separadas mas coexistentes.

Em contraste com esta opinião, a de Kenneth Snelson é muito clara:

"Sim, Fuller declarou que tudo no universo era tensegrity. As estruturas Tensegrity são estruturas pré-tensionadas e endoesqueléticas -- e tal restrição deixa de fora um sem número de itens. Como eu também disse em algum lugar, se tudo é tensegrity então tensegrity não é nada em particular; assim sendo onde está a razão de se usar esta palavra?" (Valentim , 2005 p.18)

Seguindo a linha de Bucky outros autores como Wilken (2001) compararam a estratégia de "puxar e empurrar" aplicada pela Natureza em organismos vivos (incluindo vegetais e plantas), para descrever as três categorias possíveis de a vida procurar por tensegrity: **1)** na radiação fotosintética onde o sol empurra e as plantas puxam; **2)** na relação presa predador onde a fêmea está continuamente atraindo e o macho descontinuamente empurrando e, finalmente, **3)** na relação professor-aluno onde o primeiro atrai conhecimento novo e o segundo empurrando este conhecimento para outros.

Concluindo é possível afirmar que, dependendo da definição da palavra tensegrity é possível transladar seus princípios a uma grande gama de fenômenos. Assim sendo: Estruturas, Sistemas, Esculturas, Organismos anatômicos, relações e interações entre diversos elementos do meio ambiente podem ser consideradas tensegrity. Mas é necessária uma definição clara e concisa para evitar confusão, como veremos adiante.

#### **4.6. Tensegrity como Princípio Universal**

As origens da tensegrity estão ligadas à escultura, subsequentemente à arquitetura e matemática e atualmente a engenheiros civis e mecânicos tentando pesquisar suas propriedades e aplicações. Contudo neste meio tempo alguns cientistas a começar por Snelson e Fuller concebiam a tensegrity como o princípio básico do Universo, do microcosmo ao macrocosmo, como uma resposta a uma questão geral a respeito da natureza e da estrutura. Ou melhor, a estrutura da Natureza.

##### **4.6.1. Tensegrity no Macro e no Microcosmo**

Com a finalidade de se fazer a transposição da tensegrity para assunto outro que o dos materiais torna-se necessário estabelecer alguns conceitos importantes. A Tensegrity só pode ser considerada como um princípio estrutural se ela o faz correspondente a um campo particular de forças em equilíbrio estável sob uma distribuição precisa dos elementos componentes e com a

condição de que o "continuum" de tensão esteja sempre cercado as "ilhas" ou componentes em compressão. A **compressão** e a **tração** podem, por exemplo, ser associados com **repulsão** e **atração** respectivamente, o que é muito conveniente para exemplos atômicos e gravitacionais( Motro, 2003).

Snelson sempre exemplificava as conexões por meio da tensegrity como sendo: **1)** na Astronomia (um planeta com o Sol); **2)** na Física Atômica (o elétron com o núcleo; e **3)** na Mecânica (um cabo a uma haste).

#### **4.6.1.1. Tensegrity na Biologia**

Neste caso a contribuição maior vem de Donald E. Ingber (1998), professor de Patologia na Escola de Medicina em Harvard. Observando a elasticidade das células ocorreu a Ingber que visualizar uma célula como uma estrutura tensegrity poderia facilmente explicar tal fenômeno.

"Um modelo tensegrity de uma célula sugere que o citoesqueleto da célula pode ser alterado alternando-se equilíbrio das forças físicas transmitindo através da superfície da célula."

Ingber descobriu que não apenas as células , mas também uma grande variedade de sistemas naturais são construídos seguindo um modelo tensegrity. Neste caso ele cita: átomos de carbono; moléculas de água; proteínas; vírus, tecidos e outros tipos de criaturas vivas.

#### **4.6.1.2. Tensegrity e a Química Inorgânica**

De acordo com Valentim (2005, p.33), até recentemente parecia que apenas a química orgânica (células, vírus, pólen, grãos, moléculas d'agua, átomos de carbono ou buckminsterfullerenes, vitaminas, proteínas, etc.) dominava o princípio da tensegrity; as coisas inorgânicas, aparentemente não tinham o benefício deste princípio. No entanto, é interessante saber hoje que, de acordo com novas descobertas, mesmo as coisas inorgânicas podem ser baseadas na "Compressão Flutuante".

Alguns autores propuseram um novo modelo tensegrity para um silicone amorfo ( a-Si:H) consistindo de agentes tensivos e compressivos que agem para redistribuir globalmente os efeitos de defeitos criados localmente. Isto leva a mudanças de volume que parece que foram experimentalmente corroborados por medições. Como resultado será possível, no futuro, construir novas estruturas e substâncias heterogêneas.

#### 4.6.1.3. Tensegrity na Anatomia

É muito comum ver o termo tensegrity aplicado à biomecânica e, especialmente à anatomia. Por meio do emprego de modelos, vários especialistas fazem uso do termo para explicar a relação entre músculos, tendões e ossos, em animais e humanos. Estes especialistas argumentam que o esqueleto não é somente um chassi de suporte ao qual se ligam músculos, ligamentos e tendões, mas um conjunto de componentes, comprimidos, suspensos numa rede contínua de tensão.

A primeira referência à tensegrity, neste assunto foi proposta por Stephen M. Levin no início dos anos 80, quando ele publicou a obra "Tensão Contínua, Compressão Descontínua. Um modelo do Suporte Biomecânico do Corpo".

Neste livro ele foca as suas reflexões no sistema da coluna vertebral em particular e no resto do corpo, em geral.

"...Podemos ver, em estudos anatômicos diretos, que o sistema tensegrity é utilizado em dois dos pontos (juntas) de suporte mais importantes do corpo humano, a saber: as juntas escapulotorácicas e as juntas sacroilíacas. Forças externas aplicadas ao sistema são dissipadas através dele protegendo as "ligações frágeis". A força de 200 libras de um impacto do calcanhar de um atleta corredor, por exemplo, não poderia ser absorvida apenas pelos "os calcis" mas tem que ser distribuída pelo sistema de absorção de choques, por todo o corpo" (Levin, 1982) conforme citado por Valentim)

Na última frase é feita a referência a uma das maiores propriedades do sistema tensegrity, a saber, a sua capacidade de distribuir forças, portanto absorvê-las (amortecê-las) por todo o sistema em uso.

Finalmente sabe-se (Valentím, 2005 p.35) que foi recentemente proposto que o sistema nervoso central também funciona como uma estrutura tensegrity. De acordo com um pesquisador (Wilken, 2001) os neurônios sensoriais estão sempre percebendo informações (atração contínua) enquanto os neurônios motores estão apenas ocasionalmente envolvidos em alguma ação motora (repulsão descontínua).

Resumindo, pode-se concluir que "Compressão Flutuante" (Floating Compression) é, do ponto de vista de alguns especialistas, algo mais do que simplesmente uma estrutura espacial feita de hastes e cordas.

Segundo Valentím (2005 p.35), Tensegrity tem sido utilizada para denominar as versões modernas de alguns movimentos chamados "passes mágicos" (uma série de estiramentos, e movimentos meditativos) desenvolvidos por Shamans nativos da América do Norte, porque conotam as duas forças de impulsão dos passes mágicos (Castanheda, 1990). "Tensegrity tornou-se um princípio básico da Natureza e foi aplicada a tantos campos da Ciência que talvez esteja perdendo seu significado central." (Valentím, 2005 p.35)

#### 4.7. **Tensegrity - Princípios Básicos**

Por muitos anos alguns autores têm tentado achar uma "definição definitiva" que seja inequívoca e aceita por toda a comunidade científica. É essencial especificar, precisamente, o que é uma estrutura Tensegrity, porque, dependendo de diferentes definições, nós seremos capazes de considerar alguns tipos de estruturas como sendo **verdadeiras** e outras como **falsas** tensegrities.

O termo tensegrity tem sido usado incorretamente para denominar qualquer tipo de estrutura baseada em componentes comprimidos e tensionados. Obviamente isto é um erro, uma vez que tensegrity é um princípio muito distinto.

#### 4.7.1.

#### Definições e caminhos propostos pelos principais Especialistas

Apresento aqui algumas diferentes soluções encontradas para mostrar a evolução da análise destes sistemas e as definições que daí resultaram.

As primeiras e mais significativas descrições de tensegrity, como já vimos, foram feitas pelos autores das patentes, a saber: Fuller, Snelson e Emmerich, tentando descrever o que haviam descoberto. É lógico que naqueles tempos era difícil generalizar e achar uma definição universal que fosse capaz de sumarizar uma entidade tão complexa quanto a Tensegrity.

##### 4.7.1.1.

##### Kenneth Snelson

Arquiteto americano que, na sua época de estudante desenvolveu pequenos estudos entre os quais o famoso **módulo X**, muito antes de o princípio da tensegrity ter nascido. Foi este trabalho aliás que atraiu o interesse de Buckminster Fuller para desenvolver o princípio tensegrity. Mais tarde Snelson realizou grandes construções como as esculturas "Needle Tower", com 30 metros de altura, no Smithsonian Institute em Washington DC.(1968) e "Easy Landing" em 1977 em Baltimore que é uma combinação de módulos torcidos que se estende horizontalmente por aproximadamente 25 metros apoiada em apenas três pilares delgados de concreto.

É de Kenneth Snelson a expressão "**floating compression Tensegrities**" (compressões tensegrity flutuantes).

Snelson, talvez mais claro em sua definição declarou no documento de patente em 1964, que:

"A presente invenção se reporta à uma armação estrutural, mais particularmente, à uma nova e aperfeiçoada estrutura de membros alongados, colocados separadamente em tensão ou em compressão, para formar uma treliça, onde os membros em tensão estão separados entre si e os membros em tensão interconectados para formar uma rede em tensão".

Mesmo preferindo chamá-las "estruturas de compressão flutuante" ele as descreveu mais tarde, em 2004, como segue:

"Tensegrity descreve um sistema estrutural fechado composto por um grupo de três ou mais escoras alongadas de compressão dentro de uma rede de cabos em tensão, sendo que as partes combinadas são mutuamente suportivas de tal modo que as hastes (escoras) não se tocam mas pressionam para fora contra pontos nodais da rede de tensão para formar uma unidade de tensão e compressão firme, triangulada e pré-estressada (pre-tensionada)".

#### 4.7.1.2.

#### **Richard Buckminster Fuller**

Num artigo chamado "Tensegrity," publicado em 1961, explicou profusamente, como era do seu estilo, os princípios e principais conceitos que governam os sistemas de integridade tensional, mas sem conseguir uma definição curta e precisa. Dizia ele que: "em tensegrity os elementos comprimidos se tornam pequenas ilhas num mar de tensão". Mais tarde, em Synergetics (1975b 700.001), ele explica mais extensivamente que: "Tensegrity descreve um princípio de relação estrutural no qual a forma é garantida pelo comportamento tensional finito e fechado, abrangentemente contínuo, do sistema e não pelos componentes dos membros, de uma forma descontínua e exclusivamente compressional local."

Foi Fuller que reconheceu o potencial das esculturas de Snelson e desenvolveu um grande número de sistemas básicos em tensegrity objetivando sua aplicação na construção espacial leve.

Bucky também construiu dentro do princípio tensegrity uma grande quantidade de cúpulas geodésicas. Na construção destas cúpulas ele procurou aplicar hastes com comprimentos iguais formando superfícies congruentes, por meio da projeção de um icosaedro na superfície de uma esfera (ver 3.3.1).

Esta malha espacial pode ser subdividida até quase atingir a forma de uma esfera permitindo a construção de grandes domos cobrindo uma grande área em vão livre e sem hierarquias nos seus elementos. Assim nasceram os fascinantes "Geodesic Tensegrity Domes", domos geodésicos em tensegrity.

Tratam-se de construções formadas por anéis de diâmetros decrescentes que vão sendo apoiados seqüencialmente sobre cabos estendidos no topo dos anéis anteriores. Com isto consegue-se com cada novo anel um ganho de altura. A força de compressão entre os cabos que se cruzam é absorvida pelo anel em si ou por hastes colocadas sobre os mesmos.

Todo o sistema descarrega a convergência das forças sobre um grande anel estrutural apoiado no solo.

#### **4.7.1.3. David Emmerich**

Outro pai da tensegrity, declarou, no ato de requerer a patente, que sua invenção poderia mais adiante ser descrita de uma maneira não limitativa com referência a muitos exemplos mostrados em desenhos anexos quando da declaração para patente. Com este artifício ele evitou a difícil tarefa de dar explicações estritas (rigorosas).

Emerich foi o primeiro que pensou num método de construção utilizando módulos rotacionados (dextrógiros e levógiros) de elementos em tensegrity. A sua patente foi requerida em 1964 na França e se referia a uma construção de uma rede espacial aplicando dois ou mais prismas em tensegrity, empilhados. Ele pesquisou também a possibilidade de se estabelecer a localização mais eficiente das hastes de compressão numa construção bem como a otimização dos seus comprimentos.

#### **4.7.1.4. Anthony Pugh**

Apresentou uma caracterização da tensegrity, que foi quase aceita universalmente pelos especialistas, devido à sua adaptação compacta de uma definição mais extensa, possivelmente a primeira da sua espécie:

"Um sistema tensegrity se estabelece quando uma série de componentes, descontinuadamente compressivos, interagem com um conjunto contínuo de componentes tensionados para definir um volume estável no espaço."

#### **4.7.1.5. Daniel L. Schodeck**

Descobriu que uma definição baseada em redundâncias e graus de movimento dariam uma informação mais precisa e próxima do que acontece numa estrutura tensegrity. Assim ele formulou a seguinte definição:

"Tensegrities são estruturas rígidas constituídas por hastes descontínuas em compressão e cabos contínuos em tensão nas quais cada componente tem um grau de redundância".

#### 4.7.1.6. Ariel Hanaor

Estudou a construção de estruturas de dois pavimentos bem como cúpulas construídos por tensegrity como alternativas para as construções convencionais deste tipo.

Ele concluiu que as estruturas planas convencionais ainda são mais rígidas que as suas similares em tensegrity, mas que as cúpulas formadas por unidades octaedrais são tão fortes quanto as construídas tradicionalmente.

#### 4.7.1.7. Renè Motro

Motro desenvolveu um sistema estrutural composto por duas camadas de malhas tensegrity sobrepostas formadas por cabos de mesmo comprimento. A malha de cima fica no sentido inverso da de baixo. Estas malhas são interconectadas por hastes em diagonal de comprimentos iguais. Na parte inferior se encontram quatro hastes por nó e na superior duas hastes por nó. Assim resultam duas estruturas portantes que interagem por meio de hastes de compressão diagonais. (Entrar com ilustrações)

Uma vantagem desta construção está no fato de ela ser mais ordenada e com melhor distribuição de carga do que em sistemas fechados convencionais

**Motro** (2003) tentou distinguir dois conceitos diferentes, a saber:

Definição baseada em patentes:

" Sistemas tensegrity são reticulados espaciais em estado de auto tensão. Todos os seus elementos têm uma fibra central reta e são de dimensões equivalentes. Os elementos tensionados não tem rigidez sob compressão e constituem um conjunto contínuo. Os elemento comprimidos constituem um grupo descontínuo. Cada nó recebe um e somente um elemento comprimido".

Na outra descrição, que tem alguns pontos em comum com a de Anthony Pugh, mas tem fatores adicionais, os elementos comprimidos estão incluídos **dentro** de um conjunto contínuo em tensão e o sistema tem uma **estabilidade auto-equilibrada**.

Assim na Definição Extendida, Motro diz que:

"O sistema tensegrity é um sistema em um estado de auto-equilíbrio compreendendo um conjunto descontínuo de componentes comprimidos dentro de um *continuum* de componentes tensionados."

#### **4.7.1.8. Gernot Minke**

Minke dividiu as estruturas tensegrity em sistemas **abertos** e **fechados**, desenvolvendo uma série de definições que foram ilustradas pelos alunos e professores da Universidade Técnica de Munique (TUM Arbeitsblatter, 2002 p.5), a saber:

##### **4.7.1.8.1. Sistemas Tensegrity Abertos**

Sistemas tensegrity abertos precisam, para serem estáveis, descarregar as forças no solo ou em construções secundárias que resistam ao seu peso próprio a aos esforços externos.

A vantagem dos sistemas abertos é que os elementos de compressão não precisam estar na diagonal como nos sistemas fechados. Por esta razão é possível ter-se nestes sistemas hastes de compressão mais curtas com seções transversais menores.

##### **4.7.1.8.2. Sistemas Tensegrity Fechados**

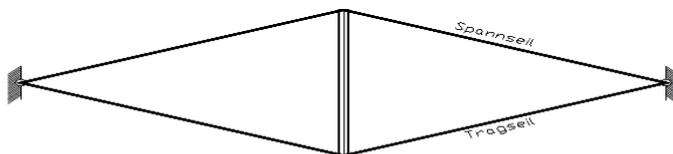
Os sistemas tensegrity fechados são estáveis independentemente dos seus apoios (lembrar da escultura horizontal de Snelson). A característica do sistema fechado é que as hastes de compressão, descontinuadamente ordenadas, se sobrepõe em qualquer sistema estável independentemente dos seus apoios. Os sistemas fechados se destacam pelo fato de que as hastes de compressão podem se cruzar em qualquer direção desde que não se toquem.

Quando falamos em hastes que não se tocam estamos falando do "**legítimo**" sistema tensegrity.

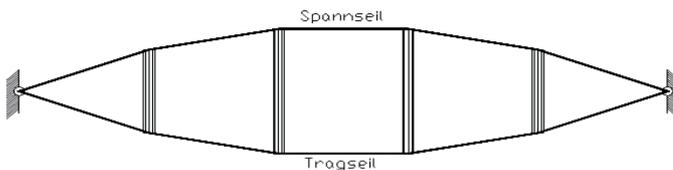
### 4.7.1.8.3. Sistemas Tensegrity Planos e Abertos

Segundo Gernot Minke (2002 p.6), sistemas tensegrity planos são considerados, antes de mais nada conectores de cabos.

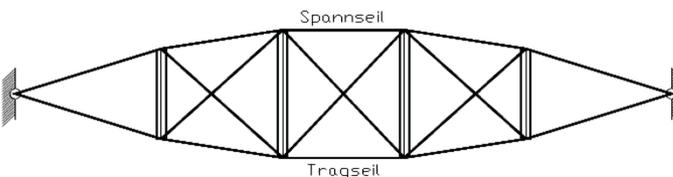
O primeiro sistema, mais simples, é aquele em que dois cabos ancorados em duas superfícies opostas são mantidos afastados por uma haste comprimida colocada entre os dois. O cabo inferior é chamado de cabo comprimido e o superior de tensionado. Numa ação vertical a carga no cabo inferior aumenta, ao passo que, no cabo superior a tensão é aliviada.



Tipo A



Tipo B



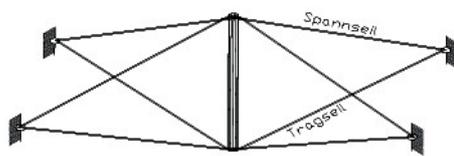
Tipo C

O segundo sistema apresenta quatro hastes de compressão de comprimentos diferentes dois a dois, isto é, dois mais curtos nas extremidades e dois mais longos no meio, colocados equidistantemente entre si, entre os cabos que, como no primeiro caso, distribuem a carga vertical pelo conjunto. Neste caso as hastes podem ser deslocadas ao longo dos cabos sem provocar muitas deformações.

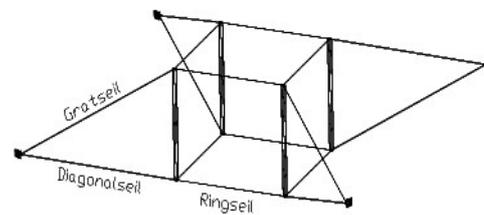
No terceiro tipo, os campos formados entre as hastes são treliçados por cabos diagonais. Esta providência aumenta em muito a resistência à deformação do conjunto uma vez que as hastes não podem ser movidas.

#### 4.7.1.8.4. Sistemas Tensegrity Espaciais e Abertos

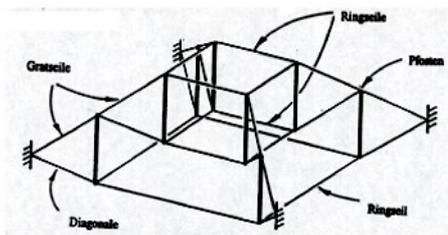
O sistema tipo A, aqui mostrado, é um exemplo simples de sistema tensegrity espacial aberto composto de quatro cabos e uma haste comprimida. Neste caso, da mesma maneira como no tipo de sistemas tensegrity planos, os cabos inferiores têm sua carga de compressão aumentada ao passo que os cabos de cima têm sua tensão aliviada.



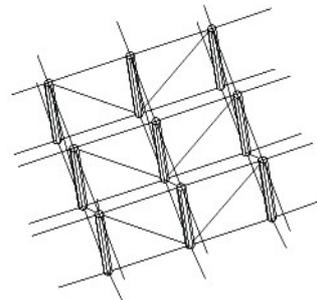
Tipo A



Tipo B



Tipo C



Tipo D

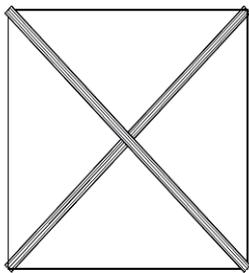
No tipo B temos um sistema composto por quatro hastes de compressão suportadas por dois anéis de cabos que, por sua vez são apoiados em dois cabos diagonais ancorados nos respectivos pontos de apoio. Se substituirmos os quatro pontos de compressão por uma grande quantidade de pontos localizados num anel circular teremos a roda raiada da bicicleta, formando uma estrutura fechada.

Este tipo de estrutura é denominada por Minke (2002 p.7) como sendo de **Ordem 1**, como veremos adiante.

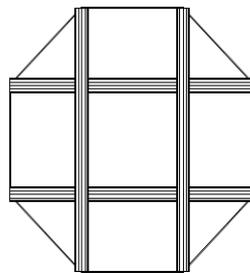
No tipo C as hastes em compressão colocadas gradativamente sobre outros cabos de suporte, ancorados em hastes mais afastadas, chega-se à formação de uma pirâmide. Se como em B substituirmos os quatro pontos de apoio por anéis circulares chegaremos ao módulo básico dos chamados "Cable Domes".

O tipo D é um sistema tensegrity espacial plano em que a malha superior, bem como a malha inferior e as diagonais são formadas por cabos protendidos amarrados às hastes de compressão colocadas na posição vertical e espaçadas igualmente.

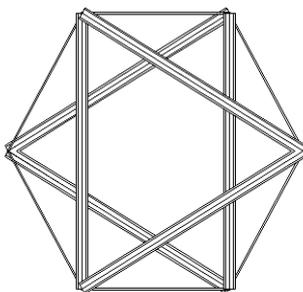
#### 4.7.1.8.5. Sistemas Tensegrity Planos Fechados



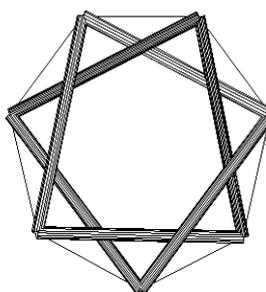
Tipo A



Tipo B



Tipo C



Tipo D

Os sistemas tipo A e B resultam do cruzamento ortogonal de formas geométricas simples. Os vértices da geometria são determinados pelas extremidades dos cabos de compressão.

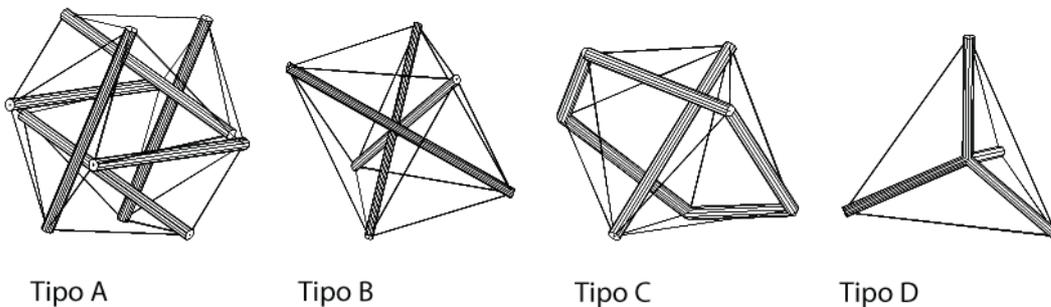
Nos sistemas C e D, como se trata de polígonos estrelados não temos um sistema tensegrity puro uma vez que as extremidades das hastes se tocam formando uma espécie de anel de compressão. Assim sendo, as hastes não representam um subsistema descontínuo de hastes de compressão, mas é importante mostrá-los para o bom entendimento do assunto.

#### 4.7.1.8.6. Sistemas Tensegrity Espaciais Fechados

Neste caso a posição específica dos elementos comprimidos é uma característica estrutural destes sistemas.

##### 4.7.1.8.6.1. Sistemas Tensegrity de Ordem 1

São sistemas nos quais duas ou mais hastes de compressão se encontram no mesmo plano.



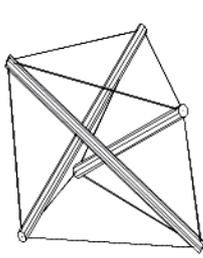
Os sistemas tensegrity espaciais desta ordem tem as suas hastes se entrecruzando, sem se tocar, dentro do espaço de um sólido determinado pelos cabos externos que formam as arestas deste sólido.

As figuras são determinadas pela geometria dos sólidos de origem, os sistemas simétricos se desenvolvem a partir da protensão igual dos cabos pertencentes aos mesmos grupos.

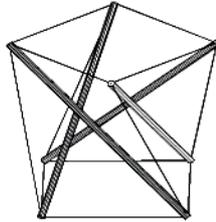
Nos sistemas tipo C e D acontecem contatos entre hastes, razão pela qual não são consideraddos como sistemas tensegrity no sentido da palavra.

#### 4.7.1.8.6.2. Sistemas Tensegrity de Ordem 2

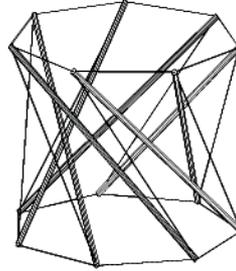
São sistemas em que as hastes de compressão estão individualmente em planos diferentes.



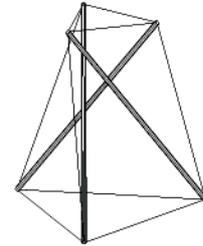
Prisma 3 Arestas



Prisma 4 Arestas



Prisma 7 Arestas



Pirâmide 3 Arestas

Os elementos de compressão dentro de uma unidade estão posicionados em uma ordem giratória de tal modo que, nunca, mais de um elemento está no mesmo plano sendo isto chamado por Minke(2002 p.8) de "twistelage", plano de giro.

Elementos de giro são constituídos por dois planos poligonais opostos e regulares de 3-4-5-6, etc, lados. Estes elementos são uma das bases de formação dos sistemas tensegrity espaciais fechados. As arestas dos corpos (poliedros) são constituídas por cabos tensionados inclinados entre si.

Pode-se distinguir entre corpos prismáticos ou piramidais dependendo do tamanho e da variação entre o topo e a base destes poliedros.

**Leis de Formação para Poliedros Tensegrity** (segundo Gernot Minke, 2002 p.8).

Entre polígonos do mesmo tamanho pode-se transladar os lados de um dos polígonos no mesmo plano e rotacionar na superfície até se chegar a posição do outro.

No caso de polígonos de tamanhos diferentes pode se recorrer à dilatação da figura (no mesmo plano).

Quando se rotaciona os dois polígonos (topo e base) existe um ponto único em que os cabos que conectam os vértices dos mesmos atingem a sua dimensão mínima. Nesta posição o elemento em tensegrity estará todo ele igualmente tensionado e portanto estável.

#### 4.8. Tensegrity-Características Gerais

Se a definição de tensegrity, de Renè Motro,(ver item) exposta acima, é aceita como sendo suficientemente compreensiva e concisa para definir o termo é possível distinguir entre **verdadeira e falsa tensegrity** devido às suas características respectivas.

Valentim (2005 p.40) escreve que, em vista disto, seria possível, de acordo com Motro, estabelecer os seguintes pontos:

**Sistema:** Em relação à teoria dos sistemas ela tem: componentes (dois tipos, em compressão e em tensão); estrutura relacional (entre os diferentes componentes), estrutura total(associando estrutura relacional com características dos componentes) e forma, (projetada em um sistema tri-dimensionado referenciado).

**Estado estável auto-equilibrado:** Estável porque o sistema pode reestabelecer seu equilíbrio após um distúrbio e, Auto-equilibrado porque não precisa nenhuma outra condição externa, pois é independente das forças externas (mesmo da Gravidade), ou ancoragens, devido ao seu estado inicial de pré-estressada. "Ela é estável mesmo em órbita." (Valentim 2005 p.41)

**Componentes:** em contraste com o termo "elemento" pode ser uma escora, um cabo, uma membrana, um volume de ar, uma montagem de componentes elementares, etc.

**Componentes Comprimidos ou Tensionados:** em vez de componentes de compressão e tensão porque a chave é que todo o componente tem que ser comprimido ou tensionado dependendo da sua classe.

**Tensão Contínua e Compressão Descontínua:** porque os componentes comprimidos tem que estar desconectados, enquanto os componentes tensionados criam um "oceano" de tensão contínua.

**Por Dentro:** Este é um ponto crucial, uma vez que vai permitir a diferenciação entre dois tipos de estruturas, a saber: as convencionais, onde a compressão é a base do suporte de carga, e as tensegrities, onde este papel é representado pela tensão.

Com a finalidade de evitar sistemas controversos, tais como no caso dos toros circulares onde existem diferentes "dentros" e "foras", Motro define um sistema como sendo tensegrity quando todos os seus componentes comprimidos estão dentro do sistema, e, um elemento comprimido está dentro do sistema quando as suas extremidades não pertencem à periferia(envoltório). Assim, num sistema tensegrity as linhas de ação contidas na superfície envolvente são linhas de tensão.

#### 4.9. Tecelagem a mãe da Tensegrity (Snelson, 2007)

Com o título acima, Kenneth Snelson divulgou um documento muito interessante que vê a tecelagem como **mãe** da estrutura Tensegrity (<http://www.grunch.net/snelson>). Segundo Snelson a invenção da arte de tecer revela, de uma maneira direta, as propriedades básicas e universais das estruturas da natureza, a saber: modularidade, simetria helicoidal, Dextrógira e Levógira e uma geometria estrutural elementar. São **duas e somente duas** as estruturas fundamentais numa tecedura: **o tecer padrão em duas direções**, composto de trama e urdimento, em direções ortogonais, que gera módulos quadrados como os encontrados nos tecidos em geral, e o **tecer em três direções** formando padrões hexagonais como os encontrados com enorme frequência na cestaria. Apesar de se conhecer grande variedade de combinações, estas são as únicas formas primárias.

Quando se tece dois fios passando um sobre e/ou sob o outro, cria-se uma mini estrutura em forma de cruz. Snelson afirma que, quando tecemos uma haste sobre outra criam-se duas diagonais no cruzamento destas hastes: uma no sentido dos ponteiros do relógio, gerando um movimento helicoidal direito, e outra no sentido contrário aos ponteiros que ele chama de helicoidal esquerdo.

"Esta ocorrência, juntamente com o magnetismo com suas polaridades norte/sul, electrons e positrons é a essência do sistema binário. Esta dualidade, que ocorre em todo cruzamento de hastes, nos ensina a primeira lição sobre estruturas. O fenômeno helicoidal tem um papel vital na determinação de como as coisas se conectam". (Snelson 2007.)

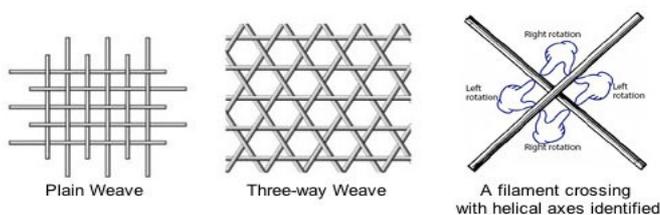


Figura 29: Malhas produzidas por tecelagem em dois e três sentidos

No tecido de três fios, ou hastes, as aberturas hexagonais se alternam com as triangulares. Esta tecelagem pode ser direita ou esquerda. Se os hexágonos são formados na direção dos ponteiros do relógio os triângulos resultam na direção oposta e vice-versa.

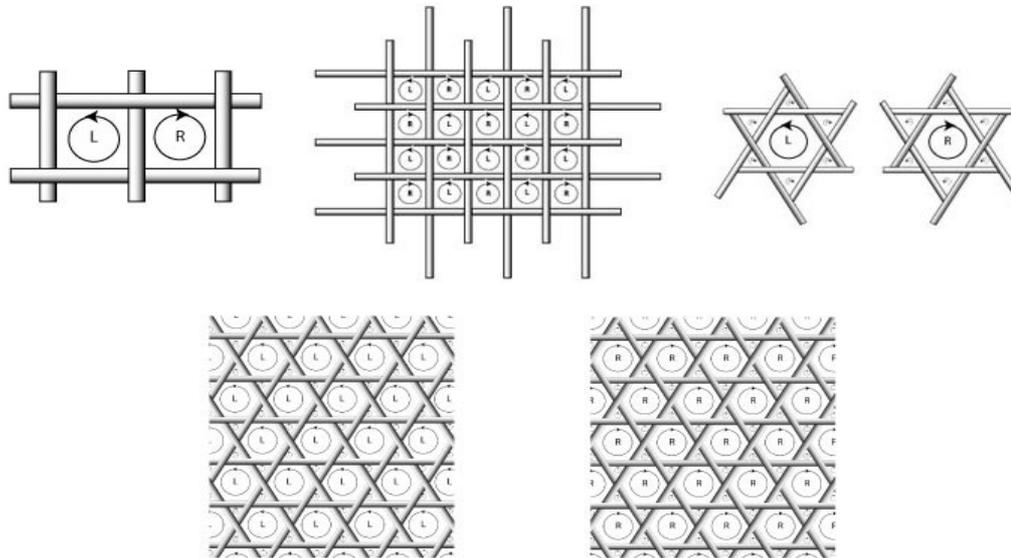


Figura 30: Giros Dextrogiros e Levogiros que ocorrem nas tecelagens

#### 4.9.1. As cinco células básicas do tecer

Aqui são mostradas as unidades celulares do tecer. A célula pentagonal é usada somente no tecimento de esferas de cestaria ou cestas de curvaturas compostas.

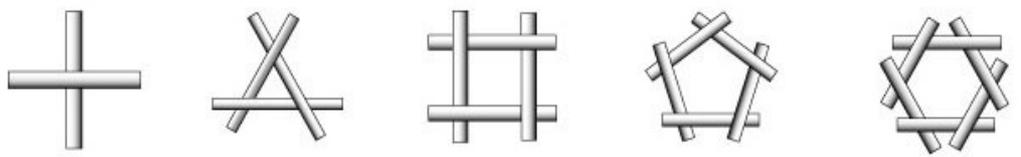


Figura 31: As cinco células básicas do tecer de cabos ou hastes



Figura 32: Esfera Tailandesa tecida com rattan, onde se percebe na sua superfície, módulos triangulares, pentagonais e hexagonais

#### 4.9.2. Estruturas de colunas tecidas

As três colunas mostradas por Snelson<sup>2</sup> aqui tem uma identidade com o trançado sendo que na coluna da direita, que é uma **estrutura tensegrity**, as hastes não se tocam, isto é não são conectadas ente si.



Figura 33: Da esq. para dir.: Respectivamente, uma coluna de vinil tecida, malha extensível fabricada com fios metálicos e uma coluna tensegrity com os seus padrões das tramas de cabos e hastes.

2 "Tecer, nos seus padrões planos familiares existe desde o início da civilização. Nenhum artefato sobreviveu para nos dizer onde ou quando os humanos descobriram esta arte magnífica; de usar tiras de couro ou hastes finas passando-as ritmicamente por cima e por baixo de outras para gerar objetos utilitários de todos os tipos. Inventar a tecelagem deve ter sido realmente extraordinário!" (Snelson, 2007)

### 4.9.3. Comparação entre poliedros convencionais e poliedros tecidos

As células de tecidos mostradas até agora se referem a polígonos como triângulos quadrados, etc. Mas, é possível gerar sólidos tri-dimensionais por tecelagem resultando em tetraedros, octaedros, etc. que têm hastes rígidas por arestas.

Pelo fato de sofrerem um desvio helicoidal quando se cruzam nos vértices dos sólidos formados, as hastes reproduzem no espaço todas as características das células tecidas no plano formando uma figura tri-dimensional.

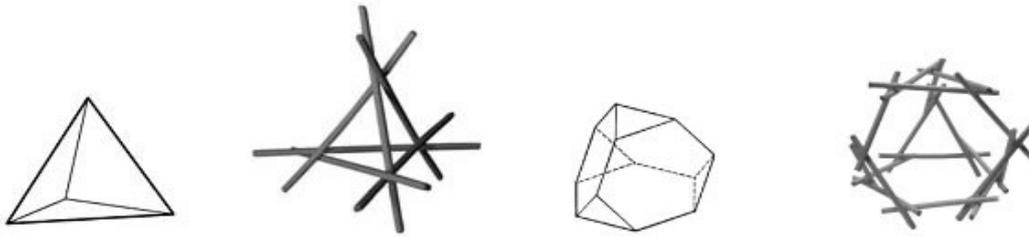


Figura 34: Poliedros regulares - Tetraedro Regular (esquerda) e Tetraedro Truncado (direita)

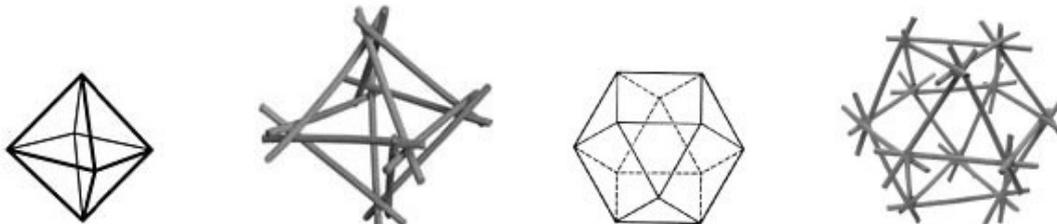


Figura 35: Poliedros regulares - Octaedro Regular (esquerda) e Cuboctaedro (direita)

### 4.9.4. Tecelagem <----> Tensegrity

De acordo com Snelson, **Tecelagem** e **Tensegrity** têm os mesmos fundamentos, a saber: a alternância das direções helicoidais (direita/esquerda) e as mesmas teceduras nas direções: a favor e contra os ponteiros do relógio.

Nas figuras abaixo, as do lado esquerdo mostram filamentos tecidos e os da direita os seus correspondentes em tensegrity onde os filamentos foram substituídos por hastes rígidas ligadas por cabos. É importante notar que em todos os casos, os tensegrities resultantes mantêm sua forma original, bem como, os movimentos helicoidais.

Os cabos de tensão individuais (fios, cordas, arames) estão amarrados às extremidades das hastes de modo que cada montagem apresenta um sistema fechado de partes tensionadas e partes comprimidas. Cada cabo de tensão se conecta individualmente às extremidades de duas hastes sem passar para o outro lado (como fios de um colar). **Eles param e são amarrados às respectivas extremidades das hastes.** As linhas assim são esticadas fazendo pressão sobre as extremidades das hastes de modo a formar **uma rede contínua de tensão.**

"As forças introduzidas pelos fio (cabos) ficam permanentemente armazenadas na estrutura num estado conhecido como protensão. Em estruturas tensegrity a triangulação completa (plena) é muito importante, uma vez que ela decide se a estrutura resultará firme ou flácida." (Snelson 2007)

Mas, como já foi mencionado anteriormente, apenas o cruzamento envolvendo duas ou três hastes e quatro membros de tensão têm triangulação total. O quadrado, o pentágono e o hexágono não apresentam esta triangulação.

Estas estruturas podem, no entanto, ser estabilizadas com cabos suplementares que, de qualquer modo, tenderão a distorcer a forma.

O conjunto de cabos perpassando as hastes funciona como um endo esqueleto. Da mesma forma como no corpo humano, os cabos (tirantes) fazem as vezes dos músculos ficando externos às hastes e estas, que nunca se tocam, fazem o papel dos ossos. A exceção ocorre no cruzamento de apenas dois elementos rígidos nos eixos **x** e **y** faltando algo para separá-los no eixo **z**.

"A figura de cruz é a mesma da pipa convencional na qual as duas hastes fazem pressão entre si na intercessão. Ela é, uma estrutura quase-tensegrity porque falta uma força na direção do eixo **z** para separar as duas hastes, e impedir que elas se toquem no cruzamento. Esta forma simples, denominada como **módulo x**, é a chave essencial para todas as estruturas tensegrity."(Snelson 2007.)

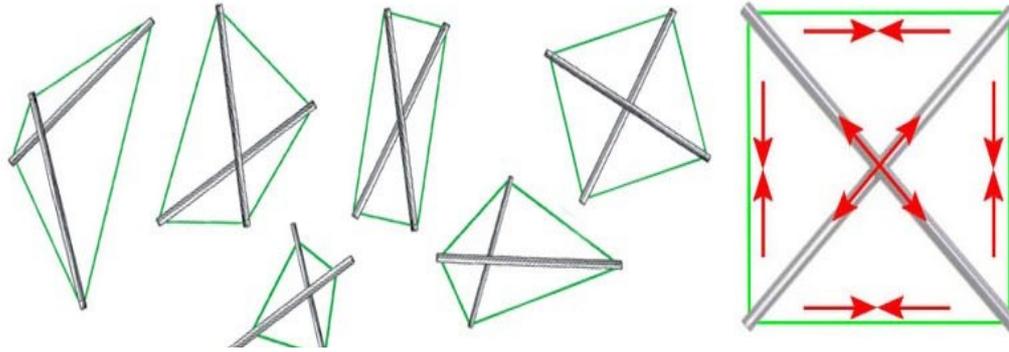


Figura 36: Diagrama de forças à direita e exemplos aleatórios de formas de pipas

As estruturas de uma pipa simples podem variar os comprimentos das suas hastes com a conseqüente variação das forças de tensão e compressão. No entanto, **a soma total dos esforços de compressão empurrando para fora é igual à soma dos esforços de tensão puxando para dentro.**

#### 4.9.4.1.

#### O "Módulo X" transformado em verdadeira estrutura tensegrity

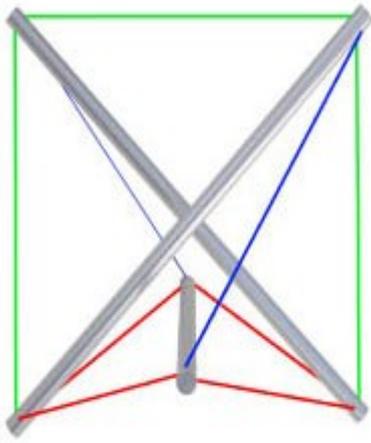


Figura 37: A estrutura de uma pipa simples transformada em estrutura tensegrity

A moldura de pipa (módulo x) se transforma numa verdadeira estrutura tensegrity quando se introduz uma terceira haste, o que é feito substituindo-se um dos cabos que envolvem a forma, por quatro cabos que vão sustentar a terceira haste. Esta estrutura de três hastes tem agora que ser estabilizada com dois cabos adicionais que vão respectivamente de cada extremidade da nova

haste para as extremidades opostas de cada uma das hastes originais. Forma-se assim um módulo de três direções, todo triangulado e essencial para qualquer montagem tensegrity.

#### 4.9.4.2.

#### Conectando módulos para gerar uma Torre

"A rede de tensão de uma estrutura tensegrity é externa às hastes e apesar de o sistema de tensão controlar a estrutura como uma pele em volta do todo, cada cabo exerce controle de uma maneira específica" (Snelson, 2007)

Dizendo isto Snelson divide os cabos (tirantes) em três categorias, a saber:

**a) Cabos Arestas:** são as linhas de tensão que definem as arestas e os lados de cada módulo. A coluna de três hastes tem três **arestas** para cada módulo. Na maioria dos casos as arestas têm menos tensão do que as linhas de **tração ou de apoio**.

**b) Cabos de Tração:** São os cabos que puxam um módulo contra o outro. Numa coluna de três hastes cada módulo é conectado ao seguinte por três cabos de tração ascendentes e três cabos de tração descendentes.

**c) Cabos de Apoio:** São os cabos que dão sustentação aos módulos subsequentes numa construção vertical. Eles conectam os módulos entre si e são o oposto dos cabos de tração. Numa coluna de três estágios (módulos) são necessários seis cabos de apoio, divididos em três inferiores e três superiores.

É possível transformar um módulo tensegrity, que tenha giro para direita, em outro igual com giro contrário. Mas, para realizar isto o módulo dextrógiro tem que ser completamente desmontado e remontado invertendo a posição das hastes. Consegue-se assim duas formas absolutamente idênticas só que uma é a imagem **espelhada** da outra.

Na construção de uma torre, por empilhamento de módulos, tem-se duas opções, a saber: **1)** se o objetivo é obter uma torre **flexível**, basta empilhar módulos com giros na mesma direção (giro cumulativo); **2)** se o objetivo é obter **rigidez**, deve-se alternar, no empilhamento, módulos dextrógiros com módulos levógiros. Neste caso os movimentos de torção se anulam e a flexibilidade inerente às estruturas tensegrity não acontece.

Nas figuras abaixo vemos: 1) um exemplo de módulo de três hastes. Nesta figura simples todos os cabos de tensão são **cabos arestas**.

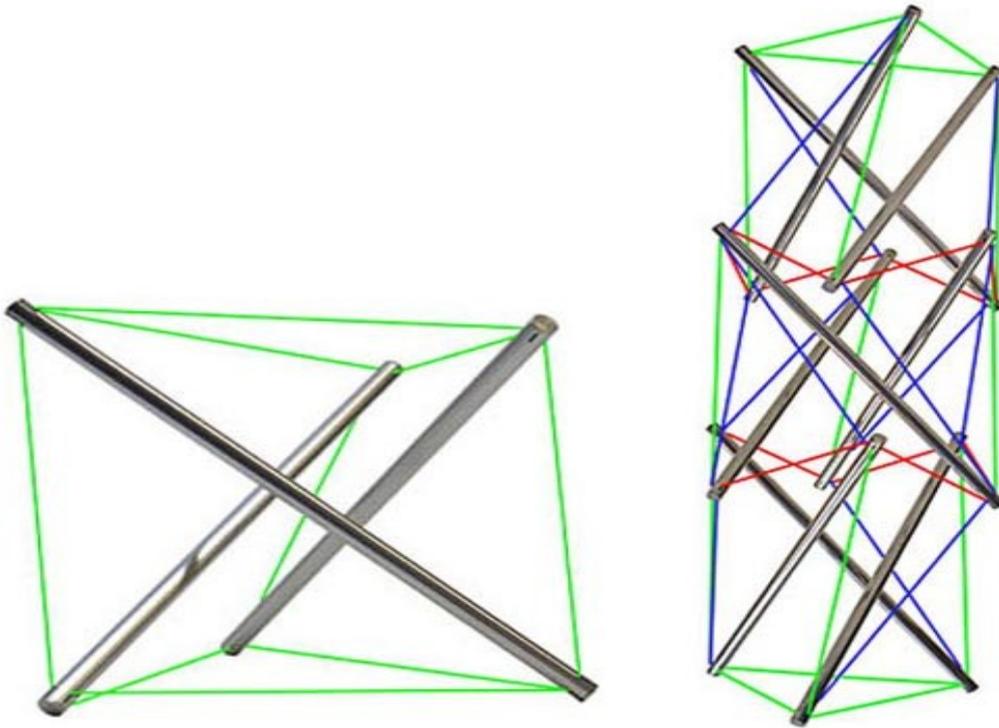


Figura 38: Módulo de três hastes definido como "prisma de base triangular", e à direita, uma torre construída com três destes módulos.

Eles definem, grosseiramente, um prisma de base triangular. Na sua vista superior o módulo apresenta movimento helicoidal esquerdo (levógiro). O oposto é verdadeiro quando o módulo é visto pelo lado onde as hastes se relacionam no sentido dos ponteiros do relógio. Isto é, movimento helicoidal direito (dextrógiro).

#### 4.9.4.3. Malhas de tensão trianguladas

Por causa de certo grau de elasticidade dos cabos de tensão, sejam linhas de algodão, fios de nylon, arames, etc. as estruturas tensegrity são também **elásticas** dependendo da tensão, da **protensão** e das características do material e da forma geométrica da estrutura. Nos modelos mostrados, todas as linhas de tensão e hastes são de comprimentos iguais, conseqüentemente todos os triângulos são equiláteros. Quando pressionadas para baixo estas torres se comportam como uma **mola**.

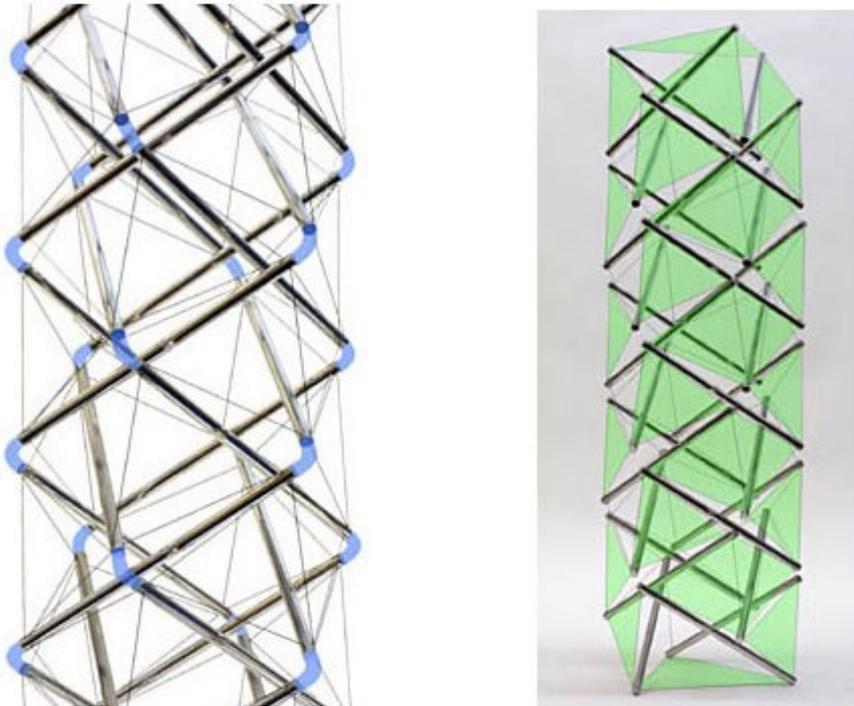


Figura 39: Exemplos de torres tensegrity

#### Expansões do Módulo X

Na verdade pode-se substituir a terceira haste por outro módulo X. Na figura abaixo vê-se como isto é feito. Esta montagem de dois módulos X é o primeiro passo no processo de construção tensegrity .

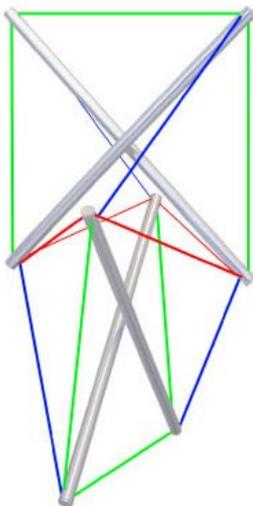


Figura 40: Substituição da terceira haste por um Módulo x

É possível se construir qualquer número de configurações tensegrity as mais variadas, desde as mais simples até as altamente complexas.

Somente aquelas formas nas quais a rede de cabos tensionados é composta inteiramente de triângulos são realmente estáveis. Se a rede apresentar quadrados, pentágonos, etc. a estrutura será deformável e flácida.

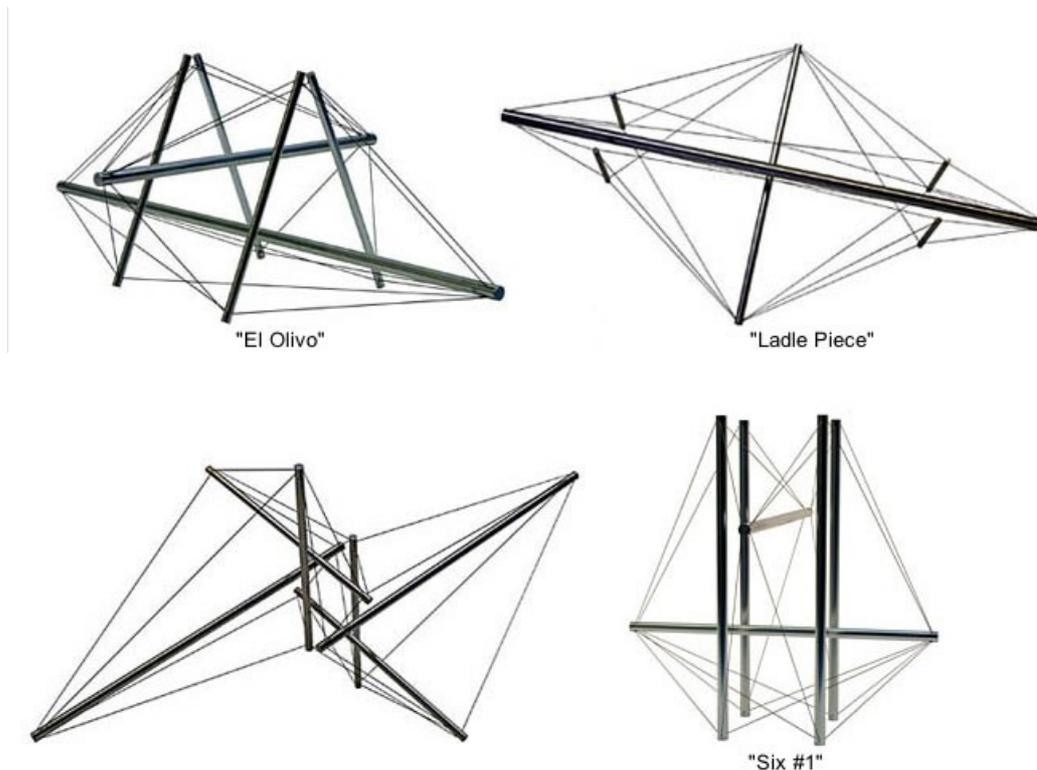


Figura 41: Na página anterior e nesta, exemplos de construções com o Módulo x

#### 4.10. Sinergia

**"Sinergia** significa que o comportamento do todo não pode ser previsto a partir do comportamento das partes consideradas separadamente." (Sieden, 2000 p.103).

O exemplo favorito de Bucky era o do **aço-cromo-níquel**, uma liga metálica que apresenta uma resistência, dez vezes maior do que a do seu componente mais fraco e, seis vezes maior do que a do seu componente mais forte. A resistência à tração da liga é bem maior do que a soma das resistências tenses dos seus componentes. (Baldwin, 1996 p.68)

Bucky concluiu que tudo na Natureza é **sinérgico**, palavra inventada por ele, significando um amálgama entre os termos **sinergia e energético**. Pelo fato do tudo no Universo estar em constante movimento, o sistema de coordenadas cartesianas **x,y,z**, está incompleto pois não leva em consideração o fator **Tempo**. É uma maneira de pensar que vem desde a época em que se achava que a Terra era plana. Nós estamos tão acostumados às coordenadas de 90° que é uma surpresa descobrir o que realmente quer dizer "ao quadrado ou ao cubo".

Numa palestra em 1965 Fuller disse:

"Na verdade a experiência mostra que nós vemos e compreendemos muito pouco da totalidade dos movimentos. Assim sendo a sociedade tende a pensar estaticamente e está sempre surpresa, às vezes desconfortavelmente, às vezes fatalmente. Pelo fato de carecer compreensão dinâmica a humanidade tem dificuldade em sair das suas fixações estáticas e, especificamente perceber a evolução das grandes tendências".(Baldwin, 1996 p.69)

A sinérgica requer coordenadas à 60°. Não são empregados pontos frágeis, linhas retas ou planos infinitos. A matemática sinérgica se baseia mais em experiências do que em axiomas fisicamente impossíveis. Tudo o que é físico tem que ter forma e estrutura.

"Na geometria energética uma linha representa um vetor; ela não pode ir para o infinito porque não existe infinito no cenário regenerativo que é o Universo. Uma linha tem comprimento, ângulo e uma frequência implícita. O **tempo** está sempre envolvido porque fenômenos reais têm **duração**. O tempo é a menor distância entre dois pontos". (Baldwin, 1996, p.69)

#### 4.10.1.

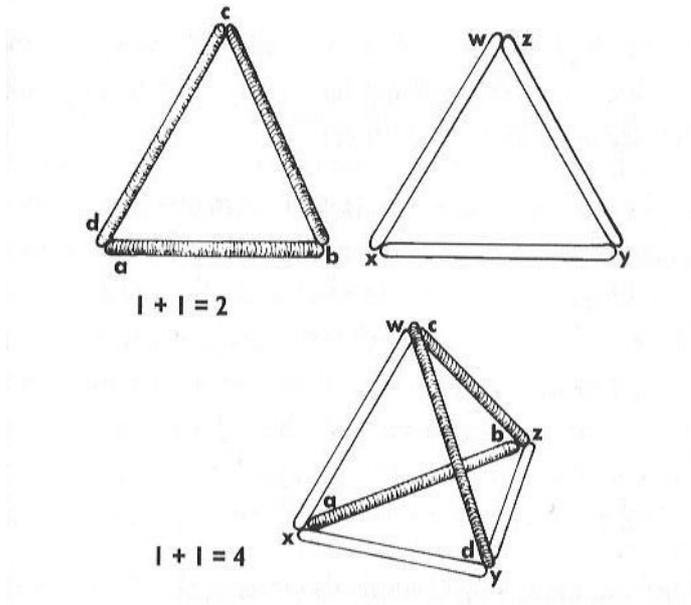
#### **O tempo é o menor caminho entre dois pontos**

Bucky considerava seus domos geodésicos como demonstrações pedagógicas irrefutáveis da exatidão da sua geometria sinérgica-energética.

As geodésicas são sinérgicas. A Natureza emprega, com frequência, estruturas geodésicas para o máximo de resistência e proteção. Os globos oculares bem como os testículos de certos animais vertebrados mostram padrões geodésicos. Inúmeras pequenas radiolárias são geodésicas para resistir às enormes pressões abissais. Os vírus são geodésicos. Bucky esperava que um estudo da sua geometria revelaria como eles funcionam e como se poderia agir para combatê-los. "Tetraedros empilhados numa espiral dupla. Poderia o DNA ser proveitosamente estudado como um fenômeno sinérgico? "

Segundo (Baldwin, 1996 p.69), ele foi ainda mais longe afirmando que a compreensão é "simetricamente tetraedral" - uma frase tipicamente Fullleriana que requer tempo, conhecimento e raciocínio para ser entendida. Não é por acaso que o sub-título do seu livro sobre Sinergia é "Explorações na Geometria do Pensamento".

Figura 42:  $1 + 1 = 4$ . Com seis bastões idênticos você pode construir dois triângulos que,



organizados sinergicamente, formam um tetraedro. Logo um triângulo mais um triângulo é igual a quatro triângulos

**$1+1= 4$ .** Esta fórmula não é nem um pouco absurda se considerarmos que, com dois triângulos regulares, podemos formar um tetraedro. Para isto basta deslocarmos um dos lados de cada triângulo num mesmo plano horizontal – mas formando um ângulo de  $60^\circ$ – e juntarmos as peças resultantes para obtermos o dito tetraedro. Logo  $1+1 = 4$ . O tetraedro que tem quatro faces triangulares regulares inaugura assim um sistema estrutural completamente novo e **resulta no menor módulo para uma estrutura espacial.**

**A Sinergia é a mais potente forma de energia, pois é a energia da cooperação.**

Tanto melhor será uma estrutura quanto maior for a cooperação entre seus elementos. É a lei da economia ou a lei do caminho mais fácil para se atingir o ideal de conseguir o máximo possível utilizando o mínimo possível.



Figura 43: Ilustração de um Yurt (habitação típica das estepes) mostrando a sua estrutura (ilustração: Allan Sutie / LA MADERA)

Nas construções da Natureza e na Arquitetura Vernácula sempre existiu esta cooperação entre elementos, esta soma sinérgica, conseguida desde a noite dos tempos por meio da utilização dos materiais disponíveis e das técnicas adequadas para a fabricação de estruturas. Um bom exemplo, que persiste até hoje, são os Yurts, habitações das diversas tribos nômades da Ásia Central. Consistem de um engradado pantográfico armado em círculo encimado por feixes formando um cone mantidos no lugar por um anel de compressão. Esta estrutura, que é toda feita em madeira, é coberta por mantas de peles de animais, lastradas no chão, contra os ventos, por meio de pedras e/ou seixos rolados. Todo o conjunto é montável e desmontável com rapidez e transportável por, no máximo, dois dromedários. Uma cultura de transformações lentas e livre de influências daninhas externas.

#### **4.10.2. A sinergia em estruturas Tensegrity**

Quando materiais tracionáveis e comprimíveis são usados de maneira realmente complementar, eles formam estruturas capazes de suportar cargas que superam, em muito, as estimativas baseadas em análises estruturais convencionais. Esta verdade se aplica às formas desenvolvidas por Tensegrity que apesar do aspecto delicado são surpreendentemente fortes e resistentes.

Estruturas construídas usando apenas hastes rígidas, rigidamente conectadas nos vértices, não serão capazes de ter a mesma resistência aos impactos do que o trabalho conjunto com os cabos. Os cabos por sua vez, usados sozinhos não serão capazes de manter nenhuma forma. Assim sendo as formas por Tensegrity, utilizando os dois elementos intercambiando continuamente os esforços entre si vão ser mais resistentes e resilientes do que se hastes e cabos fossem considerados isoladamente.

Este trabalho em conjunto (cooperação) é **sinérgico**.

Ver a **sinergia** na combinação de **tração e compressão** ajuda a perceber os papéis destas forças em outras estruturas. Um **balão**, como vimos, é uma estrutura tensegrity porque seus componentes tracionáveis e comprimíveis são perfeitamente adequados às suas funções individuais. Se não, vejamos. As moléculas de ar dentro do balão estão em movimento constante colidindo umas com as outras e comprimindo algumas contra a pele do balão fazendo as vezes de elementos de compressão, empurrando para fora. Eles são contidos pela rede de tensão estabelecida pela pele do balão. A pele por sua vez não é uma superfície lisa e contínua; quando ampliada ela se apresenta como uma rede cuja malha é mais fina que as moléculas de gás contidas no interior.

As estruturas por Tensegrity são como balões com a exceção de que as moléculas, empurrando para fora, são substituídas pelas estroncas (hastes) estrategicamente posicionadas, e a pele contínua do balão é substituída pela malha (rede) de cabos, também estrategicamente posicionada. Isto mostra com precisão o papel de materiais tracionáveis e comprimíveis na Natureza. A compressão ocorre como ilhas descontínuas e a tração como uma malha contínua. Sempre no início de alguma palestra sobre este tema, Bucky berrava em alto e bom som, para quem quisesse ouvir na audiência, a seguinte frase: **"Não existem sólidos!, não existem coisas!"**

"O Universo consiste de ilhas de compressão dentro de um mar de tensão, em qualquer escala. As estrelas e os Planetas são ilhas de compressão num mar de Gravidade. A lua está amarrada à Terra por um cabo gravitacional, sem peso e de secção diametral igual a zero, com a exata resistência requerida para manter o sistema estável. Os átomos são, relativamente, tão distantes uns dos outros como os planetas entre si. No Universo nada toca em nada. Tudo é energia organizada por ângulo e frequência." (Baldwin, 1996 p.75)

A combinação entre tração e compressão acontece com muita frequência na Natureza. As Bolhas de sabão e as nossas células, bem como, nossos órgãos internos se comportam como balões não importando se estão cheios de líquidos ou gases. Nosso sistema solar é composto de planetas fazendo pressão para fora mas sendo contidos pela força da gravidade exercida pelo Sol. O mesmo acontece com os átomos com seus elétrons pressionados para fora contidos pela força de atração em direção ao núcleo. Nossos corpos com seus ossos rígidos mantidos por tendões e ligamentos flexíveis são os exemplos mais íntimos que temos de estruturas Tensegrity.

#### **4.11. Os Novos Materiais e a Tensão**

Estruturas eficientes no jogo do **puxa-empurra** eram impensáveis antes de século XVIII devido à incapacidade de se obter um comportamento efetivo e confiável de materiais sob tensão.

No entanto, a primeira produção, em massa, de aço (1851), mudou radicalmente esta situação. A força tênsil da madeira, explorada aos seus limites na construção naval, era capaz de atingir uma resistência de, no máximo 10.000 psi (pounds per square inch), libras por polegada quadrada, ao passo que o aço era capaz de atingir 50.000 psi. Este fato tecnológico passou a permitir projetos grandes e arrojados como, por exemplo a ponte de Brooklin, que abriu uma era imensamente inovadora e rica em termos do design de estruturas de ferro em geral e tensionadas em particular.

Fuller sempre dizia: "Tensão é uma coisa muito nova."

A aplicação destes novos materiais e, conseqüentemente novas técnicas na construção permitiram aos designers e arquitetos desenvolver novos conceitos estruturais. Além de poderem vencer maiores vãos e alturas por intermédio da maior resistência dos componentes, a drástica redução das suas secções transversais se traduzia numa grande economia de peso.

Depois da descoberta da Tensegrity em 1948, e apesar do pouco corpo de conhecimento sobre esta estrutura àquela época, vários projetos passaram a ser concebidos para adotar os recursos mais recentes e tirar vantagem das suas propriedades mais privilegiadas especialmente a sua força tênsil.

Durante a década de 50, não só a exploração de cabos em tração foi incrementada como o uso de membranas e tecidos.

Segundo Valentim (2005 p.26), o primeiro grande projeto ocorreu em Raleigh, na Carolina do Norte, em 1950, onde o arquiteto Mathew Novischi construiu um grande pavilhão oval no qual uma cinta aérea de concreto servia de ancoragem para uma malha de cabos de aço que gerava, no espaço, uma cobertura em forma de parabolóide hiperbólico. Um jovem estudante de Arquitetura, alemão, fazendo um intercâmbio nos EUA, ficou fascinado com a novidade do projeto e das suas possibilidades.

De volta à Alemanha este jovem iniciou estudos e investigações sistemáticas que começaram com a sua apresentação de doutorado em 1952 e resultaram numa vida inteira de dedicação às estruturas tênses as quais se tornaram paradigmas para todas as outras que vieram depois.

O nome deste arquiteto era Frei Otto e a sua vasta obra resultou no primeiro documento completo e abrangente sobre estruturas de tendas autotensionadas.

Otto fundou o Instituto de Desenvolvimento de Estruturas Leves em 1964, instituto este que foi incluído no Instituto de Superfícies Leves de Stuttgart, Alemanha.

Desde então têm sido desenvolvidos lá importantes trabalhos explorando propriedades tênses de materiais como: aço (principalmente), poliuretano, poliéster, PVC, fibra de vidro, painéis de acrílico, tecidos compostos por uma mistura de fios de algodão e poliéster, etc. Entre os inúmeros projetos de Otto podemos destacar um pavilhão tenda de quatro mastros, construído em 1955, para abrigar e permitir audições ao ar livre da Orquestra Sinfônica de Kassel; a primeira grande estrutura espacial tensionada coberta por tecido que foi o pavilhão da Alemanha na Feira Mundial de Montreal, em 1967, no Canadá e o mundialmente celebrado Estádio Olímpico em Munich, Alemanha, 1972.

Estes tipos de projeto são importantes uma vez que as membranas de cobertura podem ser adotadas e adaptadas como componentes tênses de estruturas tensegrity.

## 4.12.

### Princípios Mecânicos das Estruturas Tensegrity

#### 4.12.1.

##### Puxar e Empurrar

No modelo tensegrity as forças de atração são representadas pelos **cabos**. A atração molecular, o magnetismo, e a gravidade são exemplos de forças de **atração**. A **atração puxa para dentro**. Quando ela encontra resistência estabelece-se um estado de **tensão**. Os cabos formam uma rede de tensão contínua que age nas extremidades das estroncas (hastes).

A **repulsão** é uma forma explosiva que empurra para fora. Exemplos disto são: a repulsão molecular, a repulsão magnética e a radiação. Quando a repulsão encontra uma resistência aparece o estado de **compressão**. No tensegrity, a repulsão é tornada visível pela compressão das **hastes rígidas**; eles empurram para fora para evitar que a rede de cabos colapse.

É muito difícil discutir **tensão e compressão** separadamente uma vez que **são forças interdependentes**. Pode-se enfatizar uma ou outra em uma situação particular, mas a sua interdependência assegura sua permanente co-existência. Na Tensegrity o cabo não está em estado de tensão se ele não for resistido pelo haste rígida. Da mesma forma a haste não estará em compressão se ela não estiver sendo puxada pela rede de tração formada pelos cabos.

#### 4.12.2.

##### Tração e Compressão

Dentro do material que compõe cada haste ou cabo também co-existem tração e compressão. Quando uma haste é comprimida pelas extremidades ela se expande na sua seção central. À medida que esta cintura se expande os átomos da superfície são afastados uns dos outros, resultando no enfraquecimento da haste. **Os materiais comprimidos se tornam progressivamente mais frágeis à medida que a carga sobre eles é ampliada.**

Por sua vez o cabo, quando tracionado, tem sua seção central reduzida provocando a “aproximação”, isto é: a compressão dos átomos. **A ligação entre os átomos se torna mais forte e, inicialmente, o cabo também.** Uma vez ultrapassado o limite de resistência do cabo ele se enfraquece. Materiais tracionáveis se tornam progressivamente fortes à medida que a carga atuando neles aumenta, até o seu ponto máximo de resistência quando então eles vão se tornando mais fracos até o ponto de ruptura.

Desenvolvimentos recentes de materiais tracionáveis têm aumentado a resistência dos mesmos levando os seus pontos de ruptura à níveis inimagináveis. Um cabo de aço inoxidável é dez vezes mais resistente do que a corda mais forte de 50 anos atrás. Em contrapartida nos últimos mil anos quase nada de novo aconteceu com os materiais comprimíveis. O aço é apenas duas vezes mais forte que a pedra quando se trata de compressão.

#### **4.13. Construções pelo Sistema Tensegrity**

Com a descoberta e evolução de novos materiais e técnicas de construir está se tornando cada vez mais possível minimizar os efeitos da Gravidade e realizar construções leves e confiáveis com grande economia de tempo e energia.

Neste mister já sabemos que na construção em geral e na de de grandes vãos ou maiores alturas em particular, a redução do peso próprio é economicamente mandatária ou seja, o pressuposto para o desenvolvimento de uma solução bem sucedida.

Como todo processo novo as construções com sistemas tensegrity, que vêm sendo estudadas e desenvolvidas muito recentemente no mundo, têm mostrado resultados vantajosos e desvantajosos. Ainda mais quando se substitui o aço pelo bambu. No entanto, é exatamente esta pesquisa aqui apresentada que vem se somar ao esforço inédito do LILD para transformar este processo numa aplicação viável, útil e passível de ser continuada com sucesso.

"Estruturas tensegrity são estruturas espaciais muito eficientes, altamente complexas, cujas geometrias são quase impossíveis de serem desenvolvidas com instrumentos de desenho convencionais, razão pela qual poucos engenheiros e arquitetos se animam a utilizá-las para grandes construções" (Irmgard Lochner)  
**Interaktives Entwickeln von Tensegrity Strukturen** - Institut für Leichtbau Entwerfen [www.stuttgart.de/ilek/lehere/](http://www.stuttgart.de/ilek/lehere/) selfstudyonline.

A geometria destas estruturas não é convencional, ela é determinada pelo equilíbrio entre os esforços internos e externos. Semelhante às bolhas de sabão onde as estruturas são mantidas pelo eterno jogo entre forças internas e externas.

Na publicação "Arbeitsblätter" da Universidade Técnica de Munique vamos encontrar uma série de regras para construções de estruturas espaciais leves em geral, no meu ver aplicáveis também às estruturas tensegrity, a saber:

**a)** Na construção de grandes vãos ou maiores alturas, a redução de peso próprio é mandatória para a economia e a realização de uma solução.

**b)** Construção leve significa construir com economia de materiais e, via de regra, aplicar os princípios da reversibilidade.

**c)** A necessidade de minimizar pesos como na construção de aviões, navios e automóveis levou os especialistas a atingir um alto grau de técnicas de construção leve quando comparadas com as técnicas utilizadas para a construção de elementos estáticos. Hoje em dia existem inúmeras instituições de pesquisa, geralmente incorporadas a universidades, dedicadas à pesquisa de novas técnicas e materiais procurando soluções para modos de construir eficientes no que concerne aos problemas da gravidade e da economia de energia.

Uma destas instituições a Universidade Técnica de Munique/TUM, Alemanha esta gerando um corpo de conhecimento relativo ao assunto em questão aqui. Segundo uma publicação sua ( TUM, 2002. pg.1) os problemas da aplicação da construção leve em prédios altos esbarram na grande probabilidade de deformação em relação às cargas assimétricas de vento e gelo, vibrações e altos salários na construção civil.

No que se tange ao projeto a construção leve a referida publicação propõe três categorias importantes para nortear projetos e passíveis de se combinar de várias maneiras, a saber: **1)** Construção com materiais leves; **2)** Processo de construir estruturas leves e **3)** Sistemas de Construções leves.

#### **1) Construção com materiais leves**

Sob este título está compreendida a utilização de materiais com uma boa relação entre peso, resistência, dilatação e rigidez.

#### **2) Processo de construir estruturas leves**

Significa o projeto de estruturas espaciais objetivando reduzir ao mínimo o peso próprio da construção nos pontos de apoio.

### 3) Sistemas de construções leves

É como se chama a sobreposição de funções dos elementos de uma estrutura. Isto quer dizer que os elementos construtivos não são concebidos apenas para as funções de suportar cargas mas também limitar e vedar espaços, isolar térmicamente os ambientes, etc.

Para o projeto de sistemas portantes leves foram concebidos diversos métodos de desenvolvimento de formas.

Os métodos experimentais do passado, que eram os únicos disponíveis, deram lugar, cada vez mais, aos métodos matemático-numéricos propiciados pela rápida evolução dos computadores.

A principal e mais importante vantagem é que todos os modelos experimentais podem ser mostrados com muito maior precisão no que tange à força e geometria nos modelos matemático-numéricos. Por esta razão estes modelos matemáticos têm um destaque maior e são empregados, via de regra, desde os primeiros estágios do projeto.

O objetivo de projetar uma construção estrutural de carga própria mínima pode ser desenvolvido também a partir de um nível qualitativo observando-se as regras relativas à construção de estruturas leves a saber:

- 1) Evitar grandes solicitações de esforços fletores.
- 2) Os esforços de tensão em grandes distâncias não trazem bons resultados em função do peso próprio dos elementos.
- 3) Os esforços de compressão devem ser descarregados por caminhos pequenos, caso contrário os problemas de estabilidade exigem soluções que impliquem em aumento de material.
- 4) Esforços de compressão descarregados em grandes distâncias necessitam do acoplamento de sistemas auto-estabilizantes.
- 5) O encontro de esforços em nós dentro do sistema de carga é desejável para poupar peso e evitar sobreconstruções dispendiosas.

Com Burckhardt (Valentim 2005 p.29) vamos aprender que: uma vez que os membros em compressão não precisam vencer longas distâncias eles não estão sujeitos a grandes esforços de flexão, assim sendo eles podem ser mais delgados sem sacrifício da integridade estrutural.

E mais: se a superfície de um balão é forçada com o dedo, a malha atômica flexível que é a "pele" do balão, distribui o esforço aplicado por toda a estrutura. Quando a carga externa é removida o balão volta à sua forma original. Esta **resiliência é outra característica própria das estruturas tensegrity.**

Assim sendo, por ora, o emprego prático de sistemas tensegrity para grandes construções, é limitado pela complicada descarga dos esforços, da grande quantidade de nós e da desgastante preparação dos detalhes, além da montagem.

Para construções menores os sistemas tensegrity podem ser eficientes quando o objetivo é executar a montagem e demontagem de estruturas leves.

A adição de elementos em tensegrity a sistemas de construção integradas e as possibilidades de combinação de sistemas tensegrity com outros tipos de sistemas portantes, resultando em estruturas híbridas, oferece um grande campo de possibilidades de desenvolvimentos e projetos.

Atualmente pode-se aplicar em grandes vãos sistemas abertos em tensegrity combinados com membranas têxteis como cobertura.

As maiores coberturas do mundo, os assim chamados "cable domes" são aplicações de sistemas tensegrity espaciais, abertos.

Uma outra aplicação do princípio da roda raiada como sistema auto-estabilizante se aplica à um grande número de coberturas de estádios.

Um bom exemplo de estrutura híbrida pode ser a dos estádios com coberturas apoiadas em cabos suspensos e ancorados nas paredes (anéis estruturais externos). Este tipo de estrutura foi batizada por Buckminster Fuller como ASPENSION (de Ascending Suspension).

#### **4.13.1. As Configurações mais Simples**

Devido à complexidade deste interessante tipo de estrutura e, pelo fato de não apresentar princípios muito intuitivos, acho importante explicar a geração dos tipos mais simples de Tensegrities.

O mais primitivo modelo de tensegrity é a **pipa** (pandorga). Este brinquedo, muito antigo, é baseado simplesmente em duas hastes delgadas, que se cruzam, mantidas unidas por um fio, que corre ao longo de todo o perímetro, amarrado nas pontas destas hastes. Na verdade este tipo de estrutura simples não pode ser chamada de tensegrity porque as duas hastes, em compressão, se tocam no meio da pipa.

Não é à toa que Snelson obteve sua primeira estrutura tensegrity a partir do empilhamento, alternado, de duas figuras em forma de X, recortadas em compensado, e, tendo, passando pelas suas extremidades, um fio de nylon. Fica muito clara aqui a expressão: "tensão contínua compressão descontínua". Esta figura batizada por Snelson como o **módulo X**. Esta figura passou a representar as estruturas tensegrity mais simples que ele chamou de "Simplex".

#### 4.13.2. Análise do Equilíbrio

Uma vez descrita a montagem de um exemplo de estrutura tensegrity simples e de como é o seu design básico, torna-se mais fácil de se ter uma idéia dos princípios que a governam.

Para entender o comportamento auto-estabilizante dos sistemas de "tensão contínua compressão descontínua" é necessário desenvolver uma análise estática das forças de tensão e compressão agindo em cada **nó**. Cada vértice (nó) tem que estar em equilíbrio de modo a prover estabilidade à toda a estrutura.

Com Snelson (1998) aprendemos que, numa estrutura tensegrity é necessário um mínimo de três cabos chegando à extremidade de qualquer haste. A **resultante** de cada **triade** de forças chegando a um nó, somada ao **peso** relativamente leve de cada componente tem que estar **alinhada** com o eixo da haste, pois, de outra maneira, a haste seria afetada por um momento fletor e não estaria em equilíbrio, significando que é preciso existir sempre um estado de equilíbrio em cada nó.

Uma particularidade da estrutura tensegrity é que as forças atuando sobre elas são, de certa forma, visíveis. Por exemplo Snelson (1998) afirma à respeito das suas esculturas espaciais que : "Eu estou mostrando a vocês, pela primeira vez, como é a cara de um espaço estrutural". Em outras palavras, numa estrutura tensegrity as duas forças atuantes: tensão e compressão, estão

completamente separadas e o observador pode vê-las atuando em seu estado puro. Onde tem uma haste "vemos" a compressão pura, onde tem um cabo "vemos" a tensão pura.

Às vezes um estudo mecânico pode ser muito complexo por causa da geometria e do número de elementos da estrutura, tornando-se necessário o uso de programas de computador adequados a realizar, com eficiência, a tarefa.

O presente trabalho não se propõe a explicar, em profundidade, as leis que governam os mecanismos finitos e infinitos da Tensegrity. Trata-se de um assunto à parte e de grande complexidade, que foje ao nosso objetivo aqui. Acho adequado encaminhar o leitor à bibliografia, destacando o trabalho de Renè Motro (2003 cap.3).

#### **4.13.3. Características das Estruturas Tensegrity**

Pelo que foi exposto acima sobre "estruturas flutuantes", suas configurações precisas e detalhadas e a assunção de que elas têm características muito especiais, resulta na enumeração, a seguir, das características, aqui detectadas, no sentido de que, junto com outros dados já informados, sirvam como justificativa da escolha deste sistema estrutural para a realização de objetos leves conforme proposto.

##### **Propriedades**

1) As estruturas tensegrity são leves quando comparadas com outras estruturas de resistência similar, ou, se quiser, elas possuem uma grande resistência em comparação com outras estruturas com pesos semelhantes.

2) Elas não têm partes redundantes apesar de que seja possível acrescentar novos cabos para consolidar a estrutura (Kenner citado por Valentim, 2005 p.51).

3) Devido à sua auto-estabilidade, elas não dependem da Gravidade. Assim sendo elas não precisam ser ancoradas nem apoiadas em qualquer ponto ou superfície. "O sistema é estável em qualquer posição" (Perlberg, citado por Valentim, 2005 p.51).

4) A maioria dos sistemas tensegrity é **enantromórfica** o que quer dizer que eles podem existir como imagens espelhadas, com rotações dextróginas ou levóginas isto é, simétricas em relação a um plano entre elas. (Kenner, Pugh e Snelson, citados em Valentim, 2005 p.51).

5) Módulos elementares de tensegrities podem ser associados para formar torres, mastros, grades ou conglomerados. Nestas associações podem, às vezes, ser empregados módulos diferentes entre si.

6) Quanto maior o pré-tensionamento num sistema tensegrity, maior é a sua capacidade de suportar cargas. Pode-se aqui fazer a analogia com o balão, quanto mais inflado, mais as forças evitam a sua deformação. ( Valentim, 2005 p.52).

7) Como os componentes em compressão, são descontínuos eles só trabalham localmente. A compressão é localizada em pequenas e específicas linhas de ação, fazendo com que estes componentes (hastes) não estejam submetidas a grandes cargas fletoras.

8) Devido à descontinuidade na compressão, as hastes não sofrem momentos de torção. (Fuller citado em Valentim 2005).

9) O grau de tensão dos componentes pré-tensionados é proporcional à quantidade de espaço que ocupam ( Muller citado por Valentim 2005 p. 52).

10) Nas estruturas tensegrity ocorre o fenômeno da Sinergia que é uma propriedade onde o comportamento do sistema como um todo não é previsível pelo comportamento das suas partes, consideradas separadamente.

11) A resiliência ou a rigidez da estrutura depende dos materiais empregados e do seu modo de construção. Assim sendo elas podem resultar muito flexíveis ou muito rígidas e fortes.

12) Em função do estabelecido no item anterior passa-se a saber que as estruturas tensegrity, quando submetidas à cargas dinâmicas, são muito sensíveis à vibrações.

13) Elas têm a característica de responder como um todo, descarregando e transmitindo, uniformemente por todos os seus membros quaisquer esforços pontuais aplicados.

14) A resposta à cargas é não linear. Elas são mais flexíveis sob cargas leves, mas a sua rigidez cresce rapidamente à medida que a carga aplicada cresce. (Kenner, Smaili e Wang conforme citados por Valentim, 2005 p.54).

15) Algumas tensegrities quando submetidas a cargas axiais, respondem com uma rotação em torno do seu eixo (Snelson, 2004). A direção desta rotação depende da enantiomorfia do sistema.

### **Vantagens**

1) Pelo próprio trabalho mecânico da estrutura não existem pontos fracos localizados.

2) Devido à sua habilidade de responder como um todo, é possível empregar materiais de uma maneira muito econômica, oferecendo o máximo de robustez por quantidade de material de construção usado (Ingber, 1998). Segundo Fuller "Tensegrity demonstra efemeralização isto é: fazer mais com menos. Valentim (2005 p.54) sugere a expressão "etéreo" em vez de "efêmero".

3) Elas não sofrem qualquer tipo de torção; sendo que o empenamento é muito raro devido ao pequeno comprimento dos seus componentes sob compressão.

4) As forças de tensão se transmitem através das menores distâncias entre dois pontos, assim, os membros de uma estrutura tensegrity estão posicionados para melhor resistir aos esforços. (Valentim, 2005 p.51).

5) O fato de estas estruturas vibrarem faz com que as cargas sejam transferidas, com rapidez, ao longo delas mesmas. Esta característica de absorver abalos pode ser útil em áreas de instabilidade de solos, terremotos, etc.

6) A estabilidade individual de módulos tensegrity permite, como já vimos, um grande número de construções por empilhamento destes módulos.

7) Para grandes construções o processo de montagem é relativamente simples, uma vez que, as próprias estruturas podem funcionar como andaimes para sua própria montagem.

8) Burckhardt, citado por Valentim (2005 p.56), sustenta a tese de que a construção de torres, domos, pontes, etc, empregando os princípios da tensegrity vai torná-los altamente resilientes e, ao mesmo tempo, econômicos.

9) A indeterminação cinemática das estruturas tensegrity, é, às vezes, uma vantagem. Nos sistemas dobráveis, por exemplo, somente uma pequena quantidade de energia será necessária para mudar sua configuração, uma vez que, a forma muda com o equilíbrio das estruturas (Valentim, 2005 p.56).

### **Desvantagens**

1) De acordo com Hanaor, conforme citado por Valentim (2005 p.56), as organizações das estruturas tensegrity precisam resolver os problemas da congestão de hastes. À medida que alguns projetos crescem, o vão do arco entre as hastes decresce com a consequência de as hastes acabarem se esbarrando.

2) O mesmo autor afirmou que, depois de pesquisas experimentais ocorreram deflexões relativamente altas e pouca eficiência material quando comparadas com as estruturas rígidas, geométricas convencionais.

3) A complexidade de fabricação também está presente criando uma barreira para desenvolver estruturas de "compressão flutuante". Citando Burckhardt "as estruturas esféricas e dômicas são complexas e podem levar à problemas na produção". (Valentim.2005 p. 56).

4) As ferramentas inadequadas do design tem sido uma limitação . Sabe-se que Burkhardt vem desenvolvendo, há 10 anos, um programa (ferramenta) de computador que, aparentemente funciona bem para calcular e projetar Tensegrities. De acordo com Valentim (2005 p.57), Renè Motro e sua equipe do Laboratoire de Génie Civil, da Universidade de Montpellier, desenvolveu o programa "Tensegrité 2000" com relativo sucesso.

5) Schodeck, citado por Valentim (2005 p.57), recomenda que para suportar cargas críticas é preciso que as forças pré-tensionadas devem ser bastante grandes o que poderá ser difícil em construções de maior porte.

#### **4.13.4. Bambu - Introdução**

Considerando-se que a proposta central deste trabalho é a viabilização de objetos úteis desenvolvidos pelo sistema estrutural Tensegrity, utilizando o bambu como elemento comprimido, vamos aqui definir, explicar e mostrar as qualidades deste material tão presente na Natureza que, dado às suas qualidades, é tão útil para o ser humano.

O bambu é uma das plantas mais extraordinárias que existem. Sua florescência é de cem em cem anos, período que também marca o tempo da sua existência. Ele cresce mais rapidamente do que qualquer outra coisa viva no Mundo.

Segundo Robert Austin e Kichiro Ueda (1983:9), "você pode ver o bambu crescendo da mesma forma que você pode ver os ponteiros de um relógio grande se movendo".



Figura 44: Colmos de bambu (foto R. Austin, D. Levy, K. Ueda)

A origem do nome bambu não é muito clara. A proposta mais aceita é a palavra malaia que imita o som do bambu explodindo ao fogo. Marco Polo relata que em suas viagens observou como os homens, que conduziam caravanas, faziam vários amarrados de bambu e os suspendiam a intervalos regulares sobre o fogo do acampamento para explodirem com o calor e, com o ruído da explosão afastarem os predadores, à noite.

O bambu está totalmente imbricado na cultura ocidental. Flautas de bambu existem à quase tanto tempo quanto a humanidade. Leques e guarda-chuvas são, muitas vezes, forrados com papel de bambu que também constitui as paredes divisórias de uma casa ou é usado para registro de textos e poemas.

As agulhas mais sofisticadas para gramofones do início do século passado eram feitas com bambu de altíssima qualidade. Thomas Edison conseguiu finalmente que a sua lâmpada ficasse acesa durante muito tempo, quando ele utilizou um filamento de bambu recoberto com pó de carvão.

Os vietnamitas revelam a sua intimidade com o bambu dizendo: "**O bambu é meu irmão**".

Na sua história sobre o junco chinês G.R.Worcester cataloga a extensa gama de produtos feitos com bambu utilizados a bordo, a saber: “cordas, armadilhas para peixes, toldos, cestos, camas, persianas, garrafas, pontes, vigas, instrumentos de navegação, alimentos, pincéis, baldes, cadeiras, talheres (chopsticks), pentes, acessórios de cozinha, taças, âncoras: de profundidade e flutuantes, coletores de pó, papel, canetas, pregos, traveseiros, cachimbos, toldas, redes de pescar, mastros, chapéus, escadas, conchas de cozinha, lanternas, instrumentos musicais, colchões, bancos, mesas, registros de contagem, ábacos, marcos, tochas, ratoeiras, armadilhas para moscas, hastes para incenso e coçadores de costas (Ueda :1983).



Figura 45: Telhado de uma casa de bambu, detalhe. (foto R. Austin, D. Levy, K. Ueda)

O bambu, como muitos pensam, não é uma árvore mas uma grama gigante. Como tal pertence à família das Gramíneas, *Gramineae(Poaceae)*, sub-família das Bambusaceas, *Bambusaceae* cujos membros se diferenciam das gramas comuns pela anatomia das folhas que apresentam células fusiformes. Todas as gramas que apresentam este tipo de anatomia nas folhas são conhecidas como “*gramas bambusoides*”. Elas variam de tamanho, desde alguns centímetros de altura gênero *Radiella*, que vicejam nas rochas úmidas próximo às corredeiras, nas Guianas, até espécies gigantes, com até 40 metros de altura, como as *Dendrocalamus giganteus*, na Índia.

Existem registros de bambus que cresceram quatro pés (1.22m) em um dia apenas. O período de crescimento total é de dois meses, findos os quais a planta estabelece o seu tamanho definitivo e permanece assim até o fim da sua existência. Mas, a propriedade mais importante desta grama gigante é a sua utilização universal para a realização de uma enorme quantidade de implementos e construções.

"Com bambu nós podemos substituir pilares ou vigas de madeira em todas as suas aplicações, mas, não podemos usar pilares ou vigas de madeira para fazer todas as coisas e estruturas que o bambu é capaz de fazer."  
( Hidalgo-López,2003 p.III)

O bambu é muito mais versátil do que se pensa. Mais da metade da humanidade seria completamente diferente se ele não existisse na face da Terra. Ele atende desde os desígnios mais mundanos aos mais refinados. Casas são construídas com bambu; uma infinidade de utensílios domésticos para trabalho, comida, bebida e cozinha são feitos em bambu. Muito presente, ele provê alimento, matéria prima, remédios e abrigo para uma grande parcela da população mundial. Os rizomas interligados de uma touceira de bambu ajudam a minimizar os efeitos danosos das enchentes e suportar desabamentos e choques de terremotos protegendo as casas de se desmancharem, nos muitos lugares do Planeta onde estes fenômenos da natureza acontecem .

O bambu é encontrável em praticamente todas as regiões do Planeta compreendidas entre os trópicos de Câncer e Capricórnio. Segundo ainda Austin e Ueda, a vida de mais da metade da população mundial seria completamente diferente sem a existência do bambu. Por sua presença em toda a parte ele fornece alimento, matéria prima, abrigo e mesmo remédios para a maior parcela da população mundial. E mais. As raízes interligadas de um bambuzal servem como barreiras naturais para conter enchentes ou estabilizadores de terrenos em deslizamentos e terremotos.

Segundo Oscar Hidalgo-López (2002 p.4)

“Os bambus são plantas perenes consistindo de um sistema de eixos vegetativos segmentados que formam a alternância regular entre nós e regiões internodais. De acordo com as suas posições e formas, ao longo da planta, os eixos segmentados são denominados colmos formando com os galhos e folhas a parte aérea da planta ao passo que a parte subterrânea que lhe dá sustentação é da responsabilidade do sistema de rizomas e respectivas raízes.”

As particularidades físicas do bambu demandam o emprego de duas palavras especiais, a saber:

a) **COLMO** em vez de Tronco, uma vez que o colmo cresce muito rápido, é oco e apresenta juntas (nós) ao longo do seu corpo.

b) **RIZOMA** em vez de Raiz, porque o Rizoma tem características distintas de crescimento e desenvolvimento.

O rizoma tem uma brotação extensa e rápida no sub-solo sendo que, é do seu corpo que nascem os novos brotos de bambu. O surgimento dos colmos depende da velocidade de viagem do rizoma sob a terra e o espaçamento dos colmos na superfície do terreno; sendo que cada colmo tem seu próprio conjunto de raízes.

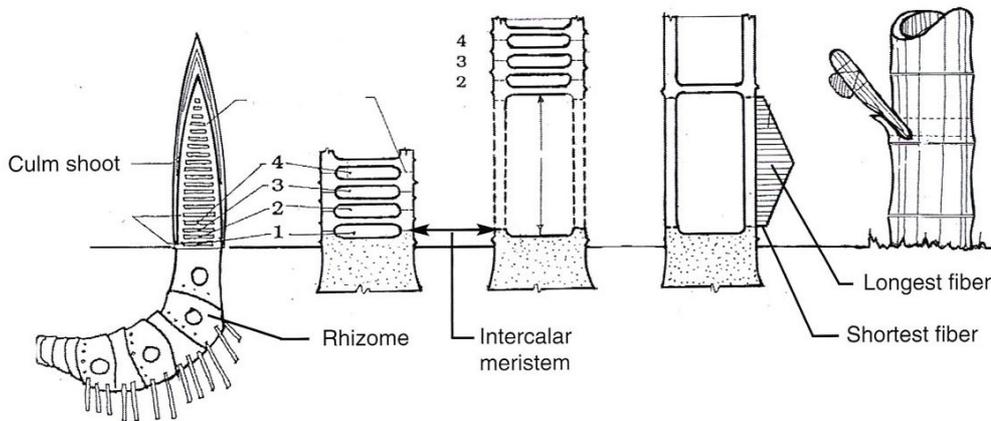


Figura 46: Desenvolvimento do Colmo. Relação entre os comprimentos de fibra nos internós. (Ilust. Oscar Hidalgo-Lopéz)

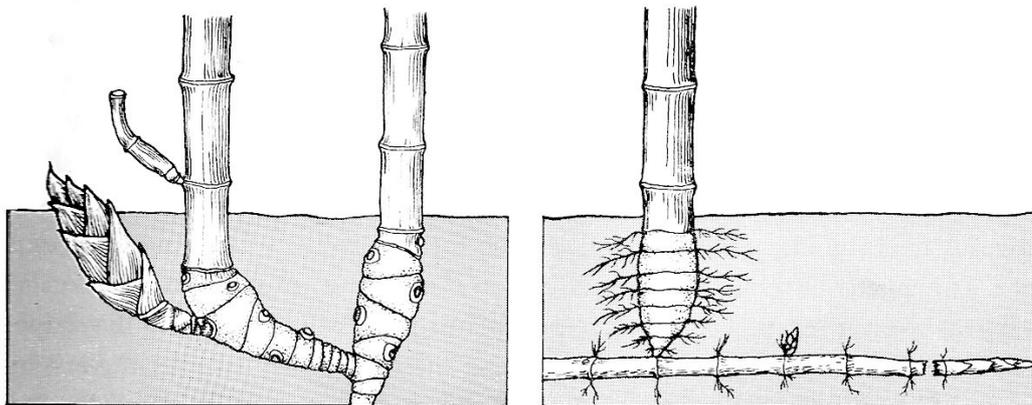


Figura 47: Os dois tipos básicos de Rizoma. (ilust. R. Austin, D. Levy, K. Ueda)

O rizoma tem uma função importante na vida da planta. Ele é o órgão vital, por intermédio do qual as plantas se reproduzem vegetativamente ou assexuadamente pela sua ramificação. Como organismo ele tem a função de armazenar e transportar os nutrientes. Os colmos dependem dos rizomas para seu crescimento e espaçamento no solo.

Com Ueda (1983) vamos aprender que bambus crescidos em capões de regiões montanhosas são melhores e de maior qualidade do que os crescidos na planície e, que o melhor bambu para uso industrial é aquele que tem internódios longos, paredes relativamente finas e alguma flexibilidade. Segundo o autor existem mais de 1.000 tipos de bambu. Os botânicos falam de 1.250 espécies classificadas em, aproximadamente, 50 gêneros. Kiochiro Ueda (1983, p.19) escreve que, no Japão, encontram-se no máximo 25 gêneros sendo que os comuns não chegam a 15 tipos. Na realidade 90% dos bambus do Japão são de dois tipos: o **Mandake**, de longe a maior parte dos 90%, e o **Moso**. Os nomes botânicos mais comuns para estas variedades são: *Phyllostachys bambusoides* e *Phyllostachys pubescens*. O Mandake, como já sabemos é o bambu mais presente no Japão e o mais usado pela indústria em geral. O Moso é mais usado como alimento e para “trabalhos nobres”. Ambos crescem em regiões mais quentes (mas não nos trópicos) atingindo alturas de até 20 mts. e diâmetros de sete polegadas (17,5 cm).

É feita, como já vimos, com freqüência uma distinção entre **bambu macho** e **bambu fêmea**, mas a distinção varia muito de acordo com quem a faz. Os artesãos japoneses classificam como **macho** o bambu que tem paredes espessas e é de qualidade robusta, além de apresentar um internódio curto.

O bambu **fêmea** tem paredes mais finas e mais flexíveis e apresenta uma distância internodal maior. Outra definição considera **bambu macho** aquele que tem apenas um galho no primeiro nó do colmo; se tiver dois é **fêmea**. Outros ainda afirmam que apesar destas definições não existem diferenças sexuais entre as espécies. (Hidalgo-Lopéz 2003)

Hidalgo-Lopéz nos ensina que, como as árvores, os bambus são classificados de acordo com as regiões climáticas em que florescem. Assim os de “madeira macia” crescem, naturalmente, em zonas temperadas e os de “madeira dura” vicejam em zonas tropicais. Estes dois grandes grupos se diferenciam, principalmente na anatomia dos seus troncos e folhas, bem como, na formação subterrânea dos colmos, dependendo ainda da posição geográfica na qual crescem.

Estes grupos são denominados, respectivamente de:

- 1) Tipo Leptomorfo ou **Monopodial** que cresce nas zonas temperadas.
- 2) Tipo Pachymorfo ou **Simpodial** que cresce em zonas tropicais.

A parte aérea dos dois grupos é tão semelhante que é muito difícil reconhecer visualmente, um ou outro. A diferença aparece na morfologia, na ramificação dos rizomas e na formação dos colmos.

Existe ainda um terceiro grupo conhecido como **Metamorfo**, que é uma combinação dos dois grupos mas sem relação com a sua posição geográfica.

Hidalgo-Lopéz nos informa que data de 1879 o desenvolvimento de uma classificação clara para distinguir as duas formas básicas de rizomas, a saber:

- a) *Caespitose* ou Clumping para os bambus Pachymorfos.
- b) Traçante ou Running para os Leptomorfos.

Foi em 1925 que McClure (Hidalgo-Lopéz,2003), quando vivendo na China, introduziu os termos **Monopodial** e **Sympodial** e, mais tarde no Smithsonian Institution em Washington desenvolveu os conceitos de **Leptomorfo** e **Pachymorfo**, respectivamente.

Hoje em dia os botânicos e taxonomistas empregam os termos: Leptomorfo e Pachymorfo nas Américas e Monopodial e Sympodial na Ásia.

#### 4.13.4.1. Rizomas Leptomorfos

Os bambus com rizomas leptomorfos, normalmente encontrados em regiões temperadas da Ásia, tais como China, Korea e Japão, são muito resistentes ao frio e com isto podem também ser cultivados nas regiões bem altas dos trópicos.

Estes bambus são representados na Ásia pelos generos: Arundinaria e Phyllostachys. Os mais resistentes ao frio são: *Phyllostachys praecox*, *Ph. angusta*, *Ph. aureosulcata*, *Ph. propinqua*, *Ph. dulcis*, *Ph. iridencense*, *Ph. nuda*, *Ph. angusta* e *Indocalamus*.

Ainda, de acordo com Hidalgo-Lopéz (2002, p.4) existem nas Américas apenas três espécies nativas leptomorfas, que pertencem ao genero asiático Arundinaria, nas zonas temperadas do sudeste dos Estados Unidos até a latitude 46° norte.

#### 4.13.4.2. Rizomas Pachymorfos

Este tipo também é conhecido como tipo “*clump*”, sympodial, caespitose ou determinado. Ele é típico das zonas tropicais das Américas, Ásia, África e Oceania. Ele não resiste à temperaturas muito baixas. Os bambus com este tipo de rizoma são representados nas Américas pelo gênero *Guadua* e, na Ásia tropical pelo *Dendrocalamus* e *Bambusa*.

Os bambus se desenvolvem a partir de rizomas subterrâneos dos quais se elevam os indivíduos.

O tipo sympodial se multiplica simetricamente em círculos formando touceiras, ao passo que o monopodial se multiplica em todas as direções formando florestas. O bambu do tipo sympodial ocorre mais nas zonas tropicais, o monopodial nas regiões temperadas.

No Brasil ele ocorre em quase todas as regiões. No entanto, se ele não existir em uma determinada área ele pode facilmente ser plantado sistematicamente. Um bom exemplo é o caso da Costa Rica que não tinha bambu mas passou a importá-lo da Colômbia e fazer grandes plantações que, em seis anos estavam prontas para colheita. Com este material as autoridades costarriquenhas começaram um programa de construção de casas populares resultando numa tática político-econômica que deu certo.

O bambu apresenta características estruturais (já estudadas em laboratório) muito mais fortes e ricas do que o seu similar em madeira maciça.

"Somente um ser sobrenatural ou uma super-planta com extraordinárias propriedades físicas e mecânicas poderia suportar a radiação de uma bomba atômica. Em Hiroshima, Japão, a única coisa que sobreviveu à radiação da bomba atômica em 1945, foi um bosque de bambu. O calor da radiação destruiu todas as árvores e casas de madeira; toda a cidade foi arrasada menos o pé de bambu" (Hidalgo-López, 2003 p.III).

#### **4.13.5.**

### **O bambu, material apropriado para construções**

#### **4.13.5.1.**

### **Características do Colmo**

O colmo do bambu consiste de uma alternância regular entre nós e internós, geralmente ôcos, os quais, em conjunto com as paredes rígidas, espessas e cilíndricas, conferem ao próprio uma grande resistência mecânica. Hidalgo-Lopéz menciona um trabalho de Yulong e Liese, publicado em 1996, que a largura da região nodal pode variar de 3 a 10 mm. Esta região revela que as estruturas anatômicas entre as duas grandes espécies (leptomorfias e pachymorfias) são praticamente as mesmas.

A estrutura da região nodal é importante para os movimentos dos líquidos durante a secagem e preservação dos colmos, bem como para as propriedades físicas e mecânicas dos mesmos.

#### **4.13.5.1.1.**

### **Os entrenós**

Os entrenós são as regiões do colmo de um bambu que vão da borda inferior de um nó à borda superior do nó situado imediatamente abaixo. Os entrenós são mais curtos na base e no topo do colmo e, geralmente mais longos no meio do mesmo. Hidalgo-Lopéz cita o exemplo do *Guadua angustifolia* no qual os comprimentos médios das regiões internodais variam de 12 a 24 cm, na base e de 30 a 40 no meio e no topo. Existem espécies como o *Pleioblastus longinternodios* em que as distâncias entre nós variam de 70 a 94 cm.. Em algumas espécies como na *Dendrocalamus distans*, no sul de Burma, a distância internodal pode chegar a 1,80 mts. (Hidalgo-Lopéz, 2002 p.11).

#### **4.13.5.1.2.**

#### **Partes mais fortes e mais fracas do colmo**

##### **a) Ao longo de todo o colmo**

Ainda com Hidalgo-Lopéz vamos aprender que de acordo com estudos realizados por Sioti Uno (1930), as propriedades mecânicas variam da base ao topo do colmo.

Se dividirmos a parte útil do mesmo em três partes iguais, na maioria dos casos a parte superior é mais resistente à compressão e à flexão do que as outras duas. A parte central com suas regiões internodais maiores é mais resistente à tensão e, a parte inferior apresenta os menores valores de propriedades mecânicas.

##### **b) Região Internodal**

Estudos realizados na região internodal revelaram que as fibras são mais curtas perto dos nós e mais longas na parte central do corpo. Consequentemente a parte mais forte está no centro desta região e a parte mais fraca perto dos nós. Isto acontece porque, apesar do diâmetro e espessura de paredes maiores na parte inferior do colmo a quantidade de parenquima é maior do que nas partes: central e topo. Por esta razão, se testarmos a resistência de uma parte internodal com os nós e sem os nós teremos os seguintes resultados:

O cilindro com os nós é 19,2% menos resistente do que o cilindro sem os nós.

Em estado de compressão o cilindro com os nós será 6,4% menos resistente do que um cilindro sem os nós. (Hidalgo-Lopéz, 2003 p.80)

##### **c) Parede do Colmo**

A gravidade específica bem como a resistência à tensão e compressão da parede do colmo, crescem da parte interna para a superfície externa do mesmo. Assim sendo, a região mais fraca fica no primeiro terço da parede do colmo. Explicando melhor: Numa secção transversal do colmo a área fibrovascular pode ser dividida em três camadas. A primeira, a externa, é a mais resistente, a do meio tem resistência mediana e a mais interna é a mais fraca e sujeita facilmente ao ataque de insetos.

Assim sendo a densidade de fibras, bem como a resistência à tração aumenta de dentro para fora da parede do colmo.

Conclui Hidalgo-Lopéz (2003, p.85) que, como as propriedades mecânicas do colmo variam longitudinalmente da base para o topo e, transversalmente, do interior para o exterior da parede do mesmo, o bambu tem um comportamento estrutural diferente do de um caibro de madeira nas mesmas condições.

#### **4.13.5.2.**

#### **Propriedades físicas do colmo**

Como em todos os materiais e em especial nos materiais orgânicos é extremamente importante o conhecimento das propriedades físicas como: conteúdo de umidade, densidade, dureza, condutividade, etc. bem como as propriedades mecânicas relacionadas à resistência dos materiais tais como: resistência à tensão e compressão e seus eventuais efeitos complementares como: flexão, flambagem e torção.

As principais propriedades físicas do Bambu são:

#### **4.13.5.2.1.**

#### **Resistência à tração**

Informa-nos Hidalgo-Lopéz (2002 p.87) que testes de tração com espécimens de secção circular do colmo são difíceis de realizar porque não se tem como fixar a peça de amostra no aparelho de teste. Sugere então o autor que sejam testadas lascas de colmos: com os nós e sem os nós. Relata Hidalgo-Lopéz, que R. Bauman em 1912, utilizando lascas do espécimen *Ph. nigra* (também conhecido como “Bambu negro”), foi o primeiro a descobrir que as diferenças em relação à tração aplicada variavam de 3.843 kg/cm<sup>2</sup> na parte externa a 1.353 kg/cm<sup>2</sup> na parte interna. Muitos autores consideram que a resistência ao cisalhamento cresce com o envelhecimento do colmo e que, o máximo desta resistência é atingida quando a planta tem, entre três e cinco anos de idade. Isto pode ser verdadeiro quanto a resistências à flexão e compressão mas não pode ser assumido como uma regra em relação à tração.

Em experiências desenvolvidas por ele, utilizando espécimens de *Guadua angustifolia* para medir a resistência à tração de cabos com bambu, em concreto ele usou aproximadamente 162 fitas retiradas da parte externa do colmo. Os resultados encontrados foram:

a) A resistência máxima à tração, numa amostra de um colmo com três anos e meio de idade foi: 3.213 kg/cm<sup>2</sup>.

b) A resistência mínima de uma amostra retirada de um colmo com cinco anos de idade foi: 1.017 kg/cm<sup>2</sup>. Nestas experiências foram conseguidos valores altos como: 3.018 e 3.206 kg/cm<sup>2</sup> em amostras retiradas de bambus com apenas um ano de existência.

#### **4.13.5.2.2. Resistência à compressão**

A resistência à compressão paralela ao veio do bambu é a capacidade das fibras do bambu de resistir à compressão aplicada sobre o eixo vertical central do mesmo. Como numa coluna, por exemplo.

A resistência à compressão, neste caso, aumenta numa relação direta com a dureza das fibras e da área ocupada pelas mesmas (espessura da parede).

A relação entre a resistência à compressão paralela às fibras e a umidade contida numa lasca de bambu é a mesma que ocorre na madeira. Isto significa que existe um aumento de resistência máxima ao esmagamento da condição de colmo verde em relação ao colmo secado ao ar livre.

Hidalgo-López testando 76 espécimens de *Guadua angustifolia* descobriu que a resistência à compressão do colmo aumenta com a idade e a altura do mesmo.

Ele encontrou os seguintes valores:

a) Máximo de 705 kg/cm<sup>2</sup> na parte superior de um colmo com cinco anos de idade, e,

b) Mínimo de 261 kg/cm<sup>2</sup> na parte superior de um colmo com um ano de idade.

As resistências à tração, à compressão e à flexão aumentam com a altura do colmo e com a idade que, dependendo da espécie, varia entre sete e oito anos.

Hidalgo-López afirma que o comprimento da fibra tem uma relação direta com o módulo de elasticidade e a resistência à compressão. Existe também uma estreita correlação entre gravidade específica e resistência máxima à compressão.

A resistência à compressão bem como, o percentual de fibras, cresce verticalmente, da base ao topo do colmo e, horizontalmente, das camadas mais internas à parte periférica do colmo. Existem casos em que a resistência à compressão é duas vezes maior no topo do que na base do colmo (Hidalgo-López 2003 p. 88).

#### **4.13.5.2.3. Resistência à Flexão**

O cortex ou tecido mecânico que se situa na parte externa do colmo cilíndrico tem a função de reforçá-lo e protegê-lo das incidências de forças de flexão.

Quando dentro da touceira (clump), o colmo for submetido à força do vento ou peso da neve ele tende a apresentar uma secção transversal elíptica na sua região central.

O colmo flexionado é comprimido na sua parte inferior e expandido na sua parte superior. Se estas forças de tração e compressão superarem a resistência da madeira do bambu, o colmo rachará no sentido do eixo vertical central do cilindro. Um colmo cortado e empregado como viga numa construção, tem o mesmo comportamento estrutural que o descrito acima.

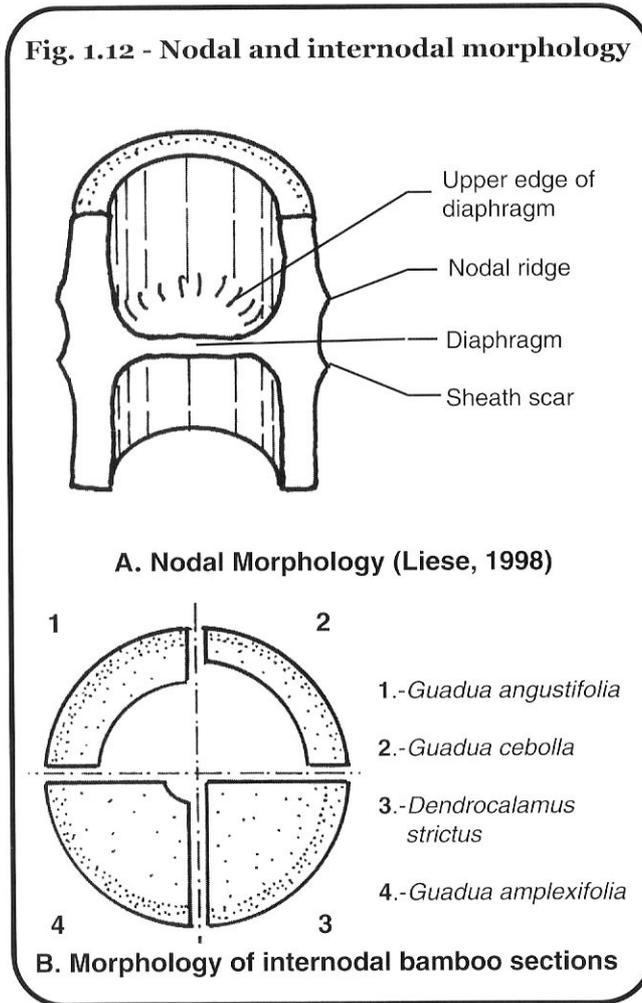


Figura 48: Espessuras de paredes das seções internodais do bambu (ilust. Oscar Hidalgo-Lopéz)

Com Hidalgo-Lopéz vamos aprender que, segundo Takenouchi (1932), se a espessura da parede do internódio for de  $1/8$  à  $1/5$  do diâmetro do cilindro do colmo este será muito mais resistente do que um cilindro de colmo maciço. Os

colmos do *Ph. bambusoides* e *Ph. nigra henonis*, por exemplo, têm uma espessura de parede de  $1/9$  do diâmetro do cilindro podendo, portanto resistir ao peso da neve sem partir. Mas, o colmo do *Ph.edulis* (*Ph. pubescence*) onde a espessura da parede é de  $1/11$  do diâmetro, o colmo se parte mais facilmente.

Assumindo-se que o ponto de saturação da fibra do bambu é de 20%, o aumento da resistência à flexão desde o bambu verde ao bambu secado na natureza é de 0,05% por 1% de redução do conteúdo de umidade. Este valor é menor do que o da madeira maciça que é de aproximadamente 4% por 1% de redução da umidade. Hidalgo-Lopéz menciona R. Bauman que, em 1912 para

muitas espécies pesquisadas estipulou os seguintes valores médios para a resistência à flexão: **1)** nas camadas internas 950 kg/cm<sup>2</sup> e **2)** nas camadas externas 2.535 kg/cm<sup>2</sup>.

Conclui-se que, dependendo principalmente do conteúdo fibroso que varia bastante no corpo do colmo, e das espécies consideradas, o bambu tem excelentes propriedades mecânicas distribuídas assim : Na base, a resistência à flexão da parte externa é duas a três vezes maior do que a da parte interna.

Estas diferenças se tornam menores com o aumento da altura do colmo.

Informa Hidalgo-Lopéz (2003 p. 91) que, com a redução da espessura da parede do colmo, acontece um aumento da gravidade específica e resistência mecânica das partes internas que contêm menos parenquima e mais fibras, ao passo que nas partes externas estas propriedades se alteram apenas um pouco.

Assim, valores mais altos de resistência à flexão e módulo de elasticidade são encontrados na parte superior do colmo.

#### **4.13.5.2.4.**

#### **Resistência ao cisalhamento (esforço cortante)**

Apesar de árvores (seja com madeiras duras ou moles) e bambus serem plantas lenhosas, suas anatomias, características morfológicas e processos de crescimento, bem como, processos estruturais são diferentes. A maioria dos pesquisadores não se dá conta que o bambu, diferentemente da madeira maciça, não tem grande resistência ao cisalhamento no sentido paralelo ao seu eixo vertical. A presença dos nós tem apenas uma pequena influência nesta capacidade de o colmo resistir a uma força de cisalhamento.

Hidalgo-Lopéz (2003 p. 92) informa que esta pouca resistência é benéfica, em alguns casos, como na fabricação de fitas de bambu para cestaria ou cabos. No entanto, em construções, mesmo que os pesquisadores tentem usar os mesmos espécimens de bambu como os usados para testar madeira, eles cedem com facilidade ao longo da direção paralela ao eixo principal. Em 1978 ele testou 27 espécimens de *Guadua angustifolia* de diferentes idades e concluiu que o máximo de resistência à força de cisalhamento era de 144kg/cm<sup>2</sup>, a média 93kg/cm<sup>2</sup> e a mínima 45 kg/cm<sup>2</sup>. Mais tarde, em 2002, ele chegou à conclusão que aquele sistema de avaliação não era prático, na verdade, era inócuo. Assim, segundo ele, a melhor maneira de testar um bambu em relação à força de cisalhamento é retirando amostras com os nós e sem os nós de partes da base,

do centro e do topo do colmo onde se consegue diâmetros e espessuras de parede diferentes obtendo-se, com este procedimento, leituras e médias muito mais precisas.

#### 4.13.5.2.5. Densidade e Gravidade Específica

Densidade, ou melhor, Massa Específica, segundo Horácio Macedo<sup>3</sup>, é a massa de um material por unidade de volume. A Gravidade Específica é a razão da massa específica de um material pela massa específica de um volume igual de água. A gravidade específica da madeira do colmo é a medida da sua substância sólida e um índice das propriedades mecânicas deste colmo.

Ela depende principalmente da quantidade e distribuição de fibras em volta dos feixes vasculares, bem como o diâmetro das fibras e a espessura da parede da célula. Segundo Hidalgo, dependendo da espécie de bambu e do respectivo rizoma a gravidade específica varia de 0,5 a 0,9 cm<sup>3</sup>. A gravidade específica bem como a densidade do bambu cresce das camadas internas para a parte periférica do colmo e da base do mesmo para o topo. Os percentuais são: base 0,527, meio 0,607 e topo 0,675. Já a variação na direção radial vai de 20 a 25% nos bambus de paredes grossas. Nos bambus mais finos, 50% das fibras da parede do colmo estão situadas no terço externo da parede o que aumenta a sua densidade. Isto indica que a resistência da parede do colmo aumenta de dentro para fora e se concentra na camada correspondente ao terço mais externo da parede do colmo. A gravidade específica nos nós é geralmente mais alta devido a maior concentração de fibras e menos parenquima como na parte entre os nós, no entanto, esta região é menos resistente aos esforços de flexão, compressão e cisalhamento.

---

3 **Massa específica ou massa volumétrica:** *Fís.* é a massa da unidade de volume de um corpo. É comum designar-se também como densidade absoluta ou massa volumar. Os gases têm-na muito pequena, da ordem de alguns miligramas por cm<sup>3</sup>, nas condições normais de pressão e temperatura (0° à 1 atm). A massa específica dos líquidos é a ordem de 1 grama por cm<sup>3</sup>. A massa específica dos líquidos é pouco dependente da pressão mas varia com a temperatura. A massa específica dos sólidos pode atingir valores bem elevados sendo os mais altos os dos metais do grupo da platina." (Macedo, 1976 p.222)

#### **4.13.5.2.6. Teor de umidade**

As propriedades de resistência do bambu são influenciadas pela umidade, seja ela proveniente do vapor no ar ou da quantidade de umidade interna. O teor de umidade é o peso da água contida na parede e no lúmen celular de uma seção de colmo expressa como percentagem em relação ao seu peso depois de completamente seco em autoclave.

A quantidade de umidade de um bambu vivo varia enormemente entre as espécies; nas diferentes partes de colmos da mesma espécie; além de ser influenciada pela idade e a estação do ano na qual o bambu é cortado.

Os colmos jovens e imaturos apresentam um teor quase uniforme ao longo de toda a planta e uma percentagem de umidade que varia de 40% a 150%. Nos colmos mais velhos (dois anos de idade) a percentagem de umidade decresce para 100 a 60%. A região do internódio é mais úmida que a região dos nós. De uma maneira geral o colmo fica úmido e fresco ao longo de toda a sua vida.

##### **4.13.5.2.6.1. O equilíbrio do teor de umidade**

O bambu, assim como a madeira, é higroscópico. Isto significa que ao ser colocado num ambiente muito úmido ele absorverá a umidade do entorno. No entanto, quando colocado num ambiente seco ele vai ceder parte da sua umidade até atingir um ponto de equilíbrio com a umidade da atmosfera. O teor de umidade do colmo no ponto de equilíbrio é chamado de Teor de Umidade Equilibrado e é definido em porcentagem em relação à seção de um colmo, completamente seco em autoclave.

##### **4.13.5.2.6.2. Ponto de saturação das fibras**

A umidade no bambu verde é parcialmente absorvida pelas paredes das células e parte presente nas cavidades das mesmas, graças à ação das forças capilares. A medida que a madeira das paredes seca e perde umidade, as paredes das células liberarão umidade quando suas cavidades estiverem secas. Esta condição em que paredes celulares estão saturadas e os lúmens das células vazias é conhecida como Ponto de Saturação da Fibra. Nas madeiras

em geral o ponto de saturação da fibra varia de 28 a 30%. Já no bambu este ponto de saturação é influenciado pela composição do tecido do colmo e varia no interior do mesmo e entre espécies numa margem de 13% (Hidalgo-Lopéz, 2003 p.73).

#### **4.13.5.2.6.3. Retração**

O bambu, da mesma forma que a madeira, é anisotrópico<sup>4</sup> nos principais eixos em relação ao colmo cilíndrico, considerado na vertical. Assim os eixos: radial, axial e tangencial apresentam variações desiguais. Nas toras, a variação dos conteúdos de umidade, acima do ponto de saturação da fibra (13%) não afeta o volume ou a resistência da madeira. À medida que a madeira perde umidade abaixo do ponto de saturação das fibras, a retração começa e a resistência aumenta. Neste casos a retração maior ocorre nos anéis de crescimento (tangencialmente); um pouco menos através dos anéis (radial) e muito pouco ao longo da fibra (longitudinal). Diferentemente da tora de outro tipo de madeira, o bambu começa a retrair logo no início da cura. Esta retração afeta não só a espessura da parede do colmo mas também, o diâmetro do mesmo, além de mostrar uma tendência de decrescer da base ao topo da planta. A cura de colmos adultos da condição de verdes até, aproximadamente, 20% de umidade provoca uma retração entre 4% e 14% na espessura da parede e de 3% a 12% no diâmetro. (Hidalgo-Lopéz, 2002)

**O bambu encolhe mais na direção radial e menos na longitudinal.** A retração tangencial é maior nas partes externas e menor nas partes internas da parede. Colmos maduros encolhem menos do que os verdes.

A variação no teor de umidade, densidade e resistência ao longo da espessura da parede do bambu, é provavelmente responsável pelo comportamento adverso do bambu quando em uso. Hidalgo-Lopéz (2003 p.73) nos informa que experiências com bambu verde mostram retrações irreversíveis e excessivas bem acima do ponto de saturação da fibra, com recuperação parcial apenas nos estágios intermediários. Este comportamento está ligado ao colapso. Abaixo do ponto de saturação da fibra o comportamento é igual ao da tora de madeira convencional.

4 **Anisotropia:** *Fís.* Característica geral de um meio em que uma ou mais propriedades dependem da direção em que são observadas no meio. Os cristais, exceção feita para os do sistema cúbico são sempre anisotrópicos. Os líquidos não apresentam, em geral, anisotropia e os gases nunca os têm (Macedo, 1976 p.18).

O bambu seca melhor quando deixado ao ar livre. O secamento em autoclaves pode provocar rachaduras na superfície ou fissuras mais graves devido ao processo acelerado de retração.

A tora de madeira aumenta de resistência à medida que ela seca. Por exemplo a resistência à compressão, pelas extremidades, de pequenas peças é, aproximadamente, duas vezes maior quando o teor de umidade for de 12 % do que na madeira completamente úmida, e se a mesma peça for seca a 5% sua resistência triplica. Diferentemente da tora, a resistência do bambu, à medida que ele seca, não se altera muito. É por esta razão que, segundo Hidalgo-López, no que se refere à resistência, não existe nenhum risco de se utilizar bambu verde nas construções.

#### **4.13.5.2.6.4.**

##### **Rachaduras e Fissuras**

O bambu não tem, como nas árvores, uma resistência grande ao cisalhamento paralelo ao eixo longitudinal. É por esta razão que os colmos racham facilmente. Esta característica tem desvantagens se, por exemplo, se tenta pregar o colmo, mas, ao mesmo tempo permite tirar fitas para fabricar uma grande quantidade de objetos tecidos com bambu.

A qualidade do bambu de abrir somente ao longo da fibra, depende do número de **feixes fibro-vasculares**. Quanto maior o número de feixes mais fácil se torna fender o colmo. Exemplo de colmo bom para dividir longitudinalmente, dado por Hidalgo-López é o genus *Philostachus* nas suas formas: *Nigra henonis* e *Bambusoides*.

#### **4.13.5.2.6.5.**

##### **Condutividade Térmica**

Condutividade térmica é a medida de fluxo de calor que atravessa materiais sujeitos a um gradiente de temperatura. O bambu, assim como as madeiras, quando em estado seco tem as suas cavidades celulares cheias de ar que é um péssimo condutor. Em razão deste fato o bambu é um excelente isolante. Experiências têm demonstrado que o bambu tem a condutividade térmica um pouco maior que a da madeira comum, mas a diferença é desprezível.

#### **4.13.5.2.6.6.**

##### **Dureza**

A dureza no bambu representa a resistência ao desgaste e ao choque. Informa Hidalgo-Lopéz (2003 p. 74) que, segundo o Wood Handbook 1987, a medida da dureza na madeira é dada pela carga necessária para se engastar uma esfera de 0,444 polegadas até o seu diâmetro na superfície da mesma. Os valores apresentados representam a média das penetrações: radial e tangencial. No caso do bambu, se a esfera for colocada no internódio central, certamente o colmo vai rachar porque as fibras longas vão ceder facilmente à pressão. Portanto, o certo é posicionar a esfera bem encostada num nó, onde se localizam as fibras mais curtas.

Como foi explicado anteriormente, a parte mais resistente da parede do colmo é a que corresponde ao terço externo onde se situam o maior número de feixes de fibras; e, o mais fraco, é o terço interno do colmo onde se encontram menos feixes de fibras e um maior número de células parenquimais.

Ainda com Hidalgo-Lopéz vamos aprender que o cortex ou camada mais externa da parede do colmo consiste de duas camadas de células epidérmicas com alto teor de silício o que aumenta a resistência desta camada. A camada externa do cortex é recoberta por uma cutícula brilhante, composta de celulose e pectina recoberta por uma camada de cera. Por baixo desta epiderme encontramos a hipoderme composta por várias camadas de células esclerenquimatosas de paredes grossas. São estas duas camadas que conferem uma dureza extraordinária ao colmo e ainda o protegem contra insetos, choques e desgastes.

#### **4.13.6.**

##### **A Estrutura Tensegrity onde se pode substituir o aço pelo bambu**

**O bambu tem a resistência do aço só que é bem mais leve.** Suas propriedades de trabalho mecânico tais como flexibilidade e resiliência tornam-no uma escolha ideal para a construção de estruturas auto-tensionadas. Segundo José Luiz Ripper, a aplicação prática da estrutura triangulada (treliça) em bambu é grande, não só no sentido da variedade como da escala. Ela pode ser aplicada desde a montagem de estruturas usando hastes rígidas (estroncas), até a feitura de uma rede de cabos. É importante frisar que não se trata aqui de substituir materiais como aço, ferro ou plástico pelo bambu, mas sim, criar uma

identidade própria para esta gramínea. Outro dado importante a favor deste material é que ele é endêmico em nossas florestas e fora delas. De acordo ainda com o professor José Luiz Ripper, na China se beneficia primeiro o bambu com técnicas industriais para depois tratá-lo com técnicas artesanais resultando em produtos com grande variedade de usos e formas. O beneficiamento é feito perto do bambuzal. As peças já seguem prontas para a montagem. No entanto, nem a produção nem a montagem são robotizadas para se poder empregar mais mão de obra. O mesmo se aplica ao nosso caso. Embora se possa utilizar técnicas industriais, a idéia aqui é usá-lo o mais diretamente possível, desde o processo de corte até a aplicação nas estruturas.

#### **4.13.6.1. Propriedades mecânicas do colmo**

O bambu e a madeira têm sido ainda muito usados para as construções, mais pela tradição do que pela tecnologia. A partir do início do século passado a tecnologia dos materiais vem produzindo estruturas e implementos para construção, insuperáveis. Isto fez com que as indústrias americanas e européias desenvolvessem todos os tipos de compensados, laminados e compósitos para obter membros estruturais competitivos. O esforço das indústrias, durante a Segunda Grande Guerra, também contribuiu, em muito, para pesquisas e resultados. Em ambos os lados do Eixo, com a direta participação de designers, foram desenvolvidos: aviões inteiros (ex. o Mosquito, bimotor inglês), planadores, hangares, hospitais de campanha, móveis empilháveis, macas, etc. usando madeira compensada fabricada com resinas impermeáveis. No entanto, com tudo isto, nas Américas e na Ásia, nunca se deu a devida importância ao bambu, uma vez que era material empregado tradicionalmente pelos pobres para a construção das suas habitações e fabricação dos seus objetos de transporte, trabalho, operações mecânicas, etc.

Em Hidalgo-López (2003 p.77) aprendemos que o primeiro estudo sério sobre as propriedades mecânicas do bambu, foi realizado na Alemanha, por Von R. Bauman, em 1912. Bauman chegou à conclusão que a resistência tênsil da parte externa de um colmo com 8 cm de diâmetro, era, aproximadamente, duas vezes maior que a resistência interna deste mesmo colmo, a saber: 3068 kg/cm<sup>2</sup> para 1594 kg/cm<sup>2</sup> e a resistência de toda a espessura da seção transversal da parede do colmo era 2070 kg/cm<sup>2</sup>. Num colmo com diâmetro externo menor

(3,5 cm), da espécie Tonkim, os valores da resistência interna aumentaram para de: 3843 kg/cm<sup>2</sup> a 1353 kg/cm<sup>2</sup>. Valores maiores do que os obtidos no colmo de 8 cm de diâmetro cuja espécie Hidalgo-Lopéz não esclarece.

A pesquisa mais completa sobre as propriedades mecânicas e químicas de várias espécies de bambu foram realizadas no Japão por Sioti Uno, em 1932, na Faculdade de Agricultura de Utsumomiya. Ele descobriu que a parte superior do colmo é mais resistente à compressão do que a parte central e a base do mesmo. Descobriu ainda Sioti que a parte central do colmo (internódio) é mais resistente à tensão do que suas extremidades (importante para nosso trabalho), bem como o fato de existirem espécies como o *Bambusa stenostachya* onde a camada exterior é 5,5 vezes mais forte do que a camada interior.

Dentro do programa de esforço para atender aos problemas gerados pela Segunda Guerra, como já foi mencionado antes, insere-se a pesquisa, segundo Hidalgo, mais completa e abrangente sobre a aplicação do bambu no concreto em substituição ao ferro. H.E.Glenn, da Faculdade de Agricultura de Clemson na Carolina do Sul, começou em 1944 e publicou em 1950 esta pesquisa que estudou o uso de ripas, tiradas de bambus gigantes e bambus inteiros de menor diâmetro para emprego nas construções em concreto.

Os resultados finais da pesquisa foram aplicados, sem muito sucesso, na construção de vários tipos de prédios durante a Guerra do Vietnã. A razão deste insucesso se deveu ao fato de que na época (1944-1950), não existia muita informação sobre a anatomia do bambu resultando que Glenn e vários outros pensaram, erradamente, que se o bambu era madeira as mesmas propriedades técnicas e mecânicas observadas para as toras se aplicariam, sem dúvida, também ao próprio.

"Este foi um grande erro porque a anatomia bem como, a morfologia do bambu são diferentes."

"O erro reside no fato de que as amostras de teste da madeira são perfeitas sem nós nem rachaduras, nem fibras revessas, fatores que não permitiriam uma leitura correta da resistência à compressão, da madeira."

Além disto, não foi considerada a estrutura do colmo do bambu que é composta de uma série de internódios, separados por nós que conferem uma enorme resistência mecânica ao mesmo, permitindo flexões a favor do vento sem nenhum dano para a sua estrutura. Assim sendo o teste de resistência mecânica tem que ser feito com um elemento composto por dois nós na extremidade do trecho de colmo a ser testado, em vez de usar pequenos anéis da região do internódio como muitos pesquisadores têm, erroneamente, feito. Portanto, torna-se necessário criar toda uma nova metodologia de testes para as propriedades estruturais do bambu, baseadas na estrutura anatômica, na morfologia e na fisiologia dos seus materiais naturais." (Hidalgo-Lopéz 2003 p.77)

#### 4.13.6.2. Diferenças entre Madeira e Bambu

Em primeiro lugar é importante frisar que bambu não é uma árvore, mas uma grama arborescente. A única relação com uma árvore é o fato de ambas serem lenhosas e terem componentes químicos semelhantes. Fora isto as duas têm diferenças na sua anatomia, morfologia e no seu processo de crescimento, sendo que, no que se refere às propriedades mecânicas, Oscar Hidalgo-Lopéz é categórico: "as do bambu são melhores".

Numa escala macro, um tronco de madeira é um cilindro sólido composto de casca, alborno e cerne (duramen), ao passo que o bambu é um cilindro oco composto de vários internódios, propriamente ditos. Os nós têm um papel importante na resistência à compressão, no sentido do eixo vertical, reforçando o bambu contra colapso estrutural e aumentando a sua rigidez.

"Vista microscopicamente a parede celular da madeira aparece como um cilindro formado por um compósito de muitas camadas, sendo que o ângulo helicoidal das micro-fibrilas, em cada camada, são diferentes, o que afeta em muito as propriedades mecânicas da madeira. A maioria das células são alongadas e afiladas nas extremidades e são chamadas de fibras, nas madeiras duras e traqueóides, nas madeiras macias. São estas fibras que conferem resistência à madeira".

"O bambu pode ser definido como sendo feito de um compósito ligno-celulósico, reforçado axialmente por um revestimento de fibras liberianas (líber), organizadas em feixes vasculares envoltos por uma matriz de células de paredes finas conhecida como parenquima." (Hidalgo-Lopéz 2003 p.78)

Sendo assim, Oscar Hidalgo-Lopéz, conforme já foi ventilado anteriormente, acha que, em virtude das diferenças existentes entre as anatomias e morfologias do bambu e da madeira torna-se necessário estabelecer uma metodologia, bem como, uma bateria de testes adequados especificamente ao estudo do bambu como elemento estrutural.

Com relação a isto, nos últimos quinze anos nota-se uma intensificação de testes mecânicos com o bambu, vistos sob a ótica da mecânica estrutural, com é o caso do Prof. Khosrow Ghavami, do depto. de Engenharia Civil da PUC-Rio, que se dedica há muitos anos a este assunto. ([www.abmtenc.civ.puc-rio.br](http://www.abmtenc.civ.puc-rio.br))

Principais fatores que se devem manter em mente para estudar as propriedades mecânicas do colmo objetivando o desenvolvimento de projetos e construções com bambu:

- 1) Clima.
- 2) Topografia.
- 3) Solo.
- 4) Altitude acima do nível do mar.
- 5) Influência da idade do colmo.
- 6) Partes do colmo que têm as maiores e menores resistências.
- 7) A extraordinária força tensil dos feixes vasculares.
- 8) As propriedades mecânicas de cada um dos entrenós varia ao longo do colmo.
- 9) A propriedade das células de bambu de gerar sinais elétricos quando submetidos à tensão (stress) e a influência das suas propriedades elétricas na modelagem e remodelagem dos seus tecidos rígidos.
- 10) Testes de tensão dos colmos.
- 11) Testes de compressão dos colmos.
- 12) Resistência à flexão.
- 13) Resistência ao cisalhamento.
- 14) Testes de impacto.

#### 4.13.6.3.

#### Principais espécies de Bambu disponíveis nas Américas

Das 440 espécies nativas existentes nas Américas, 320 são lenhosas e 120 herbáceas.

Das lenhosas as do gênero *Guadua* são consideradas as melhores espécies das Américas, que por serem em geral de grande porte, têm grande aplicação nas construções e na indústria em geral.

Segundo Hidalgo-López (2003 p.36) durante a década de 50, houve uma grande devastação pois, por ignorância as pessoas viam o bambu como erva daninha. Das 15 espécies gigantes originais sobraram apenas 8; 4 no Brasil e nordeste da América Latina e 4 na Colômbia.

O gênero *Guadua* inclui por volta de 36 espécies (sendo que algumas ainda não foram classificadas), com espessuras de colmo variando entre 1 e 22 cm. e alturas chegando a 30 mts. Destas espécies, por volta de 20 são nativas do Brasil e 8 da Colômbia.

No seu livro: **Bamboo, the gift of the gods**, Oscar Hidalgo-López faz uma grande listagem do gênero *Guadua*. Citarei aqui apenas as que crescem no Brasil:

- 1) *Guadua angustifolia Kunth* : também conhecida no Brasil como "taquaruçu"- Paraná, Minas Gerais e Goiás.
- 2) *Guadua barbata*: Minas Gerais.
- 3) *Guadua capitata* - Mato Grosso do Sul.
- 4) *Guadua distorta* - Santa Catarina e São Paulo.
- 5) *Guadua glaziovii* - Rio de Janeiro.
- 6) *Guadua glomerata* - Amazonas e Pará.
- 7) *Guadua Lindmani* - Rio Grande do Sul.
- 8) *Guadua latifolia* - Amazonas.

- 9) *Guadua longifimbriata* - Rio de Janeiro, em Petrópolis e São Cristóvão. Segundo Hidalgo-López (2003 p.39) esta espécie pode ser a que ele denominou *Guadua brasileira* uma vez que ainda não foi devidamente classificada.
- 10) *Guadua macrostachya* - Pará.
- 11) *Guadua maculosa* - Goiás.
- 12) *Guadua paniculata* - Goiás.
- 13) *Guadua refracta* - Goiás.
- 14) *Guadua riograndensis* - Rio Grande do Sul.
- 15) *Guadua spinosissima* - Santa Catarina.
- 16) *Guadua superba* - Acre e Amazonas.
- 17) *Guadua tormentosa* - Rio Branco.
- 18) *Guadua Trinii* - Rio Grande do Sul.
- 19) *Guadua venezuelae* - Maranhão.
- 20) *Guadua virgata* - Minas Gerais.
- 21) *Guadua weberbaueri* - Acre e Amazonas.
- 22) *Guadua brasileira* - Rio de Janeiro, Petrópolis. De acordo com Hidalgo-López (2003 p.40) esta é a maior espécie das Américas com os colmos variando de 30 a 36 metros de altura e de até 22 centímetros de diâmetro. Esta espécie foi totalmente extinta em Petrópolis, mas, graças ao sr. Manuel Rojas Queiroz, que, quando em lua de mel em 1946 no Hotel Quitandinha, onde haviam muitas touceiras, levou alguns rizomas para a Costa Rica onde passou a cultivá-la nas suas fazendas, salvando-a da extinção.

Desta lista destaquei algumas espécies adequadas às estruturas tensegrity em bambu, a saber:

- 1) *Guadua brasileira*, considerada por Hidalgo-Lopéz como sendo excepcional do ponto de vista econômico para construções, fabricação de laminados e compósitos.
- 2) *Guadua angustifolia Kunth* - uma das mais importantes espécies do mundo devido a sua grande resistência e durabilidade resultando no melhor material para construções e fabricação de compósitos.
- 3) *Guadua weberbaueri* - tem os internós mais longos (90 cm) cresce até 10 metros de altura e tem diâmetros de 5 a 6 centímetros.
- 4) *Guadua superba* - apresenta colmos com até 20 metros de altura e diâmetros de 10 a 15 centímetros.
- 5) *Guadua Trinii* - colmos atingindo até 10 metros e diâmetros de 3 a 5cm.

#### **4.14. Construção Tensegrity com Bambu**

Como já vimos ao longo deste trabalho as estruturas tensegrity, com suas características de resistência, leveza e simplicidade compõe um sistema estrutural universalmente presente na Natureza. A grande vantagem de serem autoportantes e prescindirem de fundações ou outros artificios estruturais para cumprirem, com eficiência, as funções para as quais foram destinadas, fazem-nas objeto da necessidade de muitos estudos, ainda, para aplicá-las em obras concretas como construções, veículos, objetos, etc.

As qualidades das estruturas tensegrity que fazem esta tecnologia atraente, para uso humano, são sua extrema leveza, resistência, resiliência e habilidade de empregar os materiais de uma maneira muito econômica. Nas estruturas tensegrity os etéreos (porém fortes) membros tensores, predominam enquanto que os membros comprimidos, que têm mais corpo material, estão em menor número dentro das estruturas.

Assim sendo, as construções de prédios, pontes e outras estruturas usando os princípios da tensegrity, podem torná-los, além de resistentes, muito resilientes e muito econômicos ao mesmo tempo.

Mas é certo que, assim como qualquer estrutura, elas necessitam de uma base para dar-lhes estabilidade sobre o solo (exatamente como nos seres humanos ou nos animais terrestres, onde os pés ou patas dão a estabilidade pelo apoio dos mesmos no solo). Somente no espaço sideral, onde reina o Imponderável, uma estrutura tensegrity poderá manter sua forma inalterada.

Tensegrity ainda permanece uma grande incógnita quanto à estabilidade e resistência às cargas estáticas e dinâmicas muito grandes.

Como estruturas autoportantes já vimos que funcionam (como nos projetos aqui apresentados). Resta estabelecer uma série de testes laboratoriais a longo prazo, utilizando modelos em escala correta, tanto de materiais quanto de dimensões e respectivas aplicações de grandes cargas. As estruturas espaciais, sem dúvida uma das mais importantes conquistas técnicas da arquitetura do século XX, simplificam e separam as forças estruturais, articulando-as num espaço tri-dimensional. “Os padrões espaciais de tração e compressão resultantes atuam como integrais indeterminadas que não podem ser reduzidas a planos e secções bi-dimensionais. Os momentos fletores, esforços de cisalhamento e torção, são eliminados ou reduzidos a efeitos de segunda ou terceira ordem”. (Allen, 1978)

Estou falando aqui de redes de cabos, membranas tensionadas e/ou pressurizadas, cascas, tramas espaciais (tensegrity) e as omnipresentes, como diria Fuller, estruturas geodésicas - encontráveis na Natureza, nas radiolárias, nas diatomáceas, nas estruturas dos cristais ou conchas marinhas resultando em eficientes geometrias poliédricas, orgânicas ou de forma livre, todas elas caracterizadas por usar um mínimo de energia potencial e um gasto mínimo de material, propiciando gerar grandes luzes com grande liberdade de projeto.

As estruturas espaciais abrem novos caminhos tanto para novos métodos de construção e aplicações de novos materiais como para materiais tradicionais empregados numa nova forma plástica e maleável.

"Existe aqui uma estética aplicada e implícita: um respeito pelo lugar, uma tendência à simplicidade, um esforço pela integração orgânica gerando um novo espaço simples e puro, marcado pela beleza de um cabo tensionado, pela lógica cristalina de uma malha espacial, a opulenta e maleável consistência de geléia da espuma, a ondulante massa dócil de uma estrutura inflável." (Allen, 1978 p.39)

Isto posto vamos nos concentrar nas estruturas tensegrity. Estas por não terem nenhum dos seus elementos sólidos (hastes) amarrados entre si são estruturas "**flutuantes**" e como todas as outras, somente estabilizadas quando apoiadas no solo, como domos geodésicos, tendas, pirâmides, torres de bases largas, passarelas e pontes (principalmente com bases piramidais). No LILD foi até construída uma pirâmide montada sobre flutuadores que, em águas calmas, navegou. Existe ainda o projeto e desenvolvimento de uma pequena bicicleta em tensegrity, realizada no LILD, conforme se mostra na pág. 209.

No LILD Laboratório de Living Design da PUC-Rio, vêm sendo feitas há 20 anos exaustivas experiências com estruturas tensegrity e seus comportamentos diante das mais variadas situações.

O grande desafio agora é a construção de estruturas úteis, empregando o bambu como elemento comprimido, que possam ser empregadas pelo homem para a realização de tarefas concretas.

Existe ainda um desafio maior, o de se construir veículos montados com estruturas tensegrity.

Já foram realizados alguns modelos preliminares que revelaram, que neste mister, entram novas e complexas variáveis, de ordem técnica, que precisam ser avaliadas para o desenvolvimento de um projeto viável.

Por enquanto, a meu ver, veículos de qualquer espécie montados com estruturas tensegrity, para realizarem com eficiência seu trabalho precisarão ter, em alguns pontos de compromisso estrutural, elementos amarrados, fabricados em bambu ou não.

#### **4.14.1. Autoconstrução possível**

"Num homem construindo a sua própria casa existe algo da idoneidade de uma pássaro construindo o seu próprio ninho".  
(Henry David Thoreau) no livro do (Allen, 1978, p.6)

O que você faria se ganhasse um milhão de libras? Esta era uma pergunta que nos faziam freqüentemente quando éramos jovens; ela dava asas à nossa imaginação e nos fazia sonhar acordados. Eu tinha duas respostas possíveis: uma era comprar um iate, contratar uma orquestra e sair viajando pelo mundo com os meus amigos ouvindo Bach, Schumann e Brahms; outra era construir uma aldeia onde os felás seguiriam o tipo de vida que eu gostaria que eles levassem (Hassan Fathy, 1973, p.13).

Nos tempos que correm a arquitetura vernácula nos oferece um novo aspecto a ser considerado: a aplicação de cada material ao uso mais apropriado ampliando seu alcance e explorando sua capacidade até um limite confortável que não o coloque em choque com a sua natureza. As construções vernáculas podem se classificar em termos próprios em relação às formas modernas, a saber: estruturas tensionadas como nas cabanas de junco das margens do Nilo, onde até palácios de ricos emires são construídos desta forma; armação das paredes com argila utilizando bambu como nas casas do caboclo brasileiro e vários povos íbero americanos; estruturas reticuladas das casas de madeira como com nas casas do interior do sul do Brasil ou da costa oeste do sul da América do Sul: todas afirmam a integridade de uma estética construtiva moderna na qual se manifestam claramente os próprios princípios da construção.

"Nos telhados dos alojamentos cambodjanos pode-se identificar uma membrana, nos juncos curvados do Iraque meridional um sistema tensionado, na tecelagem vegetal coberta de argila dos maias um bom exemplo de concreto armado, e com os discípulos de Frei Otto, explorando as possibilidades das construções em forma de tenda, o alojamento dos beduinos (tuaregs) adquire nova importância". (Olivier,1978 p.25)

A técnica Tensegrity, uma vez absorvida é de relativa facilidade de construção e aplicação. É com este propósito que este trabalho foi desenvolvido, isto é, dar às pessoas mais simples e vivendo em áreas remotas um sistema de construir relativamente simples, leve, utilizando ferramentas muito básicas e os materiais que existem em abundância na Natureza.

Neste caso estamos falando das estruturas tensegrity utilizando o bambu como material comprimido<sup>5</sup>.

5 NA- No Oriente se empregam anualmente quase dois milhões de toneladas de bambu para a construção de casas. Tido como um material feito para ser trabalhado, o bambu expõe um caráter "agradecido" (como dizem os artesãos); flexível mas firme; leve porém resistente. Racha com facilidade somente na direção paralela ao eixo longitudinal central, nunca numa outra; pode ser dócil ou rígido, de acordo com a demanda da ocasião, pode ser comprimido ou necessário para ser introduzido num buraco; quando aquecido pode ser curvado para assumir e conservar uma nova forma; é reto e trabalha muito bem à tração. (Cobijo, 1979, p.61)

Como já foi visto em 4.13.16, o bambu pode substituir o ferro, o aço, o alumínio ou o plástico com grandes vantagens, a saber: o bambu é extremamente resistente e maleável, pode ser moldado a fogo para praticamente quaisquer formas que se queira, é extremamente abundante, de reposição eterna, pois cresce muito rápido, e é do íntimo conhecimento dos homens do nosso interior.

Além da leveza uma estrutura tensegrity em bambu é resiliente oferecendo, quando necessário, uma função de amortecimento dos eventuais choques. Outra vantagem é a associação com tecidos tensionados que também podem fazer as vezes de cabos, como em abrigos, tendas, parasóis, etc.

No caso de casas ou galpões rurais, por exemplo, o tecido (impermeável) substitui com vantagens o sapê, a telha e a folha de flandres corrugada porque é até mais rápido e fácil de aplicar. Além disto se o tecido não for impermeável ele pode ser impermeabilizado com a aplicação de resinas naturais extraídas no local.

Assim sendo, é minha opinião que a técnica tensegrity, utilizando bambu para construir objetos é uma mistura tipicamente contemporânea de **low-tech** (baixa tecnologia) com **high-tech** (alta tecnologia).

Mas a tecnologia é nova e as incógnitas são muitas.

“Devido à falta de informação sobre este tipo de estruturas são poucos os artistas, arquitetos e engenheiros capazes de desenhar e construir este tipo de estruturas nas quais o bambu poderá ter um papel muito importante no futuro”.  
(Hidalgo, 2003 p.344)

Como já mencionado anteriormente, este trabalho se destina primordialmente a estudar recomendações de projeto para o desenvolvimento de construções e objetos úteis ao homem rural. Já vimos também que o sistema estrutural é baseado nas técnicas tensegrity onde os elementos comprimidos são bastões de bambu e os elementos tensionados, fios de qualquer material resistente: algodão, cânhamo, juta, nylon e até cabos de aço, se for possível.

#### **4.14.2.**

#### **Tópicos para orientar a construção de um protótipo, em tensegrity, em Bambu**

Uma estrutura tensegrity é complexa na teoria mas simples na prática. Nós aqui vamos nos ater à prática em benefício das pessoas que desejam montá-las.

Já vimos ao longo deste trabalho a montagem dos principais sólidos conhecidos que no caso são soluções fechadas em si sem nenhuma aplicação prática mas com a importante função de se experimentar e ensinar. No entanto neste trabalho procuramos aplicar os conhecimento das estruturas tensegrity para nos aventurarmos num universo maior e mais concreto.

**1)** Na montagem de estruturas tensegrity tem que se levar em conta a precisão.

**2)** Cada haste tem que ter o seu comprimento exato e cada cabo também. Ao contrário do que muitos pensam os cabos não são passantes nas extremidades das hastes. Cada cabo começa e termina no ponto em que ele se conecta com a respectiva haste. Este cabo tem que ser então normalmente tensionado, sem nenhuma aplicação de força para não provocar deformações na estrutura.

**3)** Evitar o congestionamento de hastes de compressão, principalmente em construções maiores, onde as hastes, mal posicionadas, correm o risco de se esbarrar.

**4)** Se considerarmos a utilização de hastes de bambu como elementos comprimidos, vamos avaliar o fato de apesar de o bambu ter características estruturais excepcionais, o colmo em si tem também uma grande resiliência principalmente quando em movimento. Assim sendo esta maior capacidade de fletir, quando diante de esforços dinâmicos, comparada com tubos de aço ou alumínio, tem que ser levada em consideração na hora do projeto.

Neste item nunca é demais frisar a conclusão de Hidalgo-López (Hidalgo-López, p188) de que o bambu é um composto natural que mostra ter o máximo de resistência ao longo das fibras e o mínimo, transversalmente às mesmas.

**5)** Ensina-nos, ainda, Oscar Hidalgo-López (Hidalgo-López, 2003 p. 345) que a parte superior do colmo, com feixes menores porém mais vasculares e suas bainhas de fibra, tem um aumento de percentagem de fibras e, com isso, uma gravidade específica maior. Na maioria das espécies a parte superior é a parte mais resistente à compressão de todo o colmo e conseqüentemente a parte superior do colmo é a mais apropriada para tensegrity.

**6)** Como em qualquer projeto é necessário fabricar-se um modelo para dele tirar todas as conclusões e orientações no sentido de se poder construir com menos imprevistos, a estrutura em escala natural, usando o material definitivo. No caso do bambu achei preferível, por uma questão de escala, utilizar bastões de madeira, uma vez que, se usasse bastonetes de bambu não conseguiria as mesmas informações.

**7)** Outro aspecto importante para a fabricação e montagem de estruturas em tensegrity é o uso de gabaritos. Os gabaritos são importantes tanto para se cortar hastes e cabos no comprimento certo quanto para a montagem em si, que pode ser realizada em volta de um sólido, reproduzindo o espaço vazio entre as hastes, fabricado especialmente para sustentá-las no lugar durante a aplicação dos cabos.

**8)** Em muitos casos, especialmente naqueles em que se pretende construir uma estrutura que tenha movimento torna-se necessário (até que as pesquisas que estão em andamento acharem novas soluções) de associar bambu com componentes em ferro, aço ou alumínio principalmente em pontos de compromissos estruturais críticos. Estes são, por exemplo os casos de projetos de bicicletas, cadeiras de rodas, carroças, etc.

**9)** O mesmo dito no item anterior vale também para grandes estruturas estáticas onde acontecem grandes vãos como em pontes ou grandes alturas como em torres.

**10)** Para o caso de grandes construções é importante notar a informação de Burkhardt (2002 p.34) que existe pouca resposta à cargas relativamente altas de deflexão e pouca eficiência material quando comparadas com estruturas convencionais geometricamente rígidas.

**11)** No caso de estas fixações serem necessárias em construções feitas em regiões remotas pode-se recorrer às amarrações com fibras naturais, às vezes do próprio bambu, tão do conhecimento do homem rural.

**12)** Estes recursos também se aplicam ao homem do litoral para a armação de alguns dos seus implementos, especialmente coletores de mexilhões.

**13)** Embora a parte entrenós de um colmo ser mais resistente, é recomendável que se procure sempre uma região próxima ao nó para fazer as incisões ou mesmo fixar as peças assessórias de ancoragem dos cabos.

**14)** Segundo informações de Oscar Hidalgo-Lopéz os colmos a serem usados para construções de qualquer tipo são aqueles curados e amadurecidos com idade entre três e cinco anos.

**15)** Ainda existe falta de ferramentas teóricas e operacionais adequadas para o design tecnológico das estruturas tensegrity. Como diz Motro (na Revista International Journal Space Structures, no artigo Tensegrity Systems, State of Art. Vol 7, 1992 N°2) "a falta de técnicas de design e análise para estas estruturas, tem sido uma barreira".

#### 4.14.2.1. Propostas de sistemas de fixações de cabos

O bambu, devido às suas características naturais e estruturais, não pode ser pensado para estruturas tensegrity como tendo as mesmas propriedades de tubos de ferro, alumínio ou mesmo plástico.

Assim sendo, para se encontrar soluções de ancoragem dos cabos nas extremidades das hastes ou mesmo no meio das mesmas foram estudadas e desenvolvidas as soluções mostradas adiante. Este tema de maneira nenhuma se esgota aqui, ficando sempre aberto para soluções novas e mais eficientes.

No LILD foi desenvolvida uma solução bastante simples e, a meu ver, eficiente para ancoragem de cabos nas extremidades das hastes. Trata-se de um conjunto de dois nós fixos, feitos no cabo de tal maneira que ao se inserir o mesmo nos rasgos correspondentes, pela justeza da distância entre os nós, o cabo fica estabilizado, sem correr. Este artifício, em muitos casos, facilita a montagem ainda mais em se contando com certa dose de resiliência da haste de bambu.

No entanto, me parece que uma situação onde o cabo tem que passar pelo meio do colmo a solução com nós se torna difícil podendo, no entanto, ser substituída pelo uso de arruelas de pressão ou grampos como mostrado abaixo:

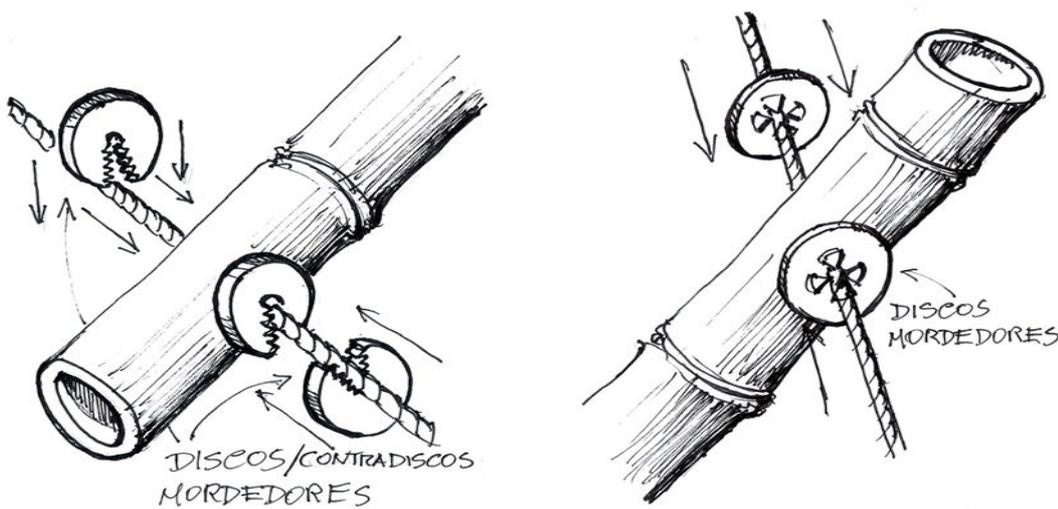


Figura 49: Discos de pressão para fixação dos cabos no meio das hastes. (desenhos do autor).

Para dar subsídios a esta procura foram desenvolvidas por mim uma série de sugestões, algumas em metal, outras não, para fazer frente principalmente a situações onde mais de dois cabos chegam à haste.

Estas soluções levam em consideração o fato de se intervir o mínimo possível na estrutura da extremidade do colmo que, como já vimos, não é muito resistente à tração.

#### 4.14.2.1.1. Modelos de fixações propostos

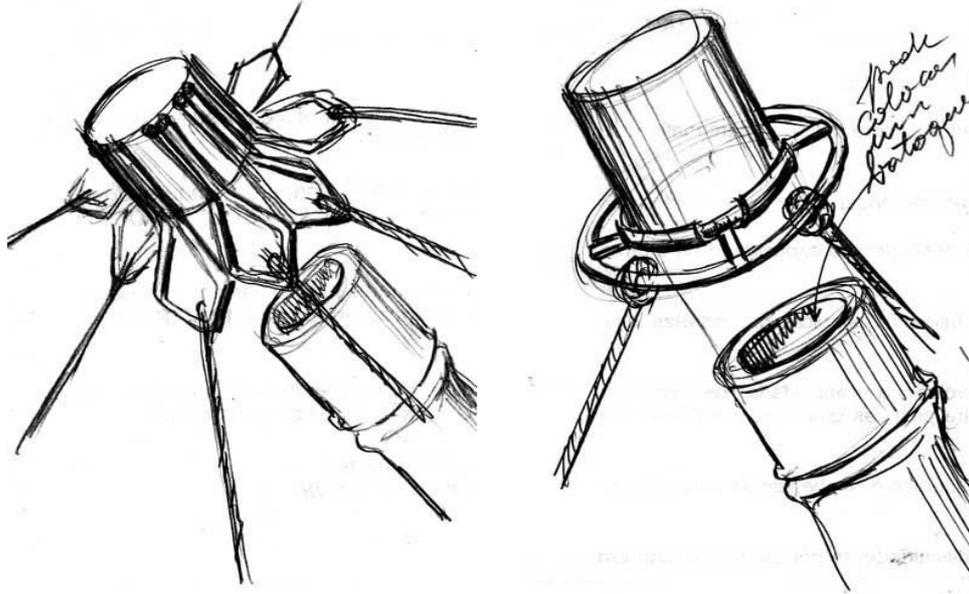


Figura 50: Fixadores 1 e 2. Cápsulas de metal ajustada no topo da haste. (desenhos do autor).

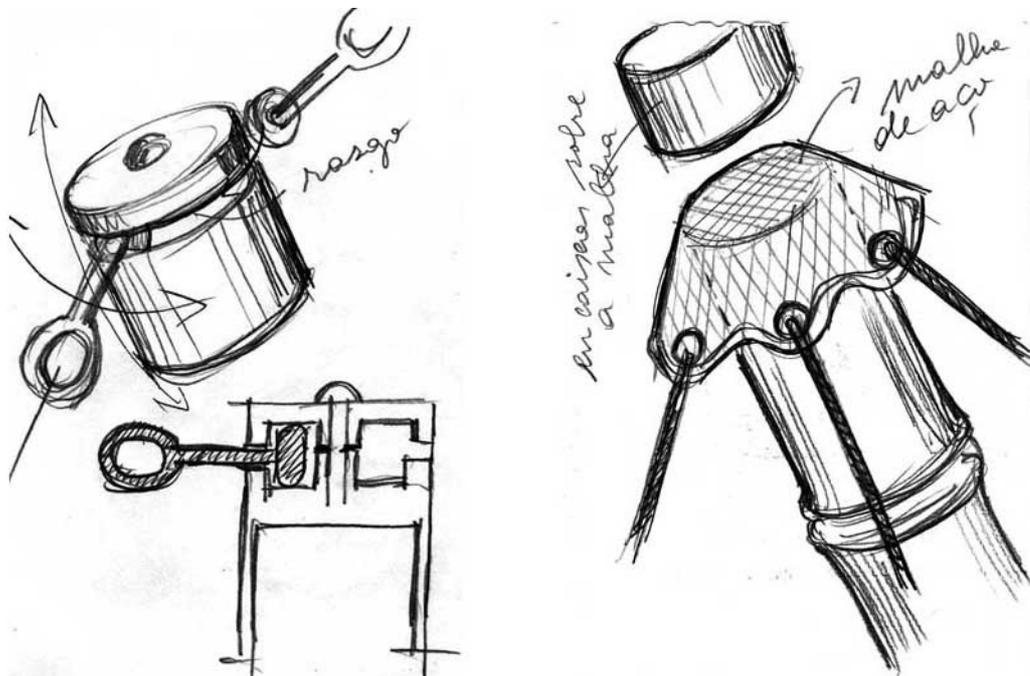


Figura 51: Fixadores 3: Cápsula com ancoragens deslizantes. Fixador 4: Ancoragem por meio malha de nylon. (desenhos do autor).

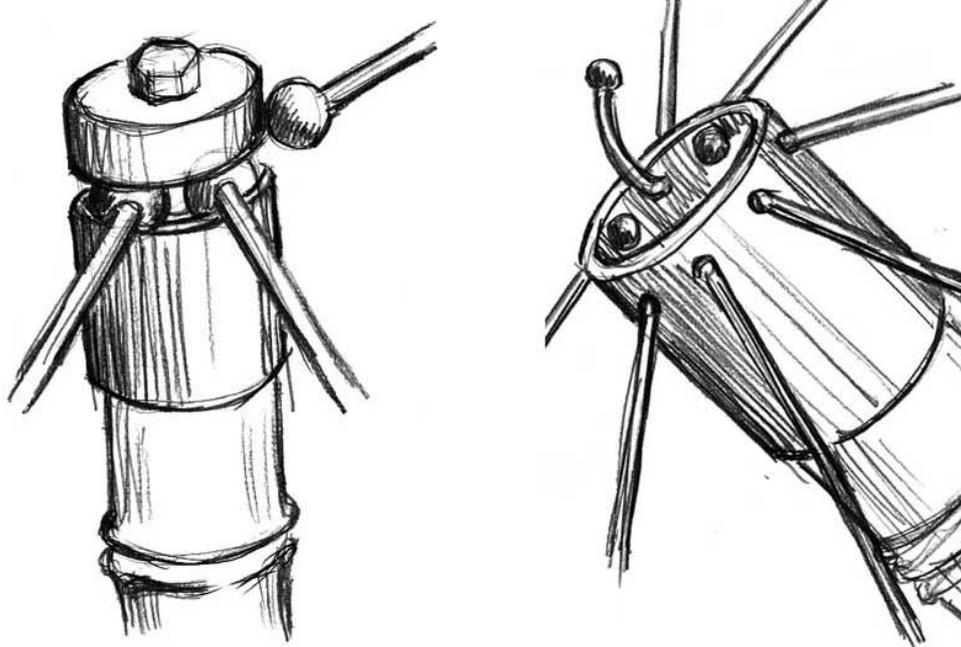


Figura 52: Fixador 5 - Com hastes conectoras deslizantes. Fixador 6 - Anel de metal preso por pressão com furação no topo, para ancoragem dos cabos (desenhos do autor).

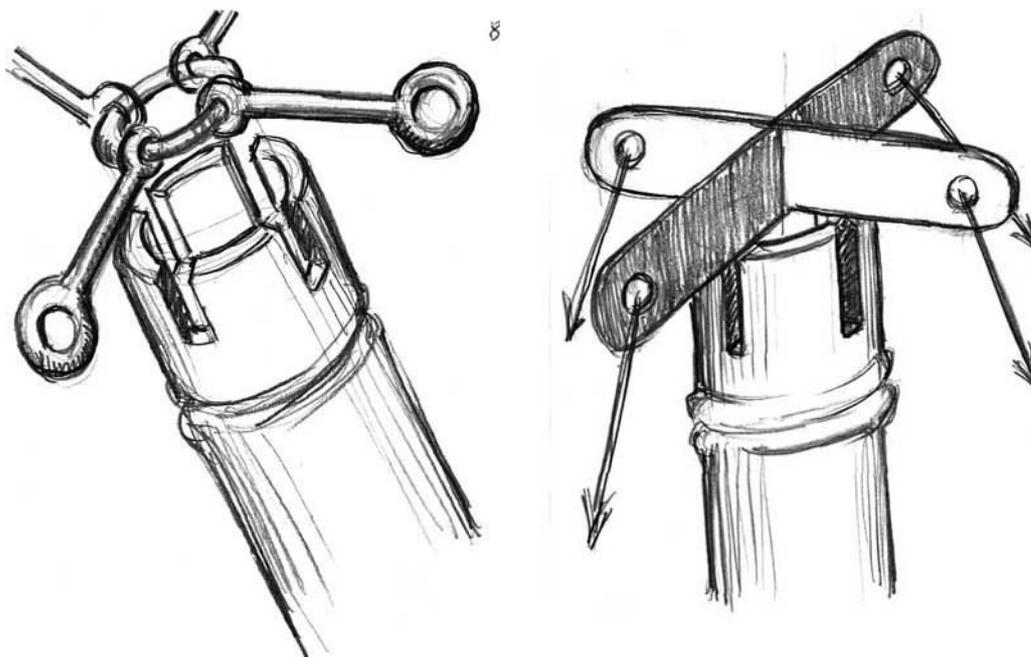


Figura 53: Fixadores 7 - Anel estrutural em metal para ancoragem das hastes que receberão os cabos. Fixador 8 - Duas lâminas de metal em forma de cruz, encaixadas nos rasgos, com furação para os cabos. (desenhos do autor).

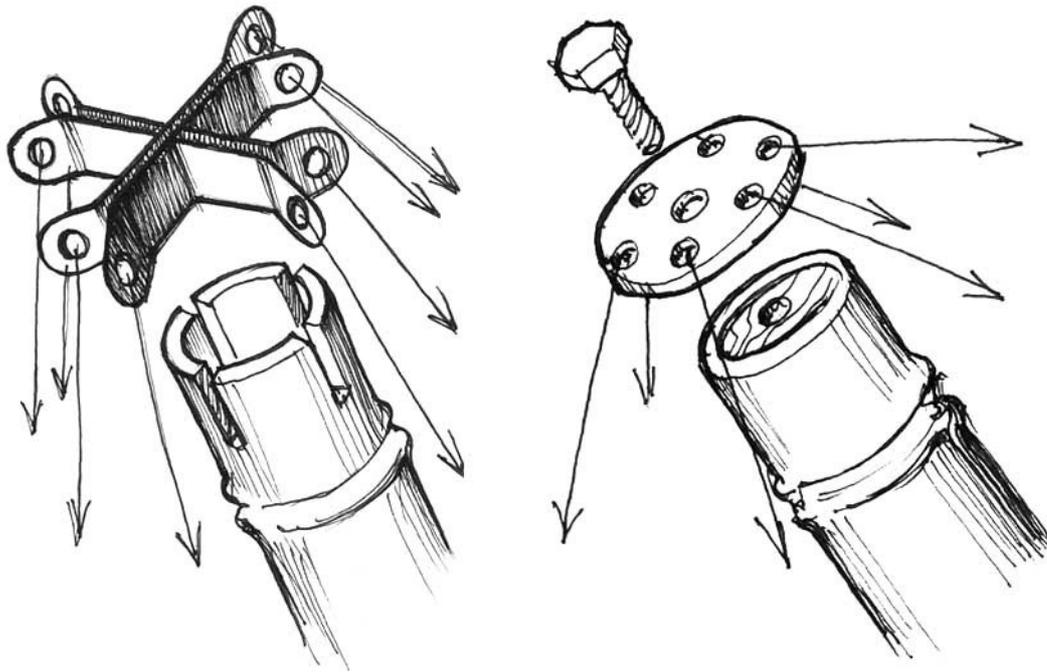


Figura 54: Fixador 9 - Idem Figura 51, com oito terminais. Fixador 10 - Disco metálico giratório com furações, aparafusado em bucha de madeira cravada no topo da haste. (desenhos do autor).

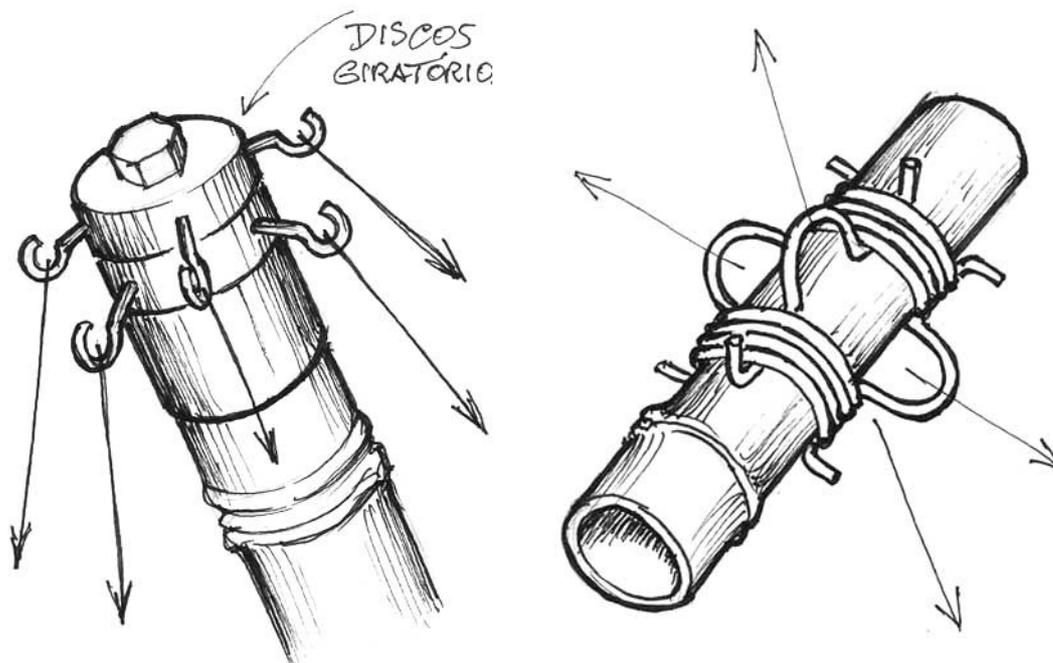


Figura 55: Fixador 11 - Discos giratórios presos em uma cápsula que entra por pressão, na extremidade da haste. Fixador 12 - Solução para fixação de cabos no meio da haste, sem necessidade de furação. (desenhos do autor)

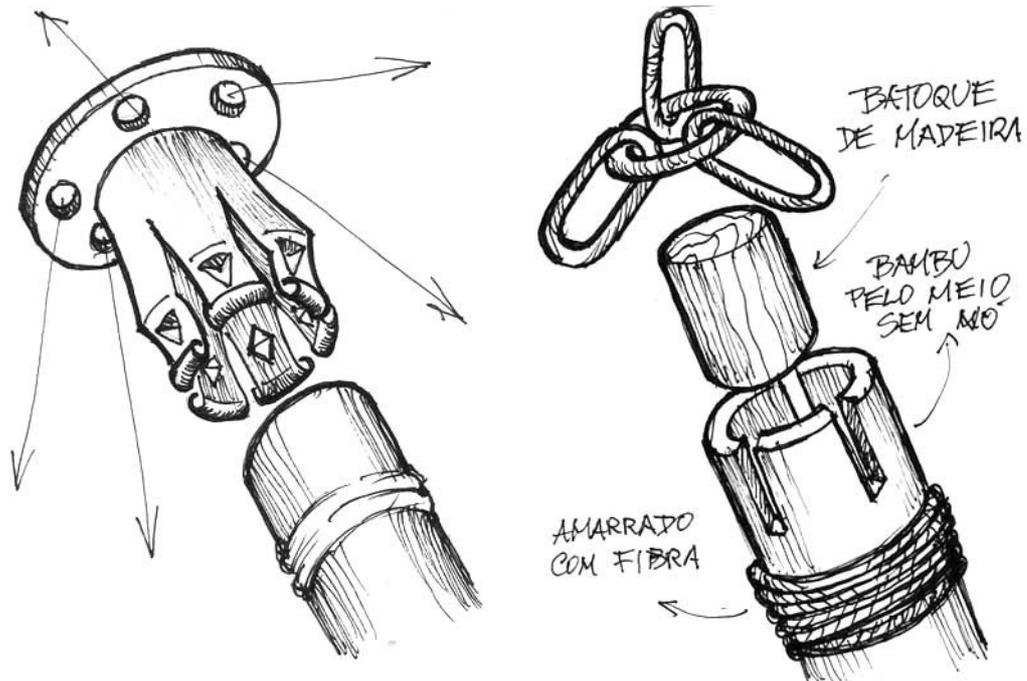


Figura 56: Fixador 13 - Cápsula de metal aplicada por pressão, tendo no topo disco giratório com furação para receber os cabos. Fixador 14 - Anel estrutural com elos para enganchar os terminais dos cabos. (desenhos do autor).