

2. Revisão Bibliográfica

Neste capítulo são descritos os princípios sob os quais esta dissertação está fundamentada. Desse modo foram estudados os conceitos fundamentais acerca de materiais compósitos fibrosos, laminados e particulados de matriz polimérica reforçados com fibras naturais. Foram ainda estudados materiais naturais, em especial o bambu, matéria prima principal dos elementos a serem desenvolvidos neste trabalho.

2.1. Materiais Compósitos

Materiais compósitos são aqueles formados pela associação de dois ou mais materiais distintos com o objetivo principal de se obter características predeterminadas, não encontradas nos seus constituintes isoladamente (Gibson, 1994).

Segundo Jones (1975), existem três tipos mais comumente usados de materiais compósitos:

1. Os fibrosos, que são constituídos de fibras incorporadas a uma matriz;
2. Os laminados, formados por várias lâminas coladas com dois ou mais materiais;
3. Os particulados, que são os compostos por partículas associadas a uma matriz.

Os compósitos podem surgir de combinações entre metais, cerâmicas e polímeros. As possíveis combinações são condicionadas às condições de processamento e às prováveis incompatibilidades entre os componentes. Compósitos para aplicações estruturais geralmente utilizam fibras, sintéticas ou naturais, como agentes de reforço. As fibras podem ser contínuas ou descontínuas, alinhadas ou com distribuição aleatória, podendo ser obtidas em uma variedade de formas, como mantas e preformas têxteis de diferentes arquiteturas. Como componente matricial, os polímeros são os materiais mais utilizados devido à sua leveza e fácil moldagem. Em relação ao peso, os

materiais compósitos poliméricos apresentam propriedades mecânicas específicas que podem exceder consideravelmente às dos metais (Silva, 2003).

2.1.1.

Materiais Naturais

Materiais naturais são notadamente eficientes. Por eficientes refere-se ao fato de eles atenderem de maneira bem sucedida às complexas imposições da natureza aos seres vivos, e por fazê-lo com o mínimo material possível. A maioria dos materiais naturais é sustentável, reciclável e, quando o despojo é necessário, biodegradável, fazendo deles um modelo de consciência ambiental para a engenharia (Wegst, et al., 2004).

De fato todos os materiais naturais são compósitos, constituídos de um número relativamente pequeno de componentes poliméricos, cerâmicos ou blocos de construção (que invariavelmente são também compósitos).

Paredes celulares de plantas, por exemplo, são compósitos de celulose, hemi-celulose, pectina e proteína, podendo ser lignificadas; tecidos animais consistem majoritariamente de colágeno, elastina, queratina, quitina e minerais como sais de cálcio e sílica. A partir destes poucos “ingredientes” a natureza produz uma vasta gama de compósitos estruturados. Do ponto de vista mecânico, estes componentes nada apresentam de extraordinário, sendo na verdade sua estrutura e arranjo os responsáveis pelo seu desempenho. O Bambu consiste de um compósito de fibras de celulose inseridas numa matriz de lignina-hemi-celulose formada por células prismáticas ocas com espessura de parede variável (Wegst, et al., 2004).

2.1.2.

Bambu: morfologia, propriedades, usos

O Bambu é um material natural potencialmente vantajoso para o uso na construção civil, dadas as suas propriedades físicas e mecânicas, além de atender às premissas atuais de sustentabilidade, cada vez mais requeridas pela sociedade como um todo. Por falta de normatização específica ainda não tem seu uso disseminado, embora seja utilizado milenarmente por sociedades estabelecidas, como a chinesa e a indiana, inclusive em estruturas resistentes a sismos.

Para a parametrização e o efetivo estabelecimento das normas fazem-se necessários ainda uma série de estudos para desenvolver modelos matemáticos

confiáveis para o cálculo de estruturas de bambu, bem como pesquisas sobre as suas patologias (e tratamentos), sua durabilidade e confiabilidade.

O bambu é uma gramínea cuja estrutura pode ser classificada como inteligente. Isto porque tanto sua macroestrutura (diâmetro, espessura, espaçamento entre nós) quanto sua microestrutura (variação da fração volumétrica de fibras de celulose na espessura) desenvolveram-se de forma a otimizar o volume de material frente aos esforços aos quais este está sujeito na natureza (peso próprio e flexão devido á força do vento), resultando em um material leve e de excepcionais características mecânicas. A esta otimização natural chama-se Funcionalidade Graduada (Nogata, et al., 1995).

2.1.2.1. Funcionalidade Graduada

A funcionalidade graduada é uma propriedade inerente aos tecidos duros produzidos pela natureza. Está estabelecido que tecidos duros como ossos, conchas e determinados vegetais (como o bambu), desenvolvem sua estrutura de acordo com as imposições do ambiente natural e construído, moldando sua resistência e geometria de modo a obter a relação ótima para o funcionamento global do sistema do qual fazem parte. Sendo assim diz-se que a estrutura do bambu é constituída de forma auto-otimizada, de modo a resistir eficientemente aos esforços impostos em cada direção, sendo graduada através da sensibilidade eletro-mecânica de suas células (de maneira similar ao efeito piezo-elétrico nos ossos) a solicitações externas (Nogata, et al., 1995). A graduação funcional se processa, no bambu, através da sensibilidade eletro-mecânica de suas células a solicitações externas, denominada efeito piezo-elétrico (“eletricidade de pressão”) (Thouless, 1996).

A graduação funcional do bambu pode ser percebida através de uma análise macro / mesoestrutural de uma seção de colmo. Nota-se a maior concentração de fibras no anel externo e sua gradual diminuição conforme a aproximação do anel interno.

2.1.2.2. Caracterização Multidimensional

Macroestrutura: formato cilíndrico / cônico em geral oco, no qual se percebe a funcionalidade graduada pela variação da espessura do colmo e das paredes conforme aumenta sua altura (Figura 1a);

Mesoestrutura: Perceptível variação da densidade de fibras na espessura do colmo, aumentando da parede interna para a externa (Figura 1b);

Microestrutura: percebe-se que as fibras são muito menores e mais densamente distribuídas na parte externa que na parte interna. As fibras externas são mais circulares ao passo que as mais internas tendem à forma elíptica (Figura 1b);

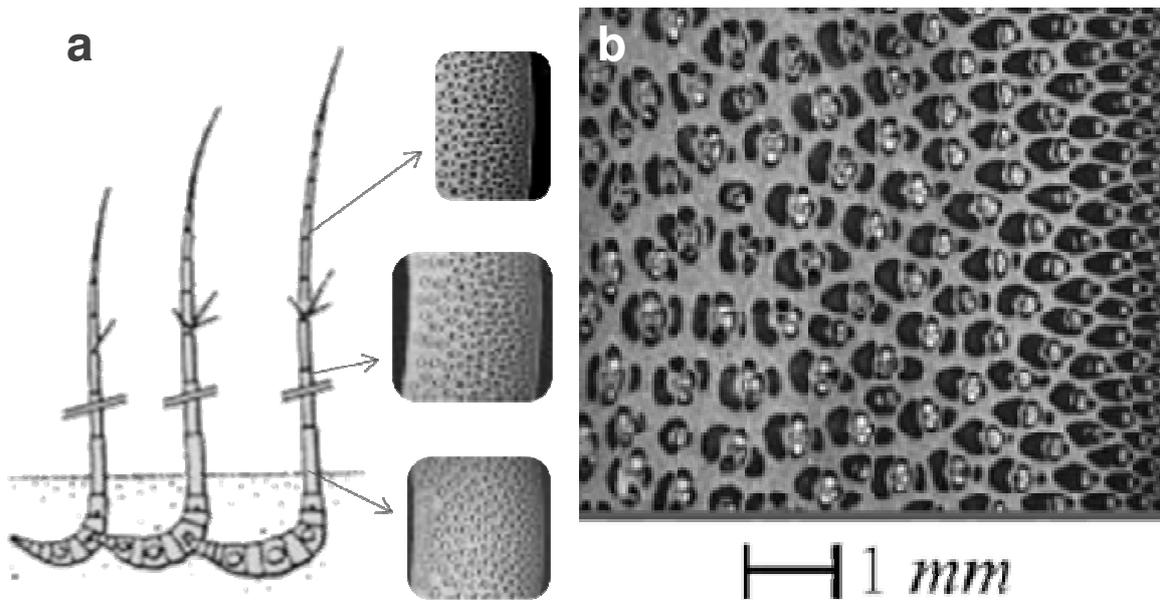


Figura 1: a) Macro e mesoestrutura do bambu. b) Microestrutura de uma seção de parede do colmo de bambu (Ghavami, et al., 2003).

Nanoestrutura: cada fibra (esclerênquima)(Figura 2a) é composta por diversas fibrilas (Figura 2b), as quais são compostas por celulose trefilada à maneira de uma corda (Ray, et al., 2005)(Figura 2c e Figura 2d).

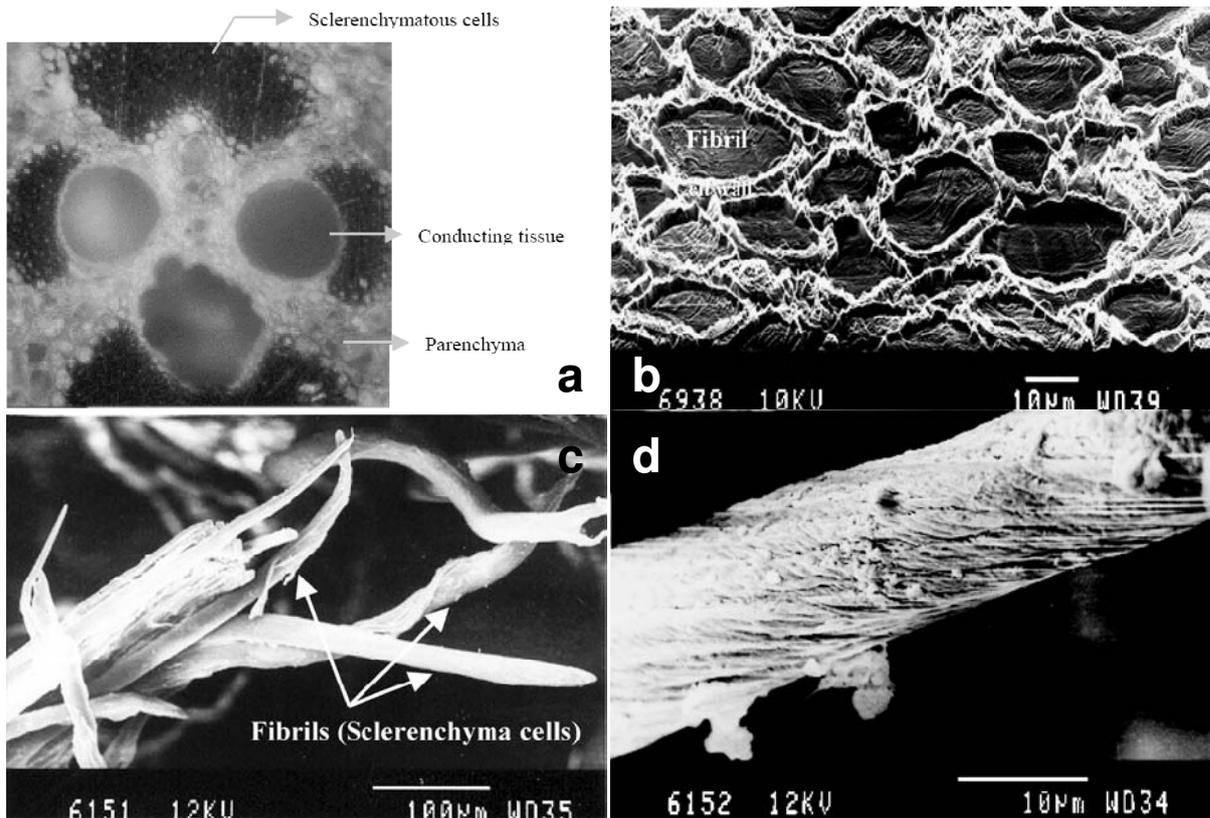


Figura 2: a) Tecidos vasculares da espécie *Dendrocalamus giganteus* em imagem obtida via microscopia eletrônica de varredura na PUC-Rio (Ghavami, et al., 2003). b) Imagem do tecido esclerenquimatoso e da espessura das paredes entre as fibrilas, obtida por micrografia topográfica. c) Fibra de bambu fraturada exibindo as fibrilas componentes do esclerênquima. d) Microestrutura de uma fibrila. (Ray, et al., 2005).

2.1.3.

Compósitos de matriz polimérica reforçados com fibras (PRF)

Os perfis em plástico reforçado com fibra - PRF - surgiram no mercado nacional nos anos 80. Apresentam reduzido peso-próprio, elevada resistência aos ataques químicos de insetos, baixo custo de manutenção entre outras vantagens. Apesar disso, a aplicação de perfis em PRF tem sido insignificante face à potencialidade desse produto. O material possui menor dilatação que o aço, por exemplo, e mantém características estruturais semelhantes a ele (Guimarães, 2007).

2.1.3.1. Fibras Vegetais Longas

Os compósitos poliméricos reforçados por fibras contínuas constituem os de melhor desempenho mecânico. Diferentes dos compósitos reforçados por fibras descontínuas, que apresentam um comportamento isotrópico em uma escala macroscópica, apresentam propriedades mecânicas ortotrópicas que conduzem a mecanismos de falha específicos. Apresentam alta resistência e rigidez na direção das fibras, porém, um baixo desempenho na direção transversal às mesmas, e neste caso a resistência e a rigidez são, em geral, controladas pelas propriedades da matriz (Silva, 2003).

As fibras vegetais apresentam baixo custo com boas características mecânicas e disponibilidade no mercado, sendo ainda fundamentais para o desenvolvimento de determinadas regiões do Brasil (maior produtor mundial de sisal). Os estados da Bahia e da Paraíba são o primeiro e segundo maiores produtores nacionais, respectivamente.

A fibra de sisal é industrializada e fornecida ao mercado na forma de cordas, tecidos, mantas, barbantes, tapetes, sacos, bolsas, chapéus, vassouras e artesanato o que propicia seu uso em diversos setores. Cerca de 50% de toda produção nacional de fibras e manufaturados são exportados para países como Estados Unidos, México e Portugal.

Para reforço de elementos estruturais, a partir das propriedades físicas e mecânicas as fibras de sisal parecem ser as mais apropriadas (Tabela 1). Deve-se enfatizar que as fibras vegetais assim como as madeiras apresentam uma grande variabilidade de suas características físicas e mecânicas.

Tabela 1: Propriedades físicas e mecânicas de fibras vegetais (Savastano Júnior, et al., 1994).

Propriedades	Coco	Sisal	Malva	Amianto	Polipropileno
Massa específica real (kg/m ³)	1177	1370	1409	2200 a 2600	913
Vol. de vazios permeáveis (%)	56,6	60,9	74,2	-	-
Absorção máxima (%)	93,8	110,0	182,2	-	-
Alongamento na ruptura (%)	23,9 a 51,4	4,9 a 5,4	5,2	2	22,3 a 26,0
Resistência à tração (MPa)	95 a 118	347 a 378	160	560 a 750	250
Módulo de elasticidade (GPa)	2,8	15,2	17,4	164	2,0

2.1.3.2. Fibras Curtas

Embora possuam propriedades mecânicas inferiores quando comparados aos compósitos com fibras contínuas, os compósitos com fibras descontínuas oferecem maior facilidade de processamento a um menor custo. Os extremos das fibras são geralmente pontos concentradores de tensões, que induzem tensões cisalhantes na interface. Assim como o comprimento das fibras, a sua orientação é de igual importância e depende essencialmente do processo de fabricação. As propriedades mecânicas variam consideravelmente de acordo com a mudança na distribuição de orientação das fibras (Silva, 2003).

Partículas podem também ser consideradas como fibras curtas proporcionando a confecção de compósitos dotados em geral de boa resistência à compressão, a exemplo do concreto.

2.1.4. Compósitos Laminados

Painéis de compósitos laminados reforçados com fibras trançadas são de crescente interesse em aplicações na indústria aeroespacial e automobilística, devido ao seu alto desempenho resistência/peso quando comparados com placas metálicas. Além disso, também oferecem muitas vantagens que incluem estabilidade dimensional e boa conformação para formas complexas. A maioria dos compósitos laminados utiliza matriz termofixa e reforços tecidos ou trançados com fibras sintéticas, sendo que a orientação das fibras trançadas determina as propriedades finais do compósito estrutural. O reforço trançado se apresenta em forma de lâminas, sendo chamadas de lâminas ou camadas de reforço, que colocadas juntamente com a matriz polimérica em uma determinada seqüência, originam painéis laminados. Algumas fibras vegetais já estão sendo utilizadas em substituição às fibras sintéticas para reforçar compósitos termoplásticos, em aplicações no mobiliário, embalagens, construção civil e indústria automobilística. Matérias-primas vegetais como a madeira, têm sido usadas na construção civil e como materiais para engenharia desde muito tempo, oferecendo vantagens de ser renovável e reciclável (Santos, et al., 2006).

2.1.4.1.

Bambu Laminado Colado / Contraplacado

As amostras de bambu laminado, quando comparadas às espécies de madeira de mesma faixa de densidade, apresentaram valores bem superiores de resistência à flexão e à tração paralela as fibras. Valores próximos ou pouco superiores foram observados para as propriedades de resistência à compressão paralela, cisalhamento e dureza (Garbino, et al., 2002).

O BLC pode ser considerado um material leve com massa específica aparente situada na faixa de 0,50 g/cm³ a 0,75 g/cm³. Observou-se tendência de que o BLC de resorcinol-formaldeído (adesivo naval) tenha se mostrado mais estável dimensionalmente do que o BLC de uréia-formaldeído. A impermeabilização da superfície do BLC deve ser buscada visando sua proteção contra as intempéries. A análise estatística indicou a influência das variáveis testadas (espécies de bambu, tipos de tratamentos e de adesivos) e de suas interações nas propriedades do BLC. Não foi possível evidenciar a melhor combinação entre as variáveis (espécie de bambu, tratamento químico e tipo de adesivo) e que atendessem a todas as propriedades avaliadas do BLC (Beraldo, et al., 2003).

O estudo comparativo entre os diferentes tipos de adesivos demonstrou que o adesivo poliuretano à base de óleo de mamona se mostrou bastante eficiente podendo, em determinadas situações, mostrar-se competitivo com os adesivos comerciais. No entanto, visando uma utilização estrutural, a aplicação do adesivo não deverá ser feita com o auxílio de um pincel. Deve-se efetuar a mistura dos dois componentes em um saco plástico, sem a presença de ar e, com o auxílio de uma bisnaga, deve-se efetuar a aplicação do mesmo sobre as régua de bambu, evitando-se, assim, a formação de bolhas de ar, que provocarão enfraquecimento da linha de cola do BLC (Lapo, et al., 2008).

2.2.

Estruturas Reticuladas Espaciais

As estruturas espaciais de cobertura apresentam aspectos diferenciados de projeto. Existem diversos arranjos geométricos possíveis para estas estruturas, cuja escolha está associada, entre outros fatores, às formas e dimensões do contorno, aos pontos de apoio e aos sistemas de conexões empregados. As estruturas reticuladas tridimensionais, mais conhecidas simplesmente por estruturas espaciais ou treliças espaciais, são amplamente

utilizadas em coberturas de edificações que necessitem grandes áreas livres, tais como ginásios, hangares, centros de exposição e edifícios industriais. Alguns dos fatores que favorecem o uso deste tipo de estrutura em relação às planas convencionais são:

- grande rigidez, sendo possível a realização de obras de grandes vãos;
- facilidade de fixação de instalações, devido à grande quantidade de nós nos quais podem ser fixados suportes;
- liberdade arquitetônica na locação de apoios;
- beleza arquitetônica, permitindo explorar as mais diversas formas;
- possibilidade de ampliação, e fácil montagem e desmontagem para estruturas não permanentes;
- menor peso e menor custo para grandes vãos.

A configuração geométrica de uma estrutura espacial é definida, em princípio, em função da arquitetura da edificação. Por meio da arquitetura tem-se os requisitos básicos necessários para o início da determinação das características geométricas da estrutura, entre eles, a disposição dos apoios e os contornos. A disposição dos apoios define os vãos livres e os balanços. Os contornos são compostos por superfícies planas e curvas que delimitam a estrutura, determinando sua extensão e forma externa. Com a determinação dos pontos de apoio e do gabarito externo da estrutura, e analisando-se as ações, as limitações de deslocamentos máximos e as condições e tecnologias de fabricação, montagem e içamento, podem ser definidos outros aspectos específicos das estruturas espaciais, tais como as dimensões e orientações dos módulos, quantidades de camadas e altura (Souza, et al., 2005).

2.2.1.

Histórico

O termo “estrutura espacial” é empregado de maneira geral para designar um sistema estrutural em que não há subsistemas planos definidos. Esta ausência possibilita que as barras componentes da estrutura sofram somente esforço axial, facilitando as considerações de cálculo. Os componentes deste tipo de sistema são em geral pequenos e de dimensões repetitivas, possibilitando facilidade no transporte e na montagem, a pré-fabricação e o uso temporário. As treliças espaciais planas, os arcos treliçados espaciais, as

cúpulas treliçadas espaciais e as cúpulas geodésicas são os principais tipos de estruturas espaciais reticuladas (Souza, et al., 2005).

Em 1907, Alexander Graham Bell desenvolveu um reticulado espacial constituído por barras de mesma dimensão conectadas por um único tipo de nó, formando elementos modulares tetraédricos (Figura 3). Mostrava-se, assim, a alta capacidade de padronização e a conseqüente facilidade de industrialização deste tipo de estrutura (Souza, et al., 2005).

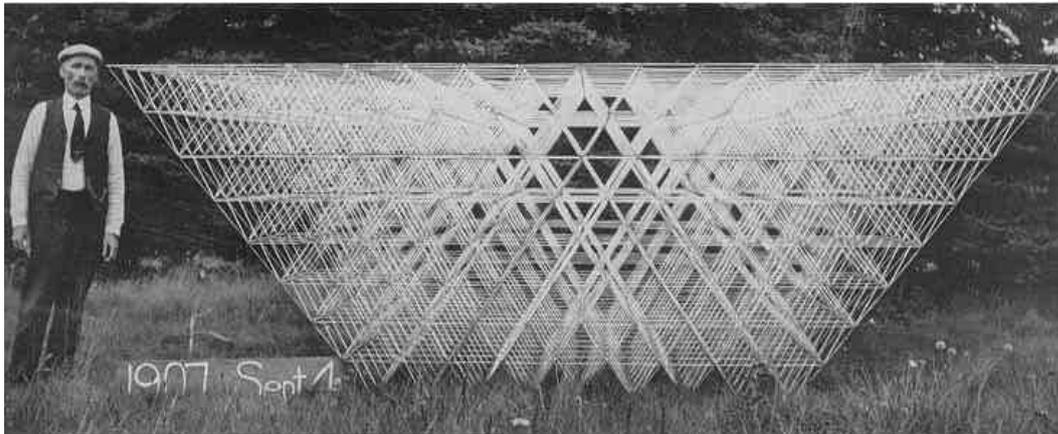


Figura 3: Estrutura reticulada espacial proposta por Alexander Graham Bell (Souza, et al., 2005).

As barras podem ser diversos tipos de perfis, tais como perfis de seção transversal circular e retangular, “I” soldados e laminados, cantoneiras, tubulares, entre outros. A escolha do perfil está ligada ao nível de solicitação da barra, ao sistema de conexão, à concepção arquitetônica, à finalidade da estrutura ou a alguma função que o perfil deverá exercer, por exemplo, suporte para fixação de telhas. Quanto ao material, os mais utilizados são o aço e o alumínio, sendo que o uso do alumínio vem caindo acentuadamente nos últimos anos devido ao elevado custo. O grande avanço na difusão dos reticulados espaciais foi o surgimento da MERO, na Alemanha em 1943, que desenvolveu um sistema pré-fabricado de estrutura espacial que consiste na combinação de dois elementos básicos: nós esféricos e barras de seção tubular circular (Souza, et al., 2005).

A partir da década de 70, com o advento dos computadores, houve uma grande revolução no desenvolvimento das estruturas espaciais. Com o aparecimento de novas técnicas computacionais foi possível buscar concepções geométricas de melhor desempenho estrutural e que mais atendiam aos anseios arquitetônicos. Outros fatores que provocaram um grande desenvolvimento na

utilização destas estruturas foram o desenvolvimento de sistemas padronizados eficientes de conexão e as pesquisas científicas sobre o comportamento elástico e não-elástico das estruturas espaciais e sobre os modos de falha das mesmas quando sujeitas a carregamento excessivo (Souza, et al., 2005).

2.2.2.

Estruturas Reticuladas Espaciais de Bambu

É sabido que os perfis que melhor resistem a esforços axiais, sejam estes de tração ou compressão, são os cilíndricos. Em se tratando de estruturas aplicadas à engenharia civil a geometria das cascas cilíndricas (ou perfis tubulares) mostra-se mais eficiente, posto que sua geometria oca proporciona economia de material associada à resistência à flambagem. Assim sendo o bambu apresenta-se naturalmente como um material otimizado para a construção de treliças espaciais.

- Apesar de o bambu apresentar propriedades mecânicas excelentes, sua resistência a cisalhamento é relativamente baixa na direção das fibras;
- Em se tratando de um material natural as barras apresentam uma imperfeição inicial considerável;
- Com o tempo, os colmos tendem a trincar longitudinalmente, seja pelos esforços a que são submetidos, seja pela degradação da lignina (Figura 4);



Figura 4: Trincas longitudinais em um colmo de bambu da espécie *Dendrocalamus giganteus*.

- As trincas diminuem a resistência das barras além de permitirem a entrada de água, e portanto a proliferação de fungos e insetos xilófagos;

- As patologias relacionadas a degradação do material e falhas estruturais são em sua grande maioria derivadas de falhas de detalhamento e projeto.

2.2.2.1.

Treliça de *Dendrocalamus giganteus* com nós de aço

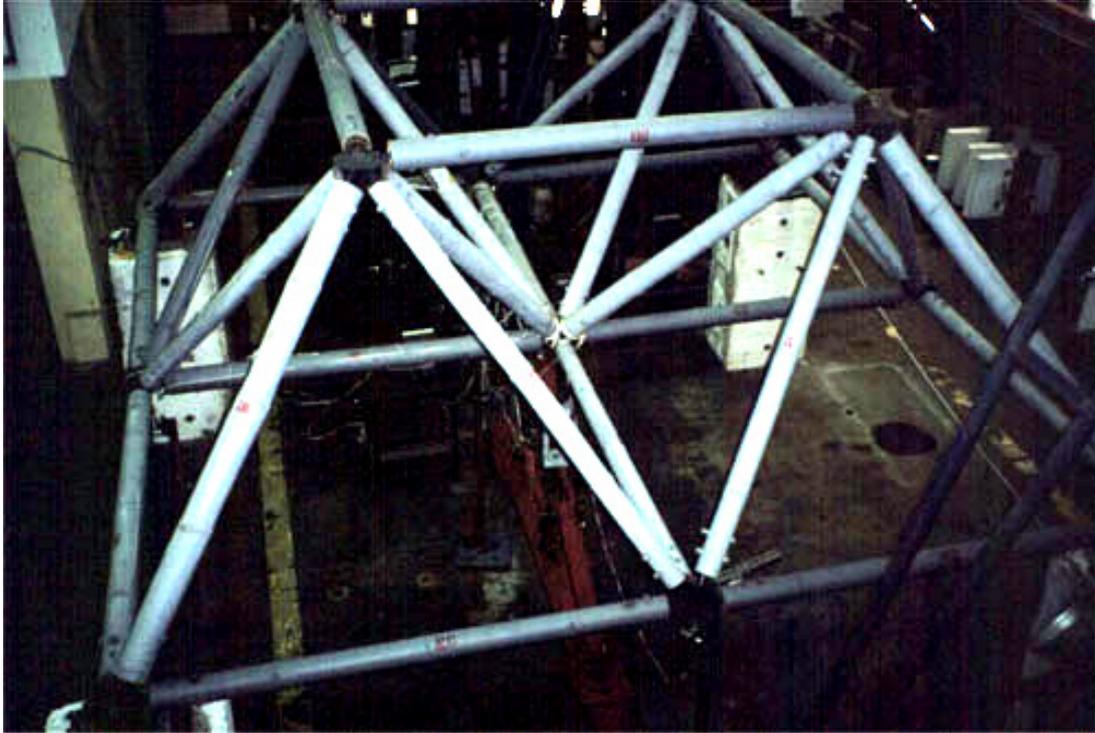


Figura 5: Treliça espacial de bambu com nós de aço (Moreira, 1991).

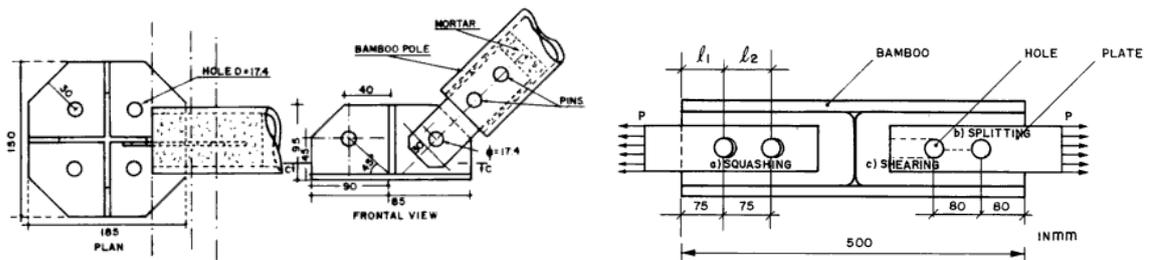


Figura 6: a) Detalhes de execução em vista de topo e lateral. b) Modo de falha típico da conexão elaborada (Moreira, 1991).

No intuito de contornar o problema de cisalhamento (quando os furos encontram-se muito próximos da borda da barra) e o problema de alargamento dos furos por amassamento do bambu (quando estes se situam mais distantes do bordo), devido à rigidez do aço ser consideravelmente superior à do bambu

(Figura 6b) foi desenvolvida na PUC-Rio uma ponteira cônica pelo então pós-graduando Luis Eustáquio Moreira.

A ponteira concebida apresentou resistência satisfatória aos ensaios de arrancamento (tração/ pull-out).

Entretanto, dada a sua concepção, não aparenta ter resistência considerável à compressão (push-in), uma vez que não há travamento axial contra este esforço.

Em trabalho posterior, Moreira (1998) desenvolveu um novo modelo de ponteira, denominado sistema de reforço Figura 7. Tal sistema trabalha com um cilindro de madeira aderido à superfície interna dos colmos de bambu, que por sua vez recebem cortes longitudinais na região de encaixe de modo a tornar-se mais facilmente adaptado à bucha. Este sistema mostra-se bastante eficiente e versátil, podendo ser utilizado de diferentes formas e para diferentes tipos de estrutura.



Figura 7: Sistema de reforço (Moreira, 1998).

Entretanto, toda a sua segurança depende da faixa de adesão, não havendo nenhum sistema mecânico que funcione como garantia. Ainda, a adesão é feita na região menos resistente do colmo do bambu (superfície interna com menor concentração de fibras e maior lignificação, conforme anteriormente mencionado), podendo romper por cisalhamento, principalmente à tração.

2.2.2.2.

Treliça de *Phyllostachys pubescens* com nós de PVC

O detalhamento da treliça apresentada por Albermani, Goh e Chan (Figura 8) utiliza PVC nas ligações e ponteiras (Albermani, et al., 2007), material este que apresenta um peso específico bastante mais próximo ao do bambu que o aço.

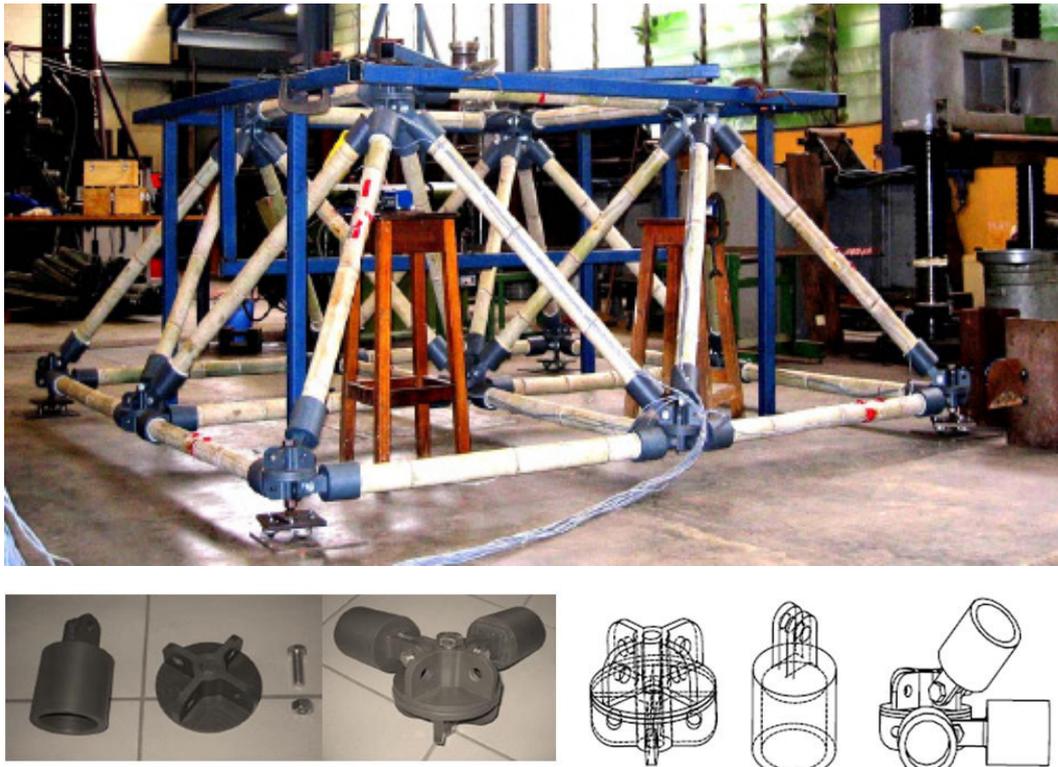


Figura 8: Treliça espacial de *Phyllostachys pubescens* com ligações de PVC (Albermani, et al., 2007).

Entretanto, a fixação das ponteiros nas barras é dada exclusivamente por adesivo, como a ligação de L. E. Moreira, embora se dê na região mais resistente do colmo. Ocorre que, uma vez que o bambu apresenta imperfeições iniciais (forma e diâmetro), potencializa-se a existência de vazios entre as ponteiros e as barras de bambu, provocando espessura variável do adesivo e, por conseguinte, resposta diferenciada na aderência.