4. Detalhamento, Elaboração e Ensaio de Componentes

Foram desenvolvidos componentes objetivando a produção industrial de elementos estruturais de bambu, a serem utilizados fundamentalmente em treliças espaciais de múltipla camada ortogonal, embora alguns possam igualmente encontrar uso em treliças planas, cúpulas geodésicas, estruturas de tensão integral (tensegrity), etc. sejam elas de caráter temporário ou permanente.

O processo produtivo foi concebido de modo a favorecer a produção em série, utilizando materiais disponíveis no mercado em suas melhores relações custo x benefício e passíveis de barateamento se adquiridos em atacado, visando obter objetos que possam ser armazenados e comercializados em lojas de materiais de construção convencionais e ou colocados à disposição do mercado por uma empresa especializada no gênero.

4.1. Ponteira

4.1.1. Descrição e detalhamento

Conforme discutido na revisão bibliográfica e em diversos trabalhos anteriores ao presente, uma das maiores dificuldades para a adoção do bambu como material de uso estrutural corrente é a elaboração de conexões que não o solicitem a cisalhamento, esforço ao qual é notoriamente pouco resistente. Esta limitação atinge diretamente os modos mais simples de conexão: pinadas e parafusadas.

Com base nos modelos elaborados por Moreira em sua Dissertação de Mestrado (Moreira, 1991) e em sua Tese de Doutorado (Moreira, 1998), foi desenvolvido um novo sistema de conexão, utilizando o mesmo princípio de secção longitudinal múltipla no bordo do colmo, o que permite ajuste diametral na ponta das barras. O novo sistema é composto por bucha e capa de ponteira, parafuso e porca de aperto, pinça, posicionador, castanha cilíndrica e parafuso



de fixação (Figura 63), podendo ser utilizado integralmente ou não, dependendo da aplicação desejada para o elemento estrutural do qual fará parte.

Figura 63: Ponteira montada e em vista explodida com especificação das peças que a compõem.

A bucha de ponteira foi moldada na forma de um tronco de cone, já com o parafuso de aperto posicionado na fôrma, utilizando material compósito elaborado a partir de resíduo particulado de bambu *Dendrocalamus giganteus* proveniente da laminação incorporado à matriz de resina de poliéster, cujos métodos de moldagem e resultados dos ensaios à compressão estão expostos na seção quatro do capítulo anterior.

A capa de ponteira, diferença essencial deste protótipo para os elaborados em trabalhos anteriores, é responsável pela transmissão dos esforços de compressão axial para a barra de bambu, além de conter a abertura do feixe formado pelos cortes longitudinais na ponta do colmo. Desempenhando conjuntamente estas funções, o conjunto bucha/ parafuso/ capa de ponteira/ porca de aperto (Figura 64) proporciona maior praticidade de instalação e regulagem de aperto.



Figura 64: Secção longitudinal do sistema de aperto da ponteira.

O parafuso de aperto recebe perfuração e abertura de rosca interna de 3/8" em seu eixo para permitir a montagem da pinça (para uso concomitante com o nó de bambu laminado contraplacado), mediante castanha e parafuso de fixação. No intuito de melhor distribuir e evitar pontos de concentração de tensões, a base da pinça não é dobrada, mas curvada. Por este motivo não é fixada diretamente por meio de um parafuso, utilizando uma castanha cilíndrica que permite melhor aperto. Esta configuração permitiu que, mediante a execução de um furo oblongo na base da pinça, o sistema conte com regulagem de inclinação no ponto de engate (Figura 65a), o que permite a correção de pequenas irregularidades geométricas iniciais das barras, bem como a flexibilização formal da concepção estrutural. Com o uso deste sistema tem-se dois graus de liberdade para ajuste: rotação em torno do eixo longitudinal e rotação em torno de um eixo transversal das barras.



Figura 65: a) esquema de angulação das barras. b) Sistema de pinça ideal com três graus de liberdade para ajuste. c) Intertravamento das pinças no encaixe das conexões no nó.

Para permitir total flexibilização, possibilitando a construção de treliças espaciais curvas de múltipla camada por exemplo, seria necessário permitir ajuste de mais uma rotação (Figura 65b). Sob a base da pinça e ao redor do parafuso de aperto encaixa-se uma peça confeccionada com o mesmo material da bucha, que auxilia no posicionamento, estabelecendo os limites de inclinação da pinça. No caso do uso para treliças espaciais (simples ou arqueadas) a ponta da pinça recebe cortes a 45º e 135º e chanfros a 45º, que proporcionam intertravamento quando fixados aos nós (Figura 65c).

4.1.2. Arrancamento (pull-out)

No intuito de avaliar a eficácia do sistema de fixação da ponteira foi realizada uma série de ensaios de arrancamento (pull-out) de ponteiras (Figura 66), na qual foram utilizadas garras com capacidade para100kN, bomba e macaco hidráulico com capacidade para 150kN da marca Enerpac para a aplicação da carga. O deslocamento longitudinal foi obtido através de um LVDT (linear variable differential transformer) GEFRAN com curso de 100mm posicionado contra a garra ligada ao macaco e a carga através de uma célula Kyowa de 100kN. Todos os aparelhos foram conectados a um hardware de aquisição de dados National Instruments e obtidos via programa LabView 8.5. O controle da aplicação de carga foi feito de forma manual, procurando manter um deslocamento constante de 1mm/min com o auxílio de um gráfico de referência.



Figura 66: Início e fim do ensaio de arrancamento da ponteira.

A partir dos resultados obtidos foram plotadas curvas carga x deslocamento global (Figura 67), cujos resultados relativos à força e deslocamento máximos estão expostos na Tabela 22.



Figura 67: Gráfico Carga x Deslocamento obtido nos ensaios de arrancamento das ponteiras.

СР	CP AP1		AP3
Fmáx. (kN) 20,29		7,44	9,18
δ em Fmáx. (mm)	40,52	17,41	15,21
δmáx. (mm)	57,88	35	36,97

Tabela 22: Forças e deslocamentos globais máximos obtidos no ensaio de arrancamento das ponteiras.

Os valores máximos obtidos apresentaram variação muito expressiva, apresentando perda de carga nos intervalos de acionamento da bomba, o que causou o efeito serrote observado principalmente no segundo e no terceiro corpos-de-prova. O primeiro corpo-de-prova apresentava espessura de parede superior aos demais, possibilitando que o sistema fosse mais ativo, o que atesta a sua capacidade de absorver carga. O carregamento suportado por este corpo-de-prova está de acordo com o esperado, entretanto, de maneira geral, ponteira não funcionou conforme o esperado. Em nenhum dos casos ocorreu ruptura, tendo a ponteira se ausentado do colmo de bambu sem apresentar ou causar danos (Figura 68), o que denota falha de detalhamento.



Figura 68: Arrancamento da ponteira sem ruptura na bucha ou no bambu.

Alguns motivos contribuíram para este comportamento:

 A inclinação insuficiente das paredes da bucha: cerca de 3° (5,5556%), que facilitou o deslocamento, diminuindo a restrição mecânica. Geometricamente, mantendo a altura da bucha, a inclinação máxima é de cerca de 6º (11,11%), o que proporcionaria um aumento de 99,084% na parcela de força relativa à resistência ao arrancamento por compressão das paredes;

- A forma cilíndrica da capa, em desacordo com a forma cônica da bucha: Em princípio a idéia era baratear o custo, utilizando geometrias e tamanhos padronizados, mas na realidade, para peças estampadas em aço, que seriam utilizadas em uma eventual manufatura de maior porte, esta diferença de formato não fará diferença;
- A ativação do sistema anterior à colocação do reforço: Seria possível obter ganho de resistência considerável se antes de apertar o sistema tivesse sido colocado o reforço transversal às barras de bambu. Desta maneira, ao ativar o sistema, as paredes de bambu estariam contidas uniformemente pelo reforço, ao invés de pontualmente pela capa, aumentando a eficiência da inclinação da bucha e pré-tensionando as paredes internas do colmo;
- A espessura do bambu utilizado: Na literatura a espessura média relatada para bambus da espécie *Phyllostachys aurea* com cerca de 50 mm de diâmetro é de cerca de 7mm, ao passo que, no caso, os colmos apresentavam paredes de aproximadamente 5,5mm, diminuindo a possibilidade de aperto do sistema.

4.2. Nós

Conforme explicitado na Revisão Bibliográfica, a geometria das estruturas reticuladas espaciais de múltipla camada remonta ao ano de 1907. A partir de então foram utilizados diversos materiais e elaborados diversos tipos de ligações, com geometrias e materiais diferentes. Treliças espaciais de bambu já vêm sendo elaboradas desde o fim da década de 1970, utilizando fundamentalmente nós de aço. Partindo da geometria elementar do nó de aço utilizado neste tipo de estrutura, formada por três planos secantes ortogonais, os nós foram elaborados utilizando bambu da espécie *Dendrocalamus giganteus* laminado contraplacado (Figura 69), cuja descrição da metodologia de fabricação e as propriedades mecânicas estão relacionadas na seção três do capítulo anterior.



Figura 69: Vista explodida do nó em bambu laminado contraplacado e vista de topo do elemento montado e cotado.

As placas de bambu contraplacado foram prensadas na medida de 390 x 390mm, possibilitando a confecção de três nós a partir de cada uma com muito pouco desperdício, relativo simplesmente à regularização das bordas da placa e à passagem da serra. Os cortes globais e as ensambladuras foram realizados em uma serra circular taqueira, que permite o movimento da mesa alinhado com a lâmina, com o auxílio de gabaritos feitos exclusivamente para a produção das peças componentes do elemento (Figura 70). As pontas são então aparadas em uma serra de esquadria regulada a 45º. Após cortadas as peças procedeu-se a colagem com o mesmo adesivo (resorcinol-formaldeído) utilizado na confecção do contraplacado. Com o auxílio de um gabarito foram feitos os furos com 8mm de diâmetro a 15 e 31mm das bordas chanfradas em todas as faces do nó em uma furadeira de coluna, de acordo com a configuração que permitiu melhores resultados nos ensaios de tração pinada do material.



Figura 70: Processo de produção dos nós.

Os encaixes entre as peças foram projetados para gerar intertravamento, de maneira que, mesmo sem a colagem, não são fáceis de desmontar. Os núcleos centrais dos nós são responsáveis pelas ligações nos planos das grelhas ortogonais e os módulos laterais são encarregados das diagonais. Desta maneira, considerando que na grande maioria dos casos são utilizadas somente duas camadas ortogonais, forças decompostas entre as conexões não solicitam diretamente a linha de colagem entre os módulos laterais à tração e são resistidas uniformemente pelo núcleo central nas grelhas, dada a geometria das peças e a orientação das lâminas.

4.2.1. Tração Seqüencial Multidirecional

Dois elementos foram ensaiados à tração seqüencialmente em quatro direções cada: duas componentes do núcleo central e uma em cada plano ortogonal lateral formado por duas peças, de maneira que foram gerados quatro resultados relativos à base e quatro relativos às laterais no total. Além disso, foi possível observar relações de dependência na ruptura entre as peças componentes do elemento, por conta dos ensaios múltiplos.

Os ensaios foram realizados numa máquina universal de ensaios de marca EMIC modelo DL30 com capacidade para 30kN utilizando garras de castanhas para 20kN conectadas a pinças para a passagem dos parafusos conforme a conexão a ser utilizada, descrita na secção um deste capítulo. O deslocamento longitudinal foi obtido através de um LVDT (linear variable differential transformer) GEFRAN com curso de 100mm, posicionado contra a trave móvel da máquina.

A partir dos ensaios foram plotadas curvas força x deslocamento (Figura 71) e obtidos, a título de parâmetro de projeto, as forças máximas e deslocamentos pré-ruptura (Tabela 23).

Tabela 23: Forças máximas e deslocamentos obtidos nos ensaios à tração dos nós.

Elemento	Nó 1		Nó 2	
Orientação	Fmáx.	δ em Fmáx	Fmáx.	δ em Fmáx
Base 1	10,09	5,74	10,14	4,20

Base 2	10,83	5,94	10	4,71
Lateral 1	10,7	5,56	11,47	6,11
Lateral 2	10,9	5,51	8,8	4,44



Figura 71: Gráfico força x deslocamento englobando todos os ensaios à tração nos nós.

De um modo geral pode-se observar um comportamento praticamente linear na relação entre força e deslocamento nos diversos ensaios, sem mudança expressiva no coeficiente angular, o que reflete pouca variabilidade de rigidez entre os diferentes setores de ambos os corpos-de-prova. Para pormenorizar a análise dos gráficos, dividiram-se as curvas em dois grupos, relativos aos ensaios do núcleo central e das laterais respectivamente.





Figura 72: Gráfico força x deslocamento dos ensaios à tração do núcleo central (base) e ilustração do seu modo de falha típico.

O gráfico dos ensaios à tração na base do nó (Figura 72) indica uma resistência máxima bastante característica de cerca de 10kN em ambas as direções dos diferentes corpos-de-prova, denotando independência de funcionamento entre os dois eixos principais do componente e homogeneidade de comportamento entre elementos. Os elementos apresentam modo de ruptura frágil (Figura 72) por cisalhamento interlaminar do tipo 3 (rasgamento), conforme os corpos-de-prova dos ensaios à tração pinada, no entanto, por conta do comprimento de ancoragem das lâminas de bambu no elemento ser maior, a carga máxima teve um incremento de aproximadamente 55% em relação aos mesmos.



Figura 73: Gráfico força x deslocamento dos ensaios à tração dos componentes laterais e ilustração do seu modo de falha típico.

O gráfico relativo aos ensaios dos componentes laterais (Figura 73) apresentou comportamento ainda mais regular em relação à rigidez. No primeiro elemento a força máxima foi semelhante em relação aos componentes laterais ensaiados e à base, denotando comportamento independente entre os diferentes planos. Entretanto, no segundo corpo-de-prova o primeiro plano lateral ensaiado apresentou carga de ruptura cerca de 15% superior à média enquanto o segundo rompeu aproximadamente ao mesmo valor abaixo da média, o que indica interdependência comportamental entre os planos. Os elementos apresentaram modo de falha (Figura 73) a cisalhamento tipo 3, consideravelmente mais tenaz que os componentes basais. Esta tenacidade comparativa ocorre por conta de uma combinação de dois fatores principais: o comprimento de ancoragem das lâminas para um dos lados de cada componente lateral ser o dobro do relativo ao núcleo central, o que faz com que a falha tenda ao lado com menor comprimento; e à geometria dos encaixes, que por proporcionar intertravamento impede que o componente se ausente bruscamente do elemento, proporcionando uma perda de carga gradual, embora rápida. A geometria dos encaixes também pode ser a explicação da interdependência eventual entre os comportamentos dos planos laterais, uma vez que, quando sob tração, um dos componentes laterais rompe atingindo as ensambladuras, uma descontinuidade é gerada no plano lateral ortogonal a ele, afetando a carga limite suportada nesta direção.

Conforme explicitado na secção três do capítulo anterior, a resistência média à compressão do bambu laminado contraplacado (23,55MPa) é 113,315% superior ao melhor caso de resistência à tração (11,04MPa, correspondentes à tração pinada 1531), o que aliado ao fato de no nó a geometria estar favorecida por enrijecedores ortogonais ao plano de compressão e ao uso da pinça que provoca restrição a cisalhamento do tipo 1, indica que o elemento absorveria uma carga bastante superior se submetido à compressão.

4.3. Barras Reforçadas

Nos trabalhos anteriormente publicados sobre estruturas reticuladas espaciais foram utilizadas espécies bastante robustas de bambu, como *Dendrocalamus giganteus* e *Phyllostachys pubescens*, com cerca de 100mm de diâmetro, aproximadamente 10mm de espessura de parede, em geral com dois metros de comprimento. Neste trabalho foram propostos elementos reforçados, utilizando bambu da espécie *Phyllostachys aurea*, com diâmetro aproximado de 50mm e com cerca de 5mm de parede, cuja metodologia de fabricação, as propriedades e o comportamento à compressão estão expostos na seção seis do capítulo anterior. Por tratar-se de uma secção cerca de quatro vezes menos robusta, foi necessário estabelecer um novo comprimento para os colmos a serem utilizados na estrutura.

Recentemente foi concluído nesta instituição, um trabalho acerca do comportamento à flambagem de colmos inteiros da espécie *Phyllostachys aurea* (Cruz, 2002), a partir do qual foram obtidos os parâmetros relativos à esbeltez crítica, tensão crítica e capacidade de absorção de carga, para elementos com diferentes comprimentos (Tabela 24). Assim sendo, desconsiderando o reforço estudado na presente pesquisa, trabalha-se em favor da segurança, tornando válidos os parâmetros obtidos para o cálculo expedito, desde que as

propriedades do material obtidas sejam conformes com as apresentadas no trabalho supracitado.

Corpo-de- prova	Comprimento (mm)	Área (mm²)	Carga (kN)	Tensão Crítica (MPa)	Esbeltez Crítica
CP-7	800	863,95	30,60	35,41	42,64
CP-5	1200	1115,85	34,96	31,33	53,80
CP-3	1400	738,33	17,21	23,31	73,06
CP-2	1800	1013,12	20,09	19,83	94,08

Tabela 24: Valores de tensão e esbeltez críticos obtidos nos testes de flambagem (Cruz, 2002).

Considerando os valores estimados de resistência dos nós a compressão, aproximadamente duas vezes a resistência à tração, tem-se como demanda que os elementos de barra de treliça a serem utilizados na estrutura resistam a carregamentos de até cerca de 20kN. Os colmos utilizados apresentam diâmetro médio de 50mm e espessura média de parede de 5,5mm, o que implica em uma área de seção em torno de 769mm². Para suportar a carga requerida, a tensão crítica a ser resistida deve ser de 26,011MPa, o que de acordo com a curva Tensão x Esbeltez gerada experimentalmente (Figura 74), requer que o valor da esbeltez crítica seja aproximadamente 69. O comprimento máximo do elemento será determinado pela razão de esbeltez, multiplicada pelo raio de giração do colmo, isto é aproximadamente1311mm. Levando em conta a distância de cada topo da barra até o eixo de cada nó tem-se cerca de 105mm, compostos por 80mm da pinça, 10mm da porca de aperto, 14,1mm de espessura de parede até o eixo do nó e 2mm de espessura da capa de ponteira, de maneira que a medida final seria de 1521mm entre eixos. Para tornar mais prática a aplicação dos módulos, optou-se por adotar a medida de 1500mm entre eixos, cabendo aos colmos o comprimento de 1290mm.



Figura 74: Curva Tensão x Esbeltez determinada experimentalmente (Cruz, 2002).

Não foram ensaiadas barras nos tamanhos a serem efetivamente utilizados por conta de tempo, uma vez que para isso seria necessária uma avaliação de flambagem de colunas de bambu com e sem reforço, o que por si só já justificaria uma dissertação. Entretanto foram realizadas diversas simulações adotando diferentes geometrias, utilizando um programa comercial de elementos finitos, adotando os parâmetros descritos neste capítulo.