

7 DIMENSIONAMENTO DE ESTRUTURAS DE BAMBU

Autores:

**LUÍS EUSTÁQUIO MOREIRA
KHOSROW GHAVAMI**

I - Introdução

A grande tarefa dos pesquisadores de Engenharia Estrutural é estabelecer limites confiáveis para a utilização pública de elementos estruturais moldados por determinado material ou conjugações de materiais. Deste modo, somam-se à complexidade do problema tecnológico, as limitações técnicas e culturais das comunidades às quais é proposto um novo material de construção e suas técnicas construtivas.

Embora o Engenheiro Civil seja o elemento socialmente formado para tomadas de decisões acerca do melhor uso estrutural dos materiais, esta prática ainda não se socializou em nosso país. Seria demasiadamente complexo querer detectar o porque deste comportamento, que chega a menosprezar a avaliação tecnológica das estruturas. Porém, é um fato facilmente constatável, que muitas vezes esta atitude não se deve à carência material do consumidor.

Na ânsia de economizar uma análise estrutural, muitos consumidores se expõem e à população, a riscos desnecessários, sem falar dos comuns desperdícios oriundos da falta de planejamento. Por outro lado, percebemos que a engenharia deveria também tornar-se cada vez mais acessível à população em geral, através por exemplo, de prestação de serviços públicos de pequenos projetos.

O atual estágio de desenvolvimento científico e tecnológico, que delega ao indivíduo um grande poder de transformação do ambiente, através de máquinas e produtos de ampla ação, exige cada vez mais que esta acessibilidade seja trabalhada, sob pena de que atos inconscientes gerem prejuízos ainda maiores à biosfera, comprometendo a própria condição dos ecossistemas de suportarem a vida humana.

Em relação ao bambu como elemento estrutural, especificamente, o pesquisador, além de deparar-se com toda esta complexa realidade social, encontra também um conjunto de informações esparsas, relativas à enorme quantidade de espécies de bambu pesquisadas em todo o mundo, cujos parâmetros de resistência apresentam variabilidade com as condições ambientais e biológicas como: - composição do solo, clima, idade, umidade ambiente, etc.

Contudo, construir com o bambu é um fato : o bambu é utilizado há milênios pelos povos asiáticos, seja para artefatos, seja para habitações, alimento ou outra aplicação e portanto, a complexidade do problema tecnológico que se apresenta aos ocidentais não é razão suficiente para que não se empregue o bambu tecnologicamente.

Não é difícil especular sobre o porque do gap tecnológico acerca do uso do bambu como material bruto, se lembrarmos que as populações indiana e chinesa, por exemplo, que mais amplo uso fazem deste material, não têm a mentalidade cartesiana de que somos herdeiros, nós ocidentais. Estes povos, através de suas fortes doutrinas religiosas, têm uma visão holística da vida e do universo, em um grau tal que podemos apenas imaginar, mas de forma alguma vivenciar no cotidiano de nosso sistema cultural.

Todo um gestual se liga ao trato diário com o bambu, com os devidos cuidados no corte, transporte e aplicação do material, etc., o que deverá ser pelo menos em parte, assimilado pelos ocidentais. Também uma prática existencial se constrói através destes sistemas religiosos, nela contida também a prática das construções de habitações, como a Arquitetura Chinesa Feng Shui, de conteúdo totalmente holístico, que é passada no dia-a-dia, de pai a filho ou de mestre a discípulo.

Soluções hábeis e engenhosas, artísticas e artesanais, podem ser verificadas nestes milhares de anos de convivência com o bambu, onde uma intuição apoiada na prática garante uma harmonia de formas, sempre traduzidas em equilíbrio estrutural. Assim, a angulação de

uma tesoura, os vãos livres, o número de bambus para uma coluna resistente, o tipo de encaixe ou junção dos elementos, em função do tipo de telhado, etc; tudo isto é certamente de amplo domínio público no oriente.

Não poderíamos esperar, pelo menos em princípio, que o mesmo ocorresse com o bambu no Brasil. Portanto, a não ser para aplicações sujeitas a baixos carregamentos, como em móveis ou objetos artesanais, as aplicações estruturais com o bambu deveriam passar por uma análise estrutural, como garantia de segurança. Deste modo, com uma constante interação entre resultados laboratoriais e prática construtiva, espera-se que o bambu possa, com o decorrer do tempo e em uso, ser manipulado com a mesma habilidade que a madeira, por exemplo, o é em nosso país.

II - O que vem a ser construir com o bambu ?

Esta é uma pergunta que muitos podem fazer, mas que poucos param para refletir e tentar responder. Várias são as etapas envolvidas e percorridas até que um material esteja disponível no mercado de consumo e possa ser utilizado na construção.

Diferentemente dos minérios, que exigem grande consumo de energia de máquinas e trabalho humano, desde a sua procura, extração, até a manufatura de elementos estruturais, o bambu necessita apenas ser reflorestado em determinada área, para que seja fabricado por processos fotossintéticos, isto é, por processos biometabólicos, que dependem da captura da energia livre solar.

Contudo, os materiais inorgânicos estão disponíveis no mercado e o bambu não está. Por outro lado, não existe plantação organizada de bambus de espécies adequadas à aplicação estrutural, para atendimento a uma maior demanda comercial. Encontram-se sim, algumas espécies, principalmente do gênero *Phyllostachys*, que têm sido usadas na fabricação de móveis conhecidos como “móveis de cana-da-Índia”, que por terem demanda relativamente pequena, não chegam a esgotar a capacidade produtiva dos bambuzais de onde provêm.

Mesmo assim estes bambus são adquiridos para uma pequena fábrica, através da compra de pequenas quantidades em fazendas isoladas que possuem o produto, o que não é uma forma eficiente e econômica de se adquirir a matéria-prima. Portanto, é necessário que sejam feitas plantações para que ele possa ser comercialmente utilizado na construção de estruturas. Por outro lado, não se poderia esperar que se plantasse o bambu sem o estímulo que deveria advir da fabricação de algumas estruturas iniciais.

Para atender a este objetivo, estas estruturas devem ser construídas com todos os cuidados técnicos e estéticos que caracterizam os modelos. Soluções descuidadas e precipitadas seriam sem dúvida, fatores de depreciação do material. Como estruturas modelo, é necessário que haja uma predisposição do investidor na elaboração do produto. Desejar nesta etapa, construir com o bambu porque é um material barato, não implicaria necessariamente que as primeiras construções com bambu ficassem assim tão mais baratas que as demais, feitas com materiais convencionais.

Para se obter baixo custo, todo um planejamento dos processos, desde a aquisição do material, transporte, tratamento, preparação, etc., até as soluções técnico-construtivas, deve estar não somente teoricamente dominado, como já assimilado pelos trabalhadores envolvidos, como acontece com as construções convencionais. Porém, as grandes expectativas que tornam o

bambu atraente são primeiramente a alta produtividade, vindo em segundo lugar a forma tubular pronta para o uso e o baixo peso específico associado à alta resistência mecânica.

Apesar da construção com bambu ser para nós, uma novidade, seria simples treinar um grupo de pessoas para a execução de estruturas modelo. Lembro aqui, apenas, que este treinamento é necessário, visto que o bambu tem particularidades físicas e mecânicas que o diferem de outros materiais, inclusive da madeira lenhosa. Isto não quer dizer também que as soluções construtivas sejam complicadas; ao contrário, o bambu, por seu baixo peso específico e sua forma oca, é facilmente trabalhável por ferramentas simples e é totalmente trabalhável em uma marcenaria.

Detalhes de vedação tradicionais, com paredes de argamassa armadas com bambu, estão disponíveis em *López (1981)* e requerem um estudo comparativo de tempo de execução, eficiência e custo, não somente entre as soluções apresentadas, como entre estas e a vedação tradicional de tijolos. A otimização de sistemas de vedação deve ser objeto de pesquisa da Construção Civil, razão pela qual mereceria um capítulo à parte.

III - O estado da arte das estruturas de bambu

Pode-se constatar que a literatura relativa à construção com o bambu em sua forma bruta ou tubular, atém-se principalmente aos tópicos de detalhes construtivos e testes macro-físicos e macro-mecânicos de algumas espécies e variedades, sem uma preocupação com a identificação descritiva das mesmas, menos ainda com a identificação visual. Desta forma, as tabelas dadas, carecem infelizmente destas informações.

Encontramos por outro lado, uma riqueza enorme de detalhes construtivos, principalmente em *López (1981)* e *López (1978)*, porém há uma ausência de critérios de dimensionamento, ou critérios de seleção de elementos estruturais resistentes, senão esparsas equações para determinação de carga última em *Dunkelberg (1985)*.

Qualquer artigo relativo à construção com bambu, menciona a limitação de seu emprego, devido à dificuldade de se fazerem conexões eficientes para os elementos estruturais, razão pela qual este foi um dos temas da Tese de Doutorado do primeiro autor, conjuntamente com o estudo da estabilidade de elementos comprimidos.

A quase ausência de análise estrutural, na literatura disponível, pode dar a falsa impressão de que esta análise seja impossível ou que a construção com o bambu deva ser totalmente intuitiva. O que ocorre é que, além destes detalhes serem importados de países que já fazem um uso público e tradicional do bambu, as coberturas existentes estão sujeitas a baixos esforços mecânicos, em sistemas estruturais relativamente simples e caso os esforços sejam altos, trabalham superdimensionadas.

Por outro lado é interessante observar que não há em princípio, preocupação econômica quanto ao fato da estrutura ficar superdimensionada, tendo seu peso desta forma, relativamente aumentado. Uma determinada espécie de bambu, em bambuzais devidamente tratados, tende a definir uma uniformidade de diâmetros e em um mesmo bambu, podem ser selecionados elementos com diferentes diâmetros médios.

Considerando-se que a energia gasta para se produzirem diferentes espécies é fundamentalmente solar e que a silvicultura deva diferir pouco para diferentes espécies, pode-se inferir que o custo final de produção seja aproximadamente igual, para diferentes espécies e variedades. Provavelmente os bambus terão preços por unidades, considerando-se as perdas por

rachaduras, sendo a maior ou menor facilidade de extração e transporte, componentes diferenciadores do custo final.

Quanto à análise estrutural, devido à ausência de técnicas de dimensionamento de elementos estruturais de bambu, dedicamos neste capítulo, a apresentar uma primeira versão destes princípios, após uma rápida descrição e apresentação do material bambu. As forças atuantes nas extremidades do elemento estrutural bambu são normalmente calculadas pelos princípios da Teoria das Estruturas. Algumas tabelas com resistência média, para alguns bambus que possam ser mais facilmente identificáveis, são também apresentadas.

Pretendemos desta forma, fornecer ao engenheiro estrutural, os primeiros passos para uma análise racional das estruturas de bambu, sem o que todos estariam sujeitos apenas ao “bom senso”, lembrado aqui como qualidade inseparável do engenheiro, ou capacidade de discernir sobre os fenômenos mais relevantes e extrair da complexidade uma solução simples e segura.

Para tal, adotamos como referência a nova *NBR 7190 (1996)*, com os seus devidos coeficientes de segurança, alterando alguns deles, onde julgamos possível esta alteração. Certamente que tanto os coeficientes de segurança como os coeficientes de resistência, poderão ser futuramente diminuídos, quando se tiverem bosques controlados de determinadas espécies de bambus estruturais.

IV - Propriedades dos bambus

Como dito anteriormente, existem pesquisas minuciosas acerca das propriedades dos bambus, sejam elas químicas, biológicas, físicas e em menor quantidade, mecânicas. Cada uma das variedades estudadas tem suas particularidades físicas e mecânicas; porém, como estas variedades são bastante conhecidas nos países que as utilizam sistematicamente, não tem havido preocupação com a identificação das mesmas, o que torna-se para nós uma deficiência de informação.

Botanicamente as gramíneas não têm crescimento radial, ou seja, o diâmetro do bambu não aumenta com o seu crescimento longitudinal, assim como acontece com uma árvore. Do mesmo modo, o bambu não tem distribuição radial de seiva, como igualmente, acontece com as árvores. Ou seja, todo o feixe vascular do bambu ocorre no sentido longitudinal.

O tecido resistente do bambu ou esclerênquima é na realidade, um conjunto de feixes de fibras que se dispõem ao longo do tubo. A seção transversal destes feixes apresenta-se como pontinhos escuros na seção transversal do bambu. Composto estes feixes estão as células resistentes, de formato cilíndrico e de comprimento igual a 100 vezes o diâmetro. A parede destas células são compostos lignino-celulósicos, ou seja, esta é a composição química básica do tecido resistente do bambu. A Tabela 7.1, faz uma comparação dos componentes químicos do bambu e madeira.

Tal é a uniformidade de distribuição dos tecidos do bambu, que garantem deformações higroscópicas também uniformes, que as primeiras réguas de cálculo eram feitas com bambu. Ou seja, as lâminas de bambu, tiradas ao longo do seu comprimento, não têm problemas de empenamentos.

Envolvendo o esclerênquima está o parênquima, que é um tecido de baixa rigidez, verdadeiro depósito de alimentos para os insetos, razão pela qual os bambus necessitam ser

devidamente preservados para sua durabilidade. Os presevativos, praticamente os mesmos utilizados para preservação da madeira, bem como os diversos métodos de tratamento, são também vastamente citados na literatura (*López, 1981*), (*Bamboos Current Research, 1988*) e (*Recent Research on Bamboos, 1985*), garantindo durabilidade por 20 anos ou mais, dependendo do ambiente onde vai ser aplicado o material.

Lembramos aqui que todo material de construção tem uma vida útil e seus métodos de proteção, sejam eles revestimentos, pinturas, galvanizações, etc, ou seja, a manutenção de uma estrutura deve ser uma atividade permanente, independente do material de que esta estrutura seja feita, já que quimicamente, os materiais são uma organização de moléculas, quer natural, quer artificial e como tal, elas tendem a combinar-se com outros elementos químicos, resultando na reestruturação ou desestruturação das moléculas iniciais.

A maioria dos bambus atinge o seu tamanho definitivo no máximo em 4 meses, após ter brotado do solo. Os próximos meses serão necessários para a lignificação dos tecidos, até atingirem resistência máxima por volta dos três anos de idade, o que é variável de espécie para espécie.

De acordo com as referências, os rizomas, verdadeiras fábricas naturais de bambu, somente atingem maturidade por volta de 6 anos de idade, isto é, somente após um período como este é que os rizomas estarão lançando diâmetros definitivos que caracterizam a espécie e estarão em alta produtividade, apesar de que anualmente estarão nascendo novos bambus. O tempo de maturidade do rizoma é também variável de espécie para espécie e precisa ser melhor investigado.

TABELA 7.1 - Composição química dos bambus e madeiras moles

Componente	Bambus	Madeiras moles
% celulose	55	50
% lignina	25	25
% hemicelulose, cinzas, etc	20	25

Contudo, os rizomas duram dezenas de anos e mesmo mais de cem anos, para algumas espécies, com produtividade dependente da silvicultura adotada. É preciso lembrar que uma cultura de bambus é similar à cultura da cana-de-açúcar e merece os devidos cuidados para uma boa produtividade.

Quanto à resistência mecânica dos bambus, ela é sensível à espécie, à idade de corte, ao período de corte e à composição química do solo. Para um mesmo bambu é também sensível, principalmente, ao conteúdo de umidade e ao local do colmo de onde a amostra é extraída, isto é, há um gradiente de resistência ao longo do tubo.

Temos nos concentrado no estudo da espécie *Dendrocalamus giganteus*, principalmente por sua forma retilínea e grandes diâmetros, além da ótima resistência mecânica. Como interessou-nos, primeiramente, o comportamento estrutural do bambu, para cada corpo de prova ensaiado, seja à flambagem ou flexão, foram determinados módulos de elasticidade e tensões de ruptura.

As médias encontradas, quer à compressão, flexão ou cisalhamento, bem como módulos de elasticidade E , encontram-se relativamente inferiores às médias dadas nas

referências, o que de forma alguma é de se estranhar, dado o enorme número de parâmetros de que a resistência é função e portanto, da impossível reprodução de iguais condições de ensaio.

Observando-se as referências, podemos constatar que de um modo geral, as espécies de bambus de menores diâmetros são mais resistentes mecanicamente, que as espécies de maiores diâmetros. É o caso, por exemplo, dos bambus do gênero *Phyllostachys*, que têm diâmetros bem inferiores aos bambus do gênero *Dendrocalamus*, sendo porém mais resistentes. Também em uma mesma espécie, a resistência do material, diminui em geral, com o aumento do diâmetro.

Em termos de projeto, acreditamos podermos trabalhar, para uma mesma espécie, subtraindo-se dos valores médios os correspondentes desvios padrões, para levar em conta diferentes idades e posições do colmo de onde o elemento é extraído. Esta seria uma forma conservativa de selecionar os elementos estruturais, porém econômica do ponto de vista de critérios de seleção dos bambus, bem como de inspeção da execução das estruturas.

Apresentamos nas tabelas a seguir, alguns valores médios de densidade aparente, tensões de ruptura e módulos de elasticidade, extraídos de uma coletânea mundial feita por *Jansen (1991)*, onde por simplificação, calculamos médias que levam em conta diferentes situações, razão pela qual surgem desvios padrões elevados.

Embora estes bambus não estejam devidamente descritos para sua identificação, estes valores servem para comparação com os que fornecemos ao final de cada tabela, que referem-se à espécie *Dendrocalamus giganteus*. Os bambus desta espécie são facilmente identificáveis pelas características:

- São de cor verde escura e têm superfície fosca.
- Têm forma bastante retilínea e atingem de 15 a 30 metros de altura.
- Têm diâmetros da base que variam de 15 a 30 cm.

Nas tabelas abaixo, D é o diâmetro externo médio do bambu e t é a espessura média de parede; Dif. D e t significa diferentes diâmetros e espessuras de parede.

TABELA 7.2 - peso específico ρ e desvio padrão correspondente $\delta\rho$ (kN / m^3)

ρ	$\delta\rho$	Gênero - espécie	Procedência	Média para
7,09	1,75	14 dif. espécies	Taiwan	14 dif. espécies
6,66	0,58	Bamboo wood	China	Dif. locais/colmo
6,99	1,65	-	China	Dif. locais/parede
6,52	0,79	Phyll. glauca	China	2 a 7 anos /idade
5,95	0,37	Bamboo wood	China	Diferentes autores
6,76	0,42	Dend. strictus	Índia	2 a 6 anos/idade
6,61	1,00	7 dif. espécies	Taiwan	7 dif. espécies
6,81	0,44	Dend. strictus	Índia	2 a 6 anos/idade
5,94	0,72	Dend. strictus	Índia	Dif. locais/colmo
7,29	0,35	Bambusa Nutans	Índia	Dif. idades e locais/colmo
9,22	0,46	Phyll. reticulata	Japão	1 a 5 anos/idade

8,30	0,87	Phyll. edulis	Japão	1 a 5 anos/idade
6,10	0,4	Dend. giganteus	uc/Rio	2,5 anos /idade

TABELA 7.3 - Resistência última à compressão e desvio padrão correspondente (MPa)

Espécie	Procedência	Média para	$f_{c0,m}$	$\delta f_{c0,m}$
Bamb. spinosa	Filipinas	Dif. D e t	53,5	
Bamb. tuldoides	Reino Unido	Dif. D e t	35,0	8,0
Phyllost. reticulata	Japão	1 a 5 anos/idade	81,0	7,0
Phyllost. edulis	Japão	1 a 5 anos/idade	68,0	13,0
Bamboo wood	China	1 a 5 anos e diferentes	65,0	5,0
Dend. strictus	Índia	autores	60,6	8,5
Bambusa Nutans	Índia	2 a 2,5 anos e dif. autores	70,4	11
Dend. strictus	Índia	2 a 5 anos	54,5	4,9
Phyllost. pubensis	Japão	2 a 6 anos	73,2	2,4
Dend. giganteus	PUC/Rio	2,5 anos/idade	40,0	5,0

TABELA 7.4 - Resistência última (f_{tm}) e limite de proporcionalidade (f_p) à tração e desvios padrões correspondentes (MPa)

Espécie	Proced.	Média p/	f_{tm}	δf_{tm}	f_p	δf_p
Phyll. ed.	Japão	Dif. spes. t	178,7	57,0	59,0	12,4
Phyll. pub.	Japão	Dif. spes. t	263,0	16,0	68,0	9,0
?	Alemanha	-	210,0	21,0	-	-
Arun. tecta	China	-	91,6	30,5		
Dend. gig.	PUC/Rio	2.5 anos/id	$\cong 150,0$	-	-	-

TABELA 7.5 - Resistência última (f_{bm}) e limite de proporcionalidade (f_{bp}) à flexão e desvios padrões correspondentes (MPa)

Espécie	Proced.	Média p/	f_{bm}	δf_{bm}	f_{bp}	δf_{bp}
Uso comum	Filipinas	Dif D e t	54	6,5		
Uso comum	Filipinas	Dif D e t	46	9,7		
Uso comum	Filipinas	Dif D e t	51,3	8,7		
Phyl. glauca	Índia	2 a 7 anos	155	23		
Den.strictus	Índia	2 a 6 anos	95	2	58,2	2,5
Den.strictus	Índia	1 a 2,5 anos	76,7	20,1	46,0	12,5
Bam.Nutans	Índia	2 a 5 anos e dif.	87,8	21	49	10

		local/colmo		
D.giganteus	PUC/Rio	2,5 anos	50,0	5

TABELA 7.6 - Limites de resistência ao cisalhamento paralelo (f_{vm}) e desvio padrão (MPa)

Espécie	Procedência	Média para	f_{vm}	δf_{vm}
Phyllost. reticulata	Japão	Dif. umidades	20,0	4,3
Phyllost. edulis	Japão	Dif. umidades	20,2	3,8
Phyllost. nigra	Japão	Dif. umidades	22,0	2,7
Phyllost. pubensis	Japão	Dif. corpos de prova	11,8	1,1
Phyllost. edulis	Japão	Dif. corpos de prova 2 a 5 anos	13,8	1,2
Bambusa Nutans	Índia	2,5 anos/idade	8,3	1,0
Dend. giganteus	PUC/Rio	2,5 anos/idade	6,3	1,0

TABELA 7.7 - Módulos de elasticidade e desvios padrões (MPa)

Espécie	Procedência	Média para	E_m	δE_m	Solicitação
Dend. strictus	Índia	2 a 6 anos	14.818	850	flexão do colmo
Dend. strictus	Índia	1 a 2,5 anos	11.792	2.788	flexão do colmo
Bamb. Nutans	Índia	2 a 5 anos	12.713	2.410	flexão do colmo
Den. giganteus	PUC/Rio	2,5 anos	11.000	1.000	flexão do colmo
?	Alemanha		21.000	4.384	tração paralela
Arund. tecta	China		19.180	3.030	tração paralela
Den. giganteus	PUC/Rio	2,5 anos	17.000		tração paralela
Den. giganteus	PUC/Rio	2,5 anos	12.000		compressão paralela

Quanto à Tabela 7.5, temos o seguinte comentário: - as tensões limites de resistência em flexão, apresentadas na literatura, têm valores bastante superiores aos limites de resistência à compressão paralela. Isto é bastante curioso, uma vez que quem delimita a resistência à flexão é a resistência à compressão do lado côncavo da viga. Obviamente que as tensões teóricas que estariam atuando nas fibras extremas seriam superiores ao valor médio calculado pela expressão $\sigma_c = \frac{M}{I_f} \times \frac{D}{2}$, se considerarmos que a rigidez das fibras extremas é bem superior à rigidez das fibras internas, ao longo da espessura. Porém, nada impede que controlemos a

resistência em flexão, pela tensão média hipotética, dada pela equação acima, comparando-a com o limite de resistência em compressão pura.

V - Considerações básicas acerca do dimensionamento de elementos estruturais de bambu

Uma diferença notável entre o bambu e uma peça de madeira é a quase ausência de defeitos ou nós nos tecidos resistentes do bambu. Por outro lado, devido à sua forma oca, com espessura de parede relativamente pequena, qualquer defeito pode ser detectado por inspeção visual, seja ele uma deformação por secagem, que provoca canais longitudinais, sejam fissuras ou rachaduras, ou furos na região das gemas ou galhos.

Diferentemente da tora de madeira, que pode conter trincas internas radiais invisíveis na superfície, exceto na seção transversal, o bambu pode ser visualmente inspecionado quanto à sua categoria de qualidade, devendo ser rejeitado para uso estrutural, qualquer elemento que contenha defeitos. Outra característica que permite a diminuição dos coeficientes de resistência, em relação à madeira é o fato do bambu ter um tecido resistente com distribuição bastante uniforme, com desvios apenas na região nodal, o que não compromete a resistência mecânica do tubo.

O parâmetro mais útil para o cálculo estrutural do bambu é a razão diâmetro interno para diâmetro externo, que definimos como esbeltez diametral $\lambda_D = D_i / D$, que pode ser calculada para cada espécie ou por trechos do colmo de uma mesma espécie.

O bambu apresenta também uma forma cônica, que afunila da base para o topo, com variação também da espessura de parede, que diminui igualmente da base para o topo. Pode-se portanto, procurar definir para cada espécie, as razões de conicidade $\Delta D / L$ e $\Delta t / L$, sendo ΔD e Δt , as diferenças entre os diâmetros médios extremos e espessuras de parede médias extremas, respectivamente e L o comprimento do elemento estrutural. Quanto maiores estes valores, maior a conicidade do bambu, o que reflete na estética estrutural tanto para a estrutura indeformada como deformada, esta devido à assimetria da linha elástica em flexão e flexo-compressão, que seria mais ou menos visível, dependendo do maior ou menor comprimento do elemento, respectivamente.

Até agora estamos falando de diâmetro e espessura de parede, sem nos referirmos ao fato de que se tratam de valores médios. Na realidade, seção transversal alguma é perfeitamente circular ou elíptica, podendo delas se aproximarem ou muito se desviarem em um mesmo elemento estrutural. Por outro lado, em uma mesma seção transversal, podem-se registrar diferenças de espessuras de parede da ordem de 60 % entre os valores máximos e mínimos. Um estudo minucioso das variações geométricas de bambus da espécie *Dendrocalamus giganteus*, mostrou que estas variações geram desvios nas áreas médias das seções, com coeficiente de variação de 5 % e nas inércias, com coeficiente de variação de 10 %.

Propomos portanto, o seguinte critério para seleção dos bambus ou segmentos de tamanhos iguais, para uma mesma espécie, em um depósito de bambus, ligado à plantação artificial:

- Controlar anualmente os parâmetros mecânicos das populações extraídas
- Verificar se há realmente necessidade de se esperar 3 anos para total resistência mecânica da espécie. Se por exemplo, em 2 anos já se atingiu 80 % da resistência mecânica

final e o corte com esta idade, não compromete a durabilidade do bambu, não há razões para não extraí-lo.

- Cada tamanho de corte, definido para cada espécie, a partir dos comprimentos mais adequados a transporte e armazenagem, deve ter pintado nas duas extremidades, o diâmetro médio da seção transversal correspondente, obtido através da média de duas medidas ortogonais. Para isto deve-se escolher uma tinta que tenha durabilidade compatível com o tempo médio de armazenagem e à prova d'água. Deste modo, as prateleiras, com elementos estruturais do mesmo tamanho, poderão conter bambus selecionados por seus diâmetros, com uma faixa de variação conveniente à futura aplicação estrutural.

Este procedimento facilita a seleção dos bambus para determinada aplicação estrutural, pois a não ser quando se desejar aumentar o carregamento de determinada estrutura de bambu já executada, o cálculo de uma estrutura de bambu consistirá, como de praxe, da determinação de geometrias mínimas necessárias para resistir a determinados esforços solicitantes, e a execução, da seleção de tubos com características que satisfaçam a estes requisitos, sem preocupação excessiva com o fato de alguns elementos estruturais ficarem relativamente superdimensionados, o que seria limitado antes por razões estéticas que econômicas, como visto.

A uniformidade de diâmetros, seja em treliças planas ou espaciais, tornam a estrutura com aspecto mais agradável. Obviamente, no caso de treliças espaciais, onde existe um grande número de elementos com esforços axiais muito diferentes, alguns podendo ser teoricamente nulos, podem-se por exemplo utilizar 3 ou mais conjuntos de diâmetros superiores à média estipulada pelo cálculo estrutural, de tal forma a se dar maior aproveitamento aos bambus.

Fica aqui a observação de que o aproveitamento de material, proporcionado por este critério de seleção, por intervalos de carga, tem o inconveniente de gerar mais cálculo estrutural e exigir um mapa de montagem melhor detalhado, onde se poderiam distinguir os diferentes elementos por meio de cores, e exigiriam também maior inspeção durante a montagem da estrutura. A nível industrial, os critérios mais eficientes serão evidenciados pelo cotidiano, à medida que o trabalho se desenvolver.

Outro fator realmente limitante da capacidade de carga do bambu é a sua possibilidade de rachar em serviço. Pode-se verificar que os bambus já secos e sem rachaduras têm muito poucas probabilidades de se racharem, se não ficarem expostos a variações amplas e/ou bruscas de temperatura. A pintura dos bambus com tinta branca, mostrou-se adequada para proteção contra rachaduras devidas à exposição solar, sendo fundamental de ser aplicada antes da montagem da estrutura, se esta for ficar exposta ao sol, por longo período, antes de ser coberta.

Enfim, deve-se ter um critério de montagem que evite a intensa exposição solar dos bambus, principalmente em grandes estruturas, tipo treliças espaciais. Sugerimos que estas montagens sejam feitas após o por do sol, ou na ausência do sol intenso, desenvolvendo-se um sistema adicional de proteção dos trechos já montados no canteiro de obras, além da pintura. Da mesma forma, o sistema de cobertura deve ser tal que não transfira calor excessivo aos elementos estruturais, o que também poderia rachá-los. Por exemplo, o contato direto ou muito próximo dos bambus com telhas metálicas, pode causar rachaduras nos mesmos.

VI - O dimensionamento dos elementos estruturais

Como dito anteriormente, a proposta de dimensionamento do bambu, que apresentamos neste capítulo, ainda não foi convencionalizada em norma, sendo portanto um primeiro passo, sujeito a futuras complementações e/ou alterações.

Em termos práticos, achamos pouco relevante que exista um gradiente de módulo de elasticidade e mesmo de tensões de ruptura ao longo do tubo. Pode-se trabalhar com os menores valores médios definidos nos testes, entre base, meio e topo do bambu, a menos que se faça um critério ainda mais rigoroso de seleção do que o anteriormente apresentado, o que poderia tornar-se anti-econômico. Os segmentos da base são mais facilmente reconhecíveis e poderiam ser um caso à parte, enquanto que poderíamos trabalhar com meio e topo, sem fazer distinção. Este procedimento, favorável à segurança, não acarretaria prejuízos financeiros e auxiliaria a contornar a grande variabilidade que apresentam os materiais naturais em geral.

O limite de resistência dos bambus, assim como das madeiras, está ligado ao aparecimento de fenômenos particulares de comportamento além dos quais há restrição de emprego do material em elementos estruturais, como ruptura ou deformação específica excessiva. Achamos viável trabalhar com a nova *NBR 7190 (1996)*, aproveitando-se os coeficientes de ponderação das ações e alterando-se alguns coeficientes de resistência, onde possível.

Isto porque bambu e madeira têm composição química muito parecida, sendo as células resistentes, compósitos lignino-celulósicos. Alguns livros de madeira mencionam o bambu como madeira fibrosa. Na classificação botânica as plantas superiores pertencem à divisão das Fanerógamas, que por sua vez se subdividem em gimnospermas e angiospermas. Os angiospermas são plantas mais organizadas e completas que os gimnospermas, aparecendo nos períodos Cretáceo e Terciário. Dividem-se aquelas em monocotiledôneas e dicotiledôneas. Entre as monocotiledôneas não há árvores, mas palmas e gramíneas. Entre as gramíneas, encontra-se o bambu que não é uma árvore propriamente dita, porém dotado de alta resistência mecânica.

O dimensionamento e métodos de ensaio do bambu não encontram-se incluídos na norma de madeira. Contudo, trata-se do melhor referencial para iniciarmos uma proposta de dimensionamento, dada a enorme semelhança entre os materiais, a nível químico, celular, comportamento mecânico e higroscópico.

VII - Comentários sobre a nova NBR 7190

A nova *NBR 7190 (1996)*, trabalha com o Método dos Estados Limites, sendo portanto, não determinística como a antiga versão. Dentro destes conceitos, as estruturas são dimensionadas com teorias probabilísticas acerca das ações simultâneas, atuantes em uma estrutura, bem como das possibilidades de falha de um elemento estrutural, seja globalmente ou por efeito localizado.

São considerados normalmente dois tipos de estados limites:- de utilização e de resistência. Como Estados Limites de Utilização, entendem-se aqueles estados dos elementos estruturais, que possam prejudicar a estética estrutural, como por exemplo flechas excessivas; possam gerar ruídos incomodativos ou mal estar aos usuários do ambiente, como vibrações devidas a esbeltez excessiva; possam prejudicar a adaptação de outros elementos à estrutura ou

mesmo prejudicar estes outros elementos, como níveis de deformações que possam gerar trincas às paredes, prejudicar portas e janelas, etc.

Os Estados Limites de Resistência referem-se à capacidade de resistência e estabilidade limite dos elementos estruturais e ligações, sujeitos aos mais diversos tipos de ações e esforços solicitantes, tendo cada caso seus coeficientes próprios de resistência, dependendo do comportamento do material sob determinado tipo de solicitação. A relação entre os coeficientes de ponderação das ações e das resistências devem estar interligados por uma equação que define o índice de segurança da estrutura, admitindo-se que as resistências tenham distribuições normais de probabilidade.

As resistências características são multiplicadas por um coeficiente de modificação k_{mod} , referentes ao material e que portanto, não devem ser tratados como coeficientes de segurança, bem como por coeficientes de segurança γ_w . O coeficiente k_{mod} é o produto de três coeficientes, $k_{mod,1}$ que se refere ao envelhecimento do material e pode ser conservado para o bambu; $k_{mod,2}$, que refere-se à umidade ambiente e portanto à umidade da madeira ou do bambu, podendo também ser conservados os valores da norma e $k_{mod,3}$, que refere-se à categoria do produto.

Ora, o que garante o uso estrutural do bambu é exatamente tratar-se de um material de primeira categoria, já que conta com um mínimo de material para resistir aos esforços solicitantes, não tendo portanto, volume para comportar probabilisticamente, a presença de defeitos. Portanto, é perfeitamente possível selecionarmos somente bambus de primeira categoria, apenas visualmente, o que nos permite considerar $k_{mod,3}$ igual a 1.

TABELA 7.8 - Coeficientes relativos $k_{mod,1}$ e $k_{mod,2}$ relativos ao material

Classe de carregamento	$k_{mod,1}$	Umidade ambiente	$k_{mod,2}$
Permanente	0,6	$0\% \leq U_{amb} < 75\%$	1,0
Longa duração	0,7	$75\% \leq U_{amb}$	0,8
Média duração	0,8		
Curta duração	0,9		
Instantânea	1,0		

Bambus com rachaduras ou fissuras, sulcos longitudinais provenientes da secagem, furos nas regiões das gemas ou galhos ou com paredes danificadas pelo ataque de insetos ou fungos, devem ser rejeitados para aplicação estrutural e estes defeitos são facilmente identificáveis visualmente. Unidades de uma determinada população, que porventura tenham peso bem inferior às demais, o que é facilmente percebido no transporte manual, devem também ser rejeitadas. Bambus com baixo peso específico são normalmente mais resistentes.

Quanto às resistências e módulos de elasticidade obtidos nos ensaios, devem ser corrigidos para a umidade padrão de 12 %, como é feito para a madeira. Despreza-se também a influência da temperatura, para a determinação da resistência, para uma faixa de 10 °C a 60 °C, a nível de ensaio. Contudo, as estruturas de bambu não podem ficar expostas ao sol. Dentre as simplificações da *NBR 7190 (1996)*, também válida para o trato com o bambu, considera-se o

módulo de elasticidade médio à compressão paralela às fibras, igual ao módulo médio à tração paralela.

A resistência característica para qualquer tipo de solicitação é tomada igual a 70% da resistência média obtida nos ensaios, esta padronizada para a umidade de 12 %. Pode-se igualmente manter esta redução para os bambus estruturais. Esta redução procura delimitar a grande variabilidade de resistência dos materiais naturais. A nomenclatura aqui utilizada refere-se à *NBR 7190 (1996)*, razão pela qual omitimos a sua descrição, exceto pelo que utilizamos em alguns casos, b , de bambo, ao invés de w , de wood.

VIII - Dimensionamento à tração

Devido à forma cônica do bambu, suas áreas extremas são diferentes, Portanto, a menor área deverá definir a capacidade de carga à tração. A verificação de segurança é expressa por:

$$\sigma_{td} \leq f_{td} \quad (7.1)$$

$$\sigma_{td} = \frac{N_d}{A_u} \quad (7.2)$$

$$A_u = A_b - A_r \quad (7.3)$$

$$A_b = \frac{\pi \times D^2 [1 - (\lambda_D)^2]}{4} \quad (7.4)$$

$$f_{td} = k_{\text{mod}} f_{tk} \quad (7.5)$$

$$k_{\text{mod}} = k_{\text{mod}1} k_{\text{mod}2} \quad (7.6)$$

$$f_{tk} = 0,7 f_{tm} \quad (7.7)$$

De posse do valor de área calculado e da espécie que estamos trabalhando, podemos selecionar os elementos que tenham área superior, através da extremidade de menor diâmetro. A área útil A_u deverá descontar as áreas dos entalhes e/ou furos, que diminuam a seção transversal, identificada como área de redução A_r .

Como o tecido do bambu é uniformemente longitudinal, o ângulo das fibras do tecido resistente (esclerênquima) com o eixo do bambu é sempre nulo, não necessitando redução em f_{td} , como é o caso de algumas peças de madeira.

Achamos muito conservativo considerar-se para o bambu, o coeficiente de segurança $\gamma_b = 1,8$, conforme a *NBR 7190 (1996)*, para o cálculo de f_{td} . O bambu é muito eficiente à tração e tem uma qualidade facilmente selecionável. Prova disto é que as tiras de bambu são utilizadas como armaduras no concreto. Um coeficiente de segurança de 1,8 após a aplicação de k_{mod} , seria excessivo e contraditório com a natureza do bambu, podendo exigir diâmetros exagerados para resistir aos esforços, no estado de seleção dos elementos, sem real necessidade.

Lembramos novamente que a possibilidade do bambu rachar-se deve-se mais à sua exposição ao calor excessivo, o que deve ser antes evitada, pois pode representar o colapso dos elementos comprimidos e até mesmo dos tracionados, dependendo do tipo de conexão utilizado na ligação dos elementos.

Contudo, cabe salientar que em bambus defeituosos, com 2 metros de comprimento, ensaiados em flexo-compressão, as fissuras superficiais perfeitamente visíveis e de comprimento relativamente grande, não se propagaram. Abriam-se ligeiramente e não foram responsáveis pelo colapso do elemento estrutural, que continuou rompendo-se pelo mesmo mecanismo dos bambus em perfeito estado, ou seja, por esmagamento das fibras da parte côncava, sujeita às maiores tensões compressivas.

Exemplo

Dimensionar um bambu da espécie *Dendrocalamus giganteus*, sujeito à uma força de tração de $N_d = 20 \text{ kN}$, utilizando-se como conexão um Sistema de Reforço (vide último item deste artigo, “Sistema de Reforço para Elementos Estruturais de Bambu”), com 6 sulcos de largura $s = 2.5 \text{ mm}$. Considerar a umidade ambiente igual a 65 %, ou seja $k_{mod,2} = 1$.

Da Tabela 7.4 tem-se que $f_{tm} = 150 \text{ MPa}$. Consideremos a esbeltez $\lambda_D = 0,85$.

Aplicando-se a condição de segurança Eq. (7.1), com as definições Equações (7.2-7.7), temos:

$$\frac{20000}{A_u} \leq 0,6 \times 0,7 \times 150 \quad \therefore A_u = A_b - A_r \geq 317,5 \text{ mm}^2$$

$$\lambda_D = \frac{D_i}{D} = 0,85 = \frac{D - 2t}{D} \quad \therefore t = 0,075D$$

$$A_u = \frac{\pi \times D^2}{4} (1 - 0,85^2) - 0,075 \times D \times 6 \times 2,5 \geq 317,5 \quad \therefore D \geq 40,8 \text{ mm} \quad \therefore t \geq 3,06 \text{ mm}$$

Basta então selecionarmos os bambus pela extremidade de menor seção, pelo diâmetro, já que a esbeltez λ_D é facilmente definível para cada espécie.

IX - Dimensionamento à Compressão

Os testes de elementos cilíndricos em compressão, com altura igual a $2D$, apresentam dificuldades de execução como: - centralização do carregamento, ondulações

mínimas das superfícies da seção transversal, que entrarão em contato com os apoios e atritos no contato com a prensa, que impedem as deformações por Poisson no contato.

Deste modo, as rupturas dos corpos de prova se dão sempre no contato, por esmagamento progressivo das fibras, que se caracteriza por um mecanismo de tombamento das mesmas no sentido radial, o que evidencia a participação do esforço cortante na compressão, agindo a 45° .

Deste modo, a obtenção da curva tensão \times deformação completa, com os valores das tensões e deformações características até a ruptura, fica prejudicada, embora possa ser estimada, conjugando-se os resultados destes testes com os de outros tipos de testes, seja de flexão pura ou flexo-compressão (Moreira, 1997).

A condição de segurança, válida apenas para segmentos cilíndricos com esbelte $\lambda \leq 30$, quando a aplicação de carga for centrada e não houverem imperfeições iniciais visíveis, é expressa por:

$$\sigma_{cd} \leq f_{c0,d} \quad (7.8)$$

$$\sigma_{cd} = \frac{N_{cd}}{A_u} \quad (7.9)$$

$$f_{c0,d} = \frac{k_{\text{mod}} f_{c0,k}}{\gamma_b} \quad (7.10)$$

$$k_{\text{mod}} = k_{\text{mod},1} \times k_{\text{mod},2} \quad (7.11)$$

$$f_{c0,k} = 0,7 f_{c0,m} \quad (7.12)$$

$$\gamma_b = 1,4$$

X - Dimensionamento à flexão

A carga última do bambu em flexão define-se pelo esmagamento progressivo das fibras na zona comprimida. As deformações de compressão atingem valores da ordem de 0,6 % no instante da ruptura do elemento estrutural.

O elemento estrutural pode partir-se em diversas tiras, no trecho sujeito aos maiores momentos fletores. A espessura de parede relativamente grande, por sua capacidade de absorver deformações por flexão, não apresenta instabilidade elástica, somente podendo ter um afundamento progressivo, em alguns casos, após o esmagamento das fibras, que descrevem uma linha circunferencial na região côncava do bambu, à qual chamamos arco de esmagamento.

Observado mais proximamente, percebe-se que o mecanismo local que leva o elemento à ruptura, consiste na instabilidade das fibras comprimidas, que deslocam-se radialmente por ação das tensões cisalhantes, agindo localmente a 45° .

Quanto à flecha máxima, elementos curtos sujeitos a grandes cargas de flexão, têm grande influência das deformações por cortante, assunto que deverá ser tema de pesquisa. O módulo transversal G é muito baixo e seria mais facilmente determinável através de testes de torção, onde não teríamos a participação das deformações por flexão. A efetiva participação dos nós na flexão é exatamente conter a ovalização da seção durante a flexão, o que traria a diminuição do módulo resistente e conseqüentemente, a diminuição da capacidade de carga do elemento, bem como conter o deslizamento, causado pelas tensões cisalhantes paralelas às fibras, atenuando deste modo, as deformações devidas ao cortante.

As pesquisas demonstram que existe um gradiente de densidade aparente ρ e de módulo de elasticidade longitudinal E , segundo *Amada (1996)*, no sentido radial, isto é, ambos tendem a aumentar ao longo da espessura da parede do bambu, no sentido do aumento do raio R , da seção transversal. O aumento de densidade é facilmente quantificável em testes simples. Pode-se também verificar visualmente, que numa faixa de 20 a 30 % da espessura de parede, junto à superfície externa, há um grande aumento de concentração de esclerênquima, que aparece como pequenos pontinhos pretos ou marrons, na seção transversal.

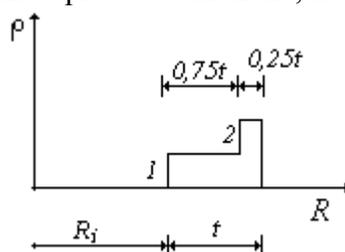


FIGURA 7.1- Modelo de distribuição de densidade

Este aumento de densidade é responsável por um aumento de inércia da ordem de 30 %, considerando-se um modelo de distribuição de densidade do tipo mostrado na Figura 7.1, em que a densidade aparente dobra nos 25 % externos da parede, o qual é bem coerente com os bambus analisados. Com uma consideração deste aumento de inércia, devido a ρ e considerando-se uma seção transversal única e igual à seção transversal central do elemento, consegue-se explicar bem as curvas $P \times \Delta$ dos testes de flambagem. Contudo, a influência do cintamento do tubo devido ao gradiente radial de E não fica evidente, mesmo quando o elemento tem praticamente a mesma inércia ao longo de seu comprimento de 2 metros, o que não é fato incomum dentro da espécie *Dendrocalamus giganteus*.

Ou seja, não houve como considerar o efeito enrijecedor deste gradiente de E , durante a flexão de elementos de 1,7 m de comprimento por 10 cm de diâmetro, parecendo ser anulado pelo efeito contrário das deformações por cisalhamento, cuja influência na flecha máxima é bastante evidente e relevante. A influência das distorções em testes de flambagem de elementos de 2 m de comprimento e 10 cm de diâmetro, não é evidente e ainda está em estudo.

Portanto, o acompanhamento analítico dos testes realizados, descreve bem os fenômenos de flexo-compressão e de flexão pura, trabalhando-se com uma seção única igual à seção transversal central, considerada média e levando-se em conta apenas o gradiente de densidade ρ .

Janssen (1991), relata que foram realizados diversos ensaios de flexão de longa duração, constatando a fluência em flexão, com aumento de flechas da ordem de 65%, bem

como uma redução da carga limite de ruptura de 25 %. A fluência em flexão é um fenômeno que exige um estudo mais profundo, para cada espécie adotada estruturalmente. Esta fluência está provavelmente relacionada ao efeito do cortante, ou seja, as tensões cisalhantes na flexão deslizariam os feixes de fibras no sentido longitudinal, gerando o aumento lento da flecha máxima.

Genericamente, propomos que a resistência média dos ensaios em flexão, seja reduzida de $(0,25^2 + 0,3^2)^{1/2} = 0,4$, ou seja, de 40 %, ao invés de 30 %, adotada na norma, para levar em conta a redução da resistência, devida à fluência do bambu em flexão. Como o bambu é mais resistente à tração do que à compressão, o controle de segurança se faz pela compressão:

$$\sigma_{cd} \leq f_{c0,d} \quad (7.13)$$

$$\sigma_{cd} = M_d / w_f \quad (7.14)$$

$$w_f = 1,3 \times 0,9 \times w_g = 1,17w_g \quad (7.15)$$

$$w_g = \frac{\pi \times D^3 [1 - (\lambda_D)^4]}{32} \quad (7.16)$$

$$f_{c0,d} = k_{\text{mod}} \times f_{c0,k} \quad (7.17)$$

$$f_{c0,k} = 0,6 \times f_{c0,m} \quad (7.18)$$

No dimensionamento, uma vez determinado w_f , ou módulo resistente físico, calcula-se o módulo resistente geométrico w_g . A seleção dos bambus pode ser feita calculando-se D pela Eq.(7.16), sendo conhecido aproximadamente, para a espécie em estudo, a esbeltez λ_D . Este diâmetro D corresponde ao mínimo diâmetro da seção mais solicitada, que poderia corresponder à seção média para um carregamento simetricamente distribuído. Ou seja, pode-se por simplificação, considerar que o bambu tenha uma seção transversal constante igual à seção média. Caso não haja variações expressivas de diâmetro e espessura entre os extremos dos elementos, o que acontece para algumas espécies, dependendo do comprimento dos elementos, pode-se selecionar por facilidade de trabalho e a favor da segurança, bambus cujos menores diâmetros ultrapassem o diâmetro calculado, ou seja, a seleção pode ser feita pela menor seção transversal de cada elemento. Os coeficientes 1,3 e 0,9, utilizados no cálculo de w_f , correspondem às variações de densidade e espessura de parede (Moreira,1997), respectivamente.

12 - Controle das flechas

Devido ao comportamento visco-elástico do bambu, deve-se considerar um aumento da flecha de 65 %, sobre o valor calculado para curta duração. Apesar da excelente performance do bambu em flexão, a reduzida inércia da seção transversal é inconveniente em alguns casos,

por permitir grandes flechas. Observa-se em geral que os bambus, quando tradicionalmente utilizados em flexão, são amarrados em feixes ou são posicionados paralelos e em grande número, para redução do carregamento em cada elemento.

A bitola de seção comercial mínima, indicada para viga de madeira é de $7,5 \times 12 \text{ cm}^2$, que tem inércia máxima de 1080 cm^4 , enquanto que uma peça de bambu de 10 cm de diâmetro e 8 mm de espessura de parede, tem inércia de 308 cm^4 .

Portanto, caso limitemos a carga de um bambu em flexão por um limite arbitrário de flecha máxima, teremos um tubo pouco aproveitável em flexão. Deste modo, uma análise do calculista, em função da aplicação do tubo é fundamental para a definição da flecha máxima, lembrando-se que a inércia do bambu pode ser considerada constante, igual à inércia da seção média, ou seja, a seção em $L/2$, levando-se em conta que a inércia física difere da geométrica por um fator de 1,3, devido ao gradiente de densidade da seção transversal e que as variabilidades geométricas da seção transversal, exigem uma redução de 10 % na inércia. Distinguimos portanto duas inércias, uma inércia geométrica I_g e uma inércia física I_f , que guardam a relação $I_f = 1,3 \times 0,9 \times I_g = 1,17I_g$. Faremos também, $fl_p = 1,65fl$ (fl_p = flecha permanente; fl = flecha devida ao carregamento de curta duração, considerando-se deformações por tensões normais e cisalhantes, estas para bambus curtos). O módulo de elasticidade transversal G , pode ser adotado, por falta, igual a $\frac{E}{15}$. Considerar também

$$E_{c0,d} = k_{\text{mod}} \times E_m.$$

$$fl_p \leq \frac{L}{300} \quad (7.19)$$

Cisalhamento na flexão

A verificação de segurança é dada pela equação

$$\tau_d \leq f_{vd} \quad (7.20)$$

$$f_{vd} = k_{\text{mod}} f_{vk} \quad (7.21)$$

$$f_{vk} = 0,7 f_{vm} \quad (7.22)$$

$$\tau_d = \frac{2V_d}{\pi \times Dt} \quad (7.23)$$

Na falta de determinação experimental de f_{vd} , pode-se considerar $f_{vd} = 0,15f_{c0,d}$, considerando-se que o cisalhamento na flexão, tem sempre a direção do feixe de fibras longitudinais, fazendo portanto, um ângulo nulo com as fibras.

Não é justificável que se trabalhe com uma equação completa para a determinação da tensão cisalhante atuante, que leve em conta as variações geométricas ao longo do tubo. Isto iria aumentar demasiadamente os cálculos, trabalhando-se com hipóteses que não correspondem à realidade, como por exemplo, variação linear de espessura de parede ao longo

do tubo. De uma seção à sua vizinha não se garantem variações controláveis de espessura de parede ou diâmetro. A diminuição de diâmetro e espessura de parede, no sentido base-topo do bambu, não é contínua, conforme os trabalhos de *Nascimento (1990)*.

Como os extremos do bambu têm seções diferentes, a menor seção transversal deverá sempre ser verificada ao cisalhamento, embora o cisalhamento devido à flexão não tenha sido responsável pela ruptura nos ensaios realizados de flexão e flexo-compressão.

Ou seja, uma vez tendo-se selecionado os bambus pelas tensões compressivas máximas em flexão e tendo sido estimadas as flechas máximas, verifica-se o cisalhamento na flexão.

O bambu tem resistência muito alta ao cisalhamento perpendicular às fibras, portanto, para um bambu trabalhando em flexão, não há necessidade de verificar o cortante nos apoios. Deve-se apenas cuidar de preencher os apoios com um cilindro de madeira, para que o bambu não seja esmagado radialmente.

Exemplo

Dimensionar um bambu da espécie *Dendrocalamus giganteus* para trabalhar em flexão, bi-apoiado, sujeito a uma força $N_d = 1kN$, aplicada no meio de um vão de 3,5 m.

Considerar umidade ambiente de 70 % e $\lambda_D = \frac{D_i}{D} = 0,83$.

Solução:

$$M = \frac{1000 \times 3500}{4} = 875.000 Nmm$$

$$\frac{875000}{w_f} \leq 0,6 \times 0,6 \times 40 N / mm^2 \therefore w_f \geq 60764 mm^3$$

Substituindo-se nas Eq.(7.15) e (7.16), obtemos respectivamente $w_g \geq 51935 mm^3$ e $D \geq 100 mm$. Portanto $t \geq 8,3 mm$.

Estas medidas podem se referir à seção transversal central do elemento, ou mais conservativamente e de mais fácil seleção, à extremidade de menor seção. A seleção dos bambus pode ser feita apenas pelo diâmetro, pois como dito anteriormente, a esbeltez λ_D é bem definida para cada espécie.

XII - Controle das flechas

$$\text{Sejam } E_{c0,d} = 6000 MPa \text{ e } G_d = \frac{E_{c0,d}}{15}$$

$$F = \left(\frac{1000 \times 3500^3}{48 \times 6000 \times 3,29 \times 10^6} + \frac{1000 \times 3500}{2 \times 2391 \times 400} \right) \times 1,65 = (45,2 + 1,82) \times 1,65 = 77,7 mm$$

O efeito das deformações por cisalhamento é desprezível, neste caso, sendo relevante contudo, nos testes de flexão de elementos relativamente curtos.

Trata-se de uma flecha de valor elevado, em termos de aplicação estrutural, aproximadamente $L/50$, que é bem superior a digamos $L/300$. Portanto, um tubo com estas dimensões, sujeito a este carregamento, teria aplicação limitada. Lembro mais uma vez que os bambus são tradicionalmente utilizados em feixes, ou em grande número de bambus paralelos, para maior distribuição das ações sobre os diversos elementos.

Verificação do cisalhamento na flexão

Esta verificação é normalmente dispensável, como podemos verificar:

$$\tau_d = \frac{2 \times 500}{\pi \times 100 \times 8,3} = 0,38 \text{ MPa} \ll 0,7 \times 0,6 \times 6,3 = 2,65 \text{ MPa} \rightarrow \text{Ok!}$$

XIII - Dimensionamento à torção

De todas as solicitações estruturais do bambu, esta seria a menos comum. Qualquer sistema destinado a transferir torção ao bambu tenderá antes a romper o bambu no local de transferência, do que o corpo do bambu por cisalhamento devido à torção. Como algumas espécies de bambu podem ter variações de espessura de parede, da ordem de 60 % em uma seção transversal, o fluxo de cisalhamento gerado pela torção, tenderá a romper o bambu nestes locais de parede mais fina.

Fazendo-se um estudo comparativo dos dois tipos de abordagem da torção de tubos, seja considerando-se o fluxo de cisalhamento ou as tensões cisalhantes variando linearmente com o raio, chegam-se a valores próximos. Assim, podemos trabalhar com as equações do segundo caso, por nos darem diretamente os diâmetros resistentes a determinada torção, lembrando que o momento polar de inércia deve levar em conta o gradiente de densidade, bem como o coeficiente de variação de 10 %, devidos às variações geométricas, principalmente de espessura de parede.

O coeficiente de segurança $\gamma_b = 1,3$, leva em conta o fato de que estamos trabalhando com diâmetros e espessuras médios e que as tensões máximas de cisalhamento, em se tratando de fluxo, ocorrerão nas espessuras mínimas, que podem ter, em relação à média, uma diferença desta ordem.

Tem-se portanto a condição de segurança dada por:

$$\tau_{T,d} \leq f_{vd} \quad (7.24)$$

$$f_{vd} = \frac{k_{\text{mod}} f_{vk}}{\gamma_b} \quad (7.25)$$

$$f_{vk} = 0,7 f_{vm} \quad (7.26)$$

$$\tau_{T,d} = \frac{13,7T_d}{\pi \times D^3 [1 - (\lambda_D)^4]} \quad (7.27)$$

$$\gamma_b = 1,3$$

A Equação (7.27) já leva em consideração as correções de densidade aparente e variações inércia devidas à geometria, através dos coeficientes 1,3 e 0,9, respectivamente.

Desde que se conheça λ_D para a espécie em estudo, pode-se facilmente selecionar os diâmetros D , pela Equação (7.27). Do mesmo modo que no caso do cisalhamento em flexão, não se justifica trabalharmos com uma equação mais completa para o cálculo de $\tau_{T,d}$, que considerasse as variações geométricas ao longo do comprimento. Este procedimento somente iria aumentar demasiadamente os cálculos. A própria variação de espessura de parede, dentro de uma mesma seção transversal, pode trazer aumentos das tensões cisalhantes, para a manutenção do fluxo de cisalhamento, que seriam bem mais relevantes que as variações geométricas que ocorrem de uma seção transversal à sua vizinha.

Os baixos valores de G , fornecidos em *Janssen (1991)*, confirmam a grande flexibilidade sob torção. Os nós, mais uma vez, são locais discretos de enrijecimento, que diminuem a rotação devida à torção. Porém, o bambu sofre grandes rotações sob torção, o que poderia ser verificado pelas equações da Teoria da Elasticidade, considerando-se por simplificação, a seção transversal constante, igual à seção média.

Os bambus em estado natural, desenvolvem grandes folhagens na sua parte superior, que por sua vez, sob ação dos ventos, geram fortes momentos fletores e momentos de torção ao longo do tubo. A participação das distorções, conjuntamente com os módulos resistentes relativamente baixos das seções transversais médias e superiores, se fazem exatamente no sentido de permitirem os deslocamentos necessários para alívio destes esforços solicitantes, seja diminuindo os braços de alavanca, seja por apoio da folhagem do bambu solicitado, nas folhagens dos bambus vizinhos. Por outro lado, os fortes momentos fletores gerados, exigem alta rigidez à compressão e tração paralelas às fibras e é exatamente o que ocorre com o bambu.

Exemplo

Quais as dimensões do bambu necessárias para resistir ao momento de torção $T_d = 0,6kNm$, constante ao longo de seu comprimento ?

Considerar umidade ambiente de 65 % e bambus da espécie *Dendrocalamus giganteus* com razão $\lambda_D = 0,83$. Da Tabrla 7.6, temos que $f_{vm} = 6,3 MPa$.

Aplicando-se a condição de segurança, teremos:

$$\frac{13,7 \times 600 \times 1000}{\pi \times D^3 (1 - 0,83^4)} \leq \frac{0,6 \times 0,7 \times 6,3}{1,3} \therefore D \geq 135mm \Rightarrow t \geq 11,5mm$$

Selecionar portanto, bambus cujo menor diâmetro seja superior ao valor calculado. A espessura é controlada automaticamente por λ_D .

XIV - Flambagem dos bambus

A uniformidade do tecido e da geometria é a grande particularidade dos bambus em relação às árvores em geral, além do fato de que a maior parte das espécies é oca. A aptidão para a absorção de todos os tipos de esforços solicitantes, assim como as árvores, é decorrente de sua própria condição natural, onde exposto a fortes ventos, como visto, têm suas paredes bastante solicitadas, principalmente em sua parte basal.

Por isso é bom lembrar que a presença de bambus maduros, junto aos bambus jovens é fundamental para que sirvam de apoio lateral, através de suas folhagens, evitando-se rupturas prematuras e também o desvio do eixo retilíneo, antes que os bambus estejam com seus tecidos devidamente lignificados.

Embora esta capacidade de deslocar-se em flexo-torção seja extremamente útil para os bambus em estado natural, ela reduz os limites de utilização dos bambus em determinadas aplicações estruturais, onde estará sujeito à flexão e os estados limites de resistência de bambus sujeitos à compressão.

Neste último caso, o aumento da deflexão lateral Δ por fluência, acrescido à imperfeição inicial δ_0 , poderia com grande probabilidade, levar o bambu ao colapso. O bambu possui também, desvios do eixo reto centroidal imaginário, cujas medições precisas são inviáveis do ponto de vista dos sistemas industrial e comercial.

Como acontece com todos os elementos fabricados com outros materiais, a preocupação com as imperfeições iniciais aumenta com a esbeltez dos elementos. Qual a imperfeição inicial a adotar? Como definir um segmento curto de bambu, se as imperfeições iniciais são praticamente inevitáveis?

De qualquer modo, segmentos de bambu, com comprimentos iguais a um comprimento internodal, estariam antes, se comprimidos, sujeitos a efeitos localizados nos extremos. Isto porque os bambus têm em geral uma relação (área do anel ou área útil)/(área do círculo ou área envolvida), da seção transversal, da ordem de 33%. Neste caso, qual o percentual da área útil seria realmente efetiva, no contato com outros elementos?

Evidenciam-se deste modo, dois pontos fundamentais para a aplicação estrutural do bambu:

1. A seleção dos elementos para determinada função estrutural, com ênfase aos elementos sujeitos à flexo-compressão.
2. O detalhamento dos pontos de transmissão dos esforços solicitantes.

O dimensionamento de elementos genéricos, sujeitos à flexo-compressão, dependerá do critério de seleção adotado por determinado fabricante de estruturas. Por exemplo, elementos de treliças espaciais com $2m$ de comprimento, tanto esteticamente quanto em termos de resistência, não devem ter imperfeição inicial maior que 1 cm .

Mesmo dentro de uma mesma espécie, o desenvolvimento natural do eixo longitudinal, difere de um indivíduo para outro, sendo porém mais notável entre diferentes espécies. Têm-se na realidade superposições de ondas senoidais longitudinais, por um lado, com desenvolvimento helicoidal ao longo do comprimento, que podem ser visualizadas, se tomamos os centros de diversas seções transversais, com referência a um eixo imaginário que une as seções extremas (*Moreira, 1997*).

Contudo é possível, dentro de gêneros como *Dendrocalamus*, *Phyllostachys* e *Guadua*, selecionar elementos visualmente retilíneos ou outros ligeiramente arqueados, estes com o plano de maior deflexão bem definido, sendo portanto a imperfeição inicial facilmente

estimada, bastando-se que para isto o elemento seja encostado longitudinalmente a uma haste metálica perfeitamente retilínea.

Os testes de flambagem em bambus da espécie *Dendrocalamus giganteus* (Moreira, 1997), em sistemas bi-rotulados, revelaram que o plano de deflexão aproxima bastante do plano definido pelo centro da seção transversal que mais se distancia do eixo imaginário que une o centro das 2 seções extremas e por estes centros.

Pudemos também constatar que os bambus tiveram o colapso definido pelo esmagamento progressivo das fibras na região côncava, sujeitas portanto às maiores tensões compressivas, não havendo problema de flambagem elástica local.

As curvas $P \times \Delta$ não são sensíveis à ultrapassagem local, na região mais solicitada à compressão, do limite de proporcionalidade das fibras, mas somente às tensões de esmagamento, 60 % maiores que as primeiras. Estas, uma vez atingidas, propagam rapidamente o esmagamento para as zonas vizinhas, em um arco circunferencial, ou arco de esmagamento, com ângulo interno inferior a 180° , rompendo a seção e levando o elemento estrutural ao colapso.

Os elementos mais rígidos podem se abrir longitudinalmente, em 2 ou mais tiras, que chegam a ultrapassar, em comprimento, os nós mais próximos à região de esmagamento. Em um dos tubos ensaiados, bastante retilíneo e com baixa esbeltez, houve explosão do elemento estrutural, ou seja, o bambu abriu-se simetricamente em diversas tiras longitudinais, como um barril, ao longo de todo o comprimento de 2 metros, sem contudo, lançar pedaços, provavelmente pelo atrito das extremidades com a prensa.

Não houve problema de instabilidade local das paredes em regime elástico, mas simplesmente, o movimento destas paredes no sentido da concavidade, ao se atingirem as tensões de esmagamento, que em alguns casos é seguida pela ou ocorre simultaneamente com a separação de tiras longitudinais. As paredes do bambu, sendo relativamente espessas, absorvem deformações por flexão, donde apresentar a estabilidade local detectada, diferentemente de tubos metálicos de parede fina, que ao tentarem absorver as grandes deformações axiais através da flexão, buscam uma posição de equilíbrio que está bastante distante da configuração prévia ao ponto crítico, caracterizando a flambagem local.

Como o bambu sempre possui imperfeições iniciais, pelo menos para duas distâncias internodais, ele estará necessariamente em flexo-compressão. Neste caso, a esbeltez passa a ser um parâmetro calculado apenas para a consideração ou não da fluência e do comprimento máximo do elemento. Tem-se portanto um critério único de dimensionamento, onde somente é alterada a excentricidade devida à fluência. A verificação de segurança é portanto totalmente controlada pelas tensões compressivas máximas na região côncava:

$$\frac{\sigma_{Nd}}{f_{c0,d}} + \frac{\sigma_{Md}}{f_{c0,d}} \leq 1 \quad (7.28)$$

$$M_d = \frac{N_d \times e_{1f}}{1 - \frac{N_d}{F_E}} \quad (7.29)$$

$$e_{1f} = e_i + e_a + e_c \quad (7.30)$$

$$F_E = \frac{\pi^2 E_{c0,ef} I}{L^2} \quad (7.31)$$

F_E tem este valor para todas as condições de contorno diferentes da condição engastado-livre, onde

$$F_E = \frac{\pi^2 E_{c0,ef} I}{4L^2} \quad (7.32)$$

$$E_{c0,ef} = k_{\text{mod}} E_m \quad (7.33)$$

$$I_f = 0,9 \times 1,3 \times I_g = 1,17 \times I_g \quad (7.34)$$

e_i = excentricidade accidental ou situação de projeto;

$$e_i = \frac{M_{1d}}{N_d} \geq \frac{D}{20} \quad (7.35)$$

e_a = imperfeição inicial medida com auxílio de haste retilínea metálica ou pelo menos igual a $L/250$, quando a forma do bambu impedir a medição.

e_c = excentricidade devida à fluência, dada pela Equação (7.36), cujos termos estão definidos na *NBR 7190 (1996)*.

$$e_c = (e_{ig} + e_a) \left\{ \exp \left[\frac{\phi \times [N_{gk} + (\psi_1 + \psi_2) N_{qk}]}{F_E - [N_{gk} + (\psi_1 + \psi_2) N_{qk}]} \right] - 1 \right\} \quad (7.36)$$

Nestas equações, lembramos que as forças normais características não levam em conta os coeficientes de ponderação das ações.

Para peças curtas, $\lambda \leq 30$, sujeitas à compressão pura, despreza-se o cálculo da fluência. Para os demais casos, calcular sempre a parcela da fluência. Considerar também a esbeltez máxima igual a 140.

Como visto, devido às excentricidades naturais e accidentais, o bambu comprimido trabalhará em flexo-compressão. Portanto, sua carga limite é sempre uma fração da carga de Euler F_E . Fazendo-se portanto $N_d = k \times F_E$ e desenvolvendo-se a equação para k , temos:

Façamos antes

$$B = \frac{F_E}{A_f} + \frac{F_E \times e_{1f} \times D}{2 \times I_f} + f_{c0,d} \quad (7.37)$$

$$A_f = 0,95 A_g \quad (7.38)$$

onde A_f = área física e A_g = área geométrica. Teremos então,

$$k = \left(\frac{B - \sqrt{B^2 - \frac{4F_E \times f_{c0,d}}{A_f}}}{\frac{2F_E}{A_f}} \right) \quad (7.39)$$

Para o pré-dimensionamento de um elemento sujeito a determinada ação compressiva N_d , pode-se considerar que N_d seja igual a 40 % do valor da carga de Euler. Obtem-se então, da equação de Euler, o valor de inércia física I_f , que seria necessário para resistir ao esforço e sequencialmente, o diâmetro D , considerando-se arbitrada para determinada espécie, a esbeltez λ_D . Procedese então à verificação da seção pré-dimensionada, segundo os critérios apresentados.

Exemplo

Dimensionar um bambu da espécie *Dendrocalamus giganteus*, com 3 metros de comprimento, sujeito a uma força de compressão $N_d = 20 \text{ kN}$, para um sistema estrutural bi-rotulado, sujeito à umidade ambiente de 70 %.

Da Tabela 7.3, tem-se $f_{c0,m} = 40 \text{ MPa}$, $E_{c0,m} = 10.000 \text{ MPa}$ e para a umidade ambiente $k_{\text{mod},2} = 1$, logo

$$f_{c0,d} = 0,6 \times 0,7 \times 40 = 16,8 \text{ MPa}$$

$$E_{c0,ef} = 0,6 \times E_m = 6.000 \text{ MPa}$$

$$\text{Supondo } N_d = 0,4F_E \therefore F_E = 50 \text{ kN}$$

$$\frac{\pi^2 6.000 \times I_f}{3000^2} = 50.000 \text{ N} \therefore I_f = 7.600.000 \text{ mm}^4$$

$$I_f = 1,17 \times I_g \therefore I_g = 6.495.726 \text{ mm}^4$$

$$\text{Adotando-se } \lambda_D = 0,83,$$

$$\frac{\pi \times D^4}{64} (1 - 0,83^4) = 6.495.726 \therefore D = 126 \text{ mm} \therefore t = 10,7 \text{ mm}$$

$$A_g = \frac{\pi \times 126^2}{4} (1 - 0,83^2) = 3879 \text{ mm}^2$$

$$A_f = 0,95A_g = 3685 \text{ mm}^2$$

Feito o pré-dimensionamento, passamos à verificação do elemento segundo os critérios adotados, considerando-se o elemento com seção transversal constante e igual à seção acima indicada:

$$30 \leq \lambda = 70,5 \leq 140$$

$$e_a = 3000 / 250 = 12 \text{ mm}$$

$$e_i = 12,6 / 20 = 6,3 \text{ mm}$$

$$e_c = (12 + 6,3) \times \left\{ \exp \left[\frac{0,8 \times \frac{20000}{1,4}}{50000 - \frac{20000}{1,4}} \right] - 1 \right\} = 6,9 \text{ mm}$$

$$e_{1f} = 12 + 6,3 + 6,9 = 25,2 \text{ mm}$$

Calculando-se k pela Equação.(7.39), obtem-se $k = 0,49 > 0,4 \rightarrow Ok$

$$N_d = 0,49 \times 50 = 24,5 > 20 \text{ kN} \rightarrow Ok$$

Obviamente poderíamos tentar reduzir o diâmetro máximo e proceder em seguida à sua verificação. A seleção dos bambus se faz pelo diâmetro da seção média, ou seja, $D_{L/2} \geq D_{calc}$ ou mais conservativamente $D_{\min} \geq D_{calc}$.

XV - Ligações estruturais dos bambus

Uma grande quantidade de detalhes construtivos dos nós das estruturas de bambu podem ser encontrados nos livros de *López (1981)*, uma provável coletânea da milenar utilização intuitiva do bambu, tanto na Ásia como por alguns povos da América pré-Colombiana, deixando como herdeiros de ampla utilização, a Colômbia, Costa Rica e Equador, principalmente.

Estas junções consistem basicamente do encaixe da extremidade de um bambu, que poderíamos definir como elemento macho, em entalhes de outro bambu, ou elemento fêmea, com os ângulos e profundidade de corte definidos antes pela prática e bom senso que pelo cálculo estrutural. Complementam normalmente as ligações, os sistemas de amarrações, sejam com fibras naturais, cascas de bambu ou arames galvanizados, auxiliados em muitos casos pela utilização de cavilhas, que além de servirem para o ajuste dos 2 tubos, servem de suporte para os amarres.

Um vasto campo de estudos está aberto à Engenharia Estrutural, para a avaliação da resistência e otimização destas ligações tradicionais. Uma análise destas junções com entalhes mostra que o bambu fêmea, deve ser verificado no contato, ao cisalhamento paralelo às fibras e à compressão inclinada. Por isto a preocupação em situar o entalhe perto de um nó, que teria a dupla função de atenuar os riscos de ruptura, fortalecendo o local contra o corte e contra o esmagamento radial do tubo.

A fácil trabalhabilidade do bambu com ferramentas relativamente simples: - serrote, faca metálica, formão, martelo, etc...bem como o gradiente de densidade radial que dá à casca superficial, grande resistência e condições de fletir bastante sem fraturar-se, permite uma série de soluções criativas para as uniões dos tubos, cuja apresentação seria aqui redundante, já que se encontram em abundância nas referências citadas, sendo já uma coletânea dos processos construtivos milenares, não só de construção de habitações, como de móveis e instrumentos musicais.

Em termos de engenharia, o importante é que o engenheiro saiba avaliar os tipos de solicitações relevantes no local das junções, de forma a saber dimensioná-las ou verificá-las. Cabem portanto as seguintes observações:

O bambu tem ruptura frágil ao cisalhamento na direção das fibras. A superfície resistente ao cisalhamento é normalmente pequena, dada à pequena espessura de parede do bambu. Acrescente-se a isto, o fato de que a uniformidade de distribuição do tecido, caracterizado por um perfeito paralelismo do feixe de fibras resistentes no sentido longitudinal, bem como por uma homogeneidade de resistência, deixa livre de obstáculos ou desvios, o caminho de propagação de uma trinca.

Quaisquer furos na parede do bambu, feitos para a passagem de amarração ou cavilhas, que não tenham simplesmente função de encaixe dos elementos, mas sirvam também para a transmissão de esforços relativamente altos, ficam sujeitos a um dos 3 tipos de ruptura: - fendilhamento, esmagamento ou cisalhamento. A prevalência de um ou outro tipo de ruptura, ou combinação deles, depende da forma do pino, amarre ou cavilha, da umidade do bambu, bem como da forma e do diâmetro do furo.

O bambu aceita bem ser furado por brocas metálicas, porém os pregos, sem furo prévio, iniciam normalmente pequenas trincas na direção das fibras.

As extremidades dos bambus que vão estar sujeitas à descarga em ângulo, proveniente de outro elemento, como a extremidade de uma corda inferior de tesoura de telhado, deve ser reforçada por um cilindro de madeira, no local onde vai receber a corda superior. O mesmo deve ser feito em apoios de bambus funcionando como vigas. O cilindro de madeira deve ser colado na extremidade, tomando-se os devidos cuidados para se ter uma boa colagem.

Qualquer ligação que utilize arame que transfira esforço na direção das fibras, tenderá a fendilhar o bambu naquela direção. O mesmo pode-se esperar de ligações com pregos ou pinos de pequeno diâmetro. A resistência de ligações deste tipo ainda não foi definida para os bambus.

À medida que se aumentam o diâmetro dos pinos, as rupturas passam a ser por esmagamento progressivo das fibras, em bambus com umidade elevada ou baixo módulo de elasticidade E , ou por cisalhamento, em bambus secos e maiores módulos E .

XVI - Verificação dos entalhes

A verificação apresentada neste capítulo leva em conta a resistência do bambu ao cisalhamento paralelo, bem como ao esmagamento local no contato, considerando-se a inclinação das peças no contato.

A perfeita execução destes entalhes e encaixes é fundamental para a resistência da conexão, caso contrário as verificações apresentadas ficariam inválidas. Lançar coeficientes de

segurança demasiadamente altos para suprir a má execução destas junções seria injustificável, deixando-as com capacidade de carga extremamente reduzidas e inviabilizando as estruturas com entalhes.

Na ausência de verificação destas junções, proponho as seguintes:

$$\tau_d \leq f_{vd} \quad (7.39)$$

$$\tau_d = \frac{N_d}{2 \times t \times l_e} \quad (7.40)$$

$$f_{vd} = \frac{k_{\text{mod}} f_{vk}}{\gamma_b} \quad (7.41)$$

$$f_{vk} = 0,7 f_{vm} \quad (7.42)$$

$$\gamma_b = 1,8$$

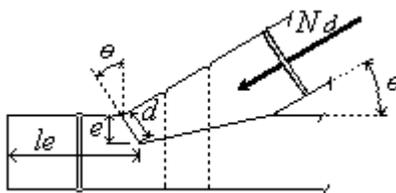


FIGURA 7. 2 - Junção em entalhe

A profundidade e , do dente é calculada em função das tensões compressivas no contato dos elementos. Na realidade, como o bambu é oco e de seção transversal aproximadamente circular, um corte inclinado em relação ao eixo longitudinal do mesmo, gera anéis elípticos.

Proponho que as junções em encaixes sejam tais que o bambu macho tenha como seção de contato, parte de um anel circular que tocará o bambu fêmea em parte de um anel elíptico. Os bambus devem ter diâmetros aproximadamente iguais.

A componente vertical da força N_d poderia esmagar a circunferência do bambu como um todo, na direção radial, caso o entalhe não fosse feito próximo a um nó. A medida desta rigidez nodal ao esmagamento precisa ser melhor definida experimentalmente. Contudo, acho limitante esta necessidade de realizar os entalhes perto dos nós, preferindo a colagem do cilindro de madeira no local do entalhe, antes mesmo da realização deste. O entalhe portanto poderá cortar parte do cilindro de madeira.

Considerar-se ou não a resistência do cilindro de madeira e da colagem, na absorção dos esforços é possível, desde que se proceda ao tipo de colagem que abordaremos no ítem Sistema de Reforço para Elementos Estruturais de Bambu. Este sistema, além da grande eficiência apresentada nos testes de tração e compressão, permite a junção em entalhes, para bambus com diâmetros bastante diferentes. No caso de se utilizar este sistema, os entalhes devem ser feitos na madeira que se alonga para fora do bambu, ficando a sua verificação totalmente sujeita à *NBR 7190 (1996)*. Quanto ao fato da compressão ser inclinada em relação à

disposição longitudinal das fibras, na seção de contato dos elementos, pode-se considerar, por falta, a equação de Hankinson:

$$f_{b\theta,d} = \frac{f_{c0,d} \times f_{c90,d}}{f_{c0,d} \times \text{sen}^2 \theta + f_{c90,d} \times \text{cos}^2 \theta} \quad (7.44)$$

Pode-se considerar por falta que $f_{c90,d} = 0,3f_{c0,d}$,

A verificação de segurança para a compressão no contato do entalhe se faz por:

$$\frac{N_d}{A_{ec}} \leq f_{b\theta,d} \quad (7.45)$$

$$A_{ec} = 0,8 \times A_c \quad (7.46)$$

A_c = área teórica de contato

A_{ec} = área efetiva de contato

O ângulo α , correspondente à profundidade do dente “e”, conforme Figura 7.3 vale:

$$\alpha = \frac{\pi}{2} - \frac{A_c}{R^2 - R_i^2} \quad (7.47)$$

$$d = R - R_i \text{sen} \alpha \quad (7.48)$$

$$e = d \text{cos} \theta \quad (7.49)$$

profundidade do dente deve ser

$$\frac{D}{7} \leq e \leq \frac{D}{4} \quad (7.50)$$

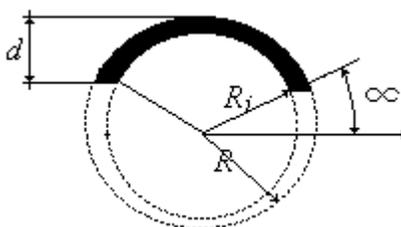


FIGURA 7.3 - Seção de contato do elemento macho

Para evitar desencaixe das peças, elas devem ser bem amarradas com fibras naturais adequadas ou arame galvanizado. É inevitável que estas ligações sejam bem vistórias durante a execução.

Exemplo

Dimensionar um entalhe, conforme Figura 7.2, com $\theta = 30^\circ$, para bambus da espécie *Dendrocalamus giganteus*, sujeito a um esforço de compressão, permanente $N_d = 5 \text{ kN}$. Os bambus têm diâmetro médio de 10 cm e espessura de parede de 8 mm. A umidade ambiente é de 60 % e $f_{vm} = 6,3 \text{ MPa}$.

Solução: Aplicando-se a condição de segurança,

$$\frac{5000}{2 \times 8 \times l_e} \leq f_{vd} = 0,6 \times 0,7 \times 6,3 \therefore l_e \geq 16,5 \text{ mm}$$

Para o cálculo da profundidade do dente, temos:

Pela equação de Hankinson, para $\theta = 30^\circ$

$$f_{b30,d} = 10,55 \text{ MPa}$$

Da condição de segurança sob compressão no contato, temos

$$\frac{5000}{A_{ec}} \leq 10,55 \therefore A_{ec} \geq 474 \text{ mm}^2$$

$$A_c \geq 1,25 A_{ec} = 593 \text{ mm}^2$$

Das Equações. (7.47) e (7.49), obtemos respectivamente, $\alpha = 0,765 \text{ rd} = 43,9^\circ$ e $e = 15 \text{ mm}$.

$$\frac{100}{7} \leq 15 \leq \frac{100}{4} \rightarrow \text{Ok!}$$

Normalmente a peça fêmea, que recebe o entalhe, trabalha tracionada. De acordo com os limites máximos adotados para a profundidade do dente, a capacidade de carga do bambu em tração estaria restrita à resistência do entalhe, dispensando na maioria dos casos, a verificação à tração do bambu. Estas junções em entalhes são desta forma, extremamente ineficientes, se comparadas com a capacidade de carga da seção transversal do bambu. A profundidade máxima do dente poderia extrapolar o limite acima, caso necessário. Porém, quem realmente determina a capacidade de carga do entalhe é o cisalhamento paralelo às fibras, onde há muito pouca superfície resistente e não, a compressão no contato.

XVII - Ligações com pinos

O bambu não tem volume suficiente para trabalhar com embutimentos radiais, de forma que o embutimento de pinos tende a rachar os bambus. Portanto, entre pinos e furos ou entre cavilhas e furos, deve existir uma folga. Isto faz com que logo que solicitados, os pinos se acomodem aos furos, esmagando-os ligeiramente no contato.

Vários testes de tração axial foram realizados em ligações do tipo mostrado na Figura 7.4, em bambus da espécie *Dendrocalamus giganteus*. Houve predomínio das rupturas por cisalhamento e esmagamento progressivo das fibras, sobre as rupturas por fendilhamento.

A ruptura por cisalhamento é frágil e tende a lançar um segmento da parede do bambu, de largura próxima à largura dos pinos. Como estes pinos trabalham em flexão, bi-apoiados nas paredes opostas dos bambus, o pré-dimensionamento de conexões deste tipo deve iniciar-se pela flexão, corte e flecha dos pinos.

Flechas excessivas dos pinos, além de aumentarem o deslocamento axial do elemento estrutural, provocam rotações nos extremos dos pinos, as quais forçam no contato, as fibras internas dos furos, que são os locais menos resistentes da parede do bambu, sendo portanto, prejudiciais às ligações. Recomendamos que a flecha máxima do pino seja inferior a $D/150$.

Os testes mostraram que guardando-se a distância centro a centro de furo de 5.5 diâmetros do furo e distância pino-bordo de 4.5 diâmetros do furo, não menores que 3 cm, estas ligações podem ser controladas pela pressão máxima no furo, sem necessidade de verificação do cisalhamento ou fendilhamento (Moreira, 1994) e (Moreira, 1995a).

O fendilhamento, menos frequente nos testes, pode se tornar mais relevante à medida que se diminuem os diâmetros. Contudo, o limite de flechas do pino já nos conduz normalmente, a diâmetros cujo risco de fendilhamento torna-se inferior ao risco de outras rupturas. A verificação de segurança da conexão seria portanto:

$$\sigma_{cd} \leq f_{c0,d} \quad (7.51)$$

$$\sigma_{cd} = \frac{N_d}{A_{ec}} \quad (7.52)$$

$$f_{c0,d} = \frac{k_{mod} \times f_{c0,k}}{\gamma_b} \quad (7.53)$$

$$A_{ec} = n \times 0,9 \times \phi \times t \quad (7.54)$$

$$\gamma_b = 1,4$$

n = número de furos por extremidade

O coeficiente de segurança de 0.9 refere-se à variabilidade de t e γ_b , à possível excentricidade na distribuição dos esforços aos furos diametralmente opostos, já que o posicionamento da chapa que transfere os esforços aos pinos, sobre o eixo centroidal do bambu é feita visualmente, bem como a possíveis irregularidades do gabarito de furação da chapa e bambu, o que também forçaria desigualmente as paredes dos furos.

Estas ligações são realmente pouco eficientes, em relação à capacidade de carga da seção transversal do bambu, seja à tração ou compressão, necessitando por outro lado de pelo menos dois pinos por extremidade, o que exige um ótimo gabarito de furação, para que os quatro furos trabalhem simultaneamente.

Furos que não sejam perfeitamente circulares, impedindo a acomodação dos pinos aos furos, podem gerar rupturas por fendilhamento, sob cargas bem inferiores às carga de ruptura por esmagamento ou cisalhamento.

Exemplo

Qual a força de trabalho N_d , que poderia ser aplicada axialmente em uma conexão com 2 pinos por extremidade, com diâmetro $\phi = 19 \text{ mm}$, em bambus da espécie *Dendrocalamus giganteus*, com diâmetro médio de $D = 10 \text{ cm}$ e espessura média de parede $t = 8 \text{ mm}$? Considerar umidade ambiente de 65 % e $f_{c0,m} = 40 \text{ MPa}$.

Solução:

Aplicando-se a condição de segurança tem-se:

$$\frac{N_d}{4 \times 0,9 \times 19 \times 8} \leq 0,6 \times 0,7 \times \frac{40}{1,4} \therefore N_d \leq 6566 \text{ N}$$

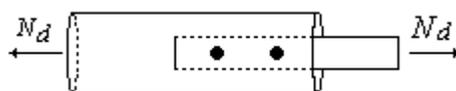


FIGURA 7.4 - Ligação com pinos

XVIII - Ponteira Conectora

Desenvolvemos também um tipo de conexão, em que é dado ao bambu um acabamento em ponta de flecha (*Moreira, 1994*) e (*Moreira, 1995b*). A forma cônica da extremidade é mantida por uma bandagem, que pode ser um compósito de fibras com resinas. No interior desta extremidade é então chumbado um elemento longitudinal, por exemplo um parafuso, que poderia ser facilmente ligado a outros elementos.

O dimensionamento desta ponteira está apresentado no artigo mencionado e é aqui omitido, apesar da grande eficiência da ligação, devido ao seu custo relativamente alto e dificuldade construtiva, quando são exigidos gabaritos precisos, como é o caso de treliças espaciais. O princípio da ponteira tem sido adotado para diferentes soluções, com diversos tipos de componentes, com resultados positivos, que têm estimulado a continuação de sua pesquisa.

XIX - Sistema de Reforço para Elementos Estruturais de Bambu

As conexões dos elementos estruturais são pontos críticos para qualquer estrutura, independentemente do material, visto nelas se concentrarem grandes tensões. Portanto, estes locais ficam sujeitos a escoamento, esmagamento, propagação de trincas, etc; dependendo do material, podendo atingir estados limites de utilização ou mesmo de resistência, razão pela qual merecem total atenção, tanto a nível de projeto, como de execução e inspeção.

O Sistema de Reforço para Elementos Estruturais de Bambu (*Moreira, 1997*), é conceitualmente, uma técnica para se transformar as extremidades ocas do bambu, em extremidades maciças, permitindo desta forma, melhor trabalhabilidade e maior distribuição das tensões locais.

Independentemente da função do elemento estrutural, seja como coluna, como viga ou barra de treliça, este sistema mostra-se muito eficiente e de baixo custo, permitindo uma

série de variações do sistema básico, pela utilização de acessórios. Basicamente, conforme mostrado na Figura 7.5, este Sistema consiste da colagem de um cilindro de madeira no interior da extremidade do bambu, com uma técnica que garanta uma boa colagem entre bambu e madeira.

Para ajuste do bambu sobre o cilindro, são feitos sulcos na extremidade do bambu, igualmente espaçados, com comprimento superior ao cilindro de madeira, e através de um sistema de aperto, por exemplo, com braçadeiras, deforma-se o bambu sobre o cilindro. Como o bambu pode ter uma forma ligeiramente cônica nesta região, o fato dos sulcos serem ligeiramente maiores que o cilindro de madeira, permite que o ajuste bambu-madeira se faça ao longo de todo o comprimento do cilindro.

Para que a colagem seja realmente eficiente, deve-se também proceder a uma raspagem da membrana que reveste o bambu internamente, até se atingirem as fibras resistentes. O adesivo é então passado tanto sobre a superfície do cilindro, como sobre a superfície interna do bambu e então procede-se à prensagem.

O número de sulcos, a serem feitos na extremidade, dependerá da maior ou menor espessura de parede do bambu, de forma que o sistema de prensagem consiga deformar o bambu sobre o cilindro de madeira, evitando-se ao máximo, a presença de vazios entre as superfícies coladas. Do mesmo modo, a largura dos sulcos deve ser tal que durante a prensagem, as tiras de bambu não se toquem circunferencialmente, o que poderia prejudicar a colagem.

Por outro lado, os extremos dos sulcos são pontos sujeitos à propagação de trincas e devem portanto ser suavizados por meio de um furo, com broca de diâmetro igual à largura do sulco. A otimização deste sistema de reforço para cada espécie, com definições ótimas de número e largura de sulcos, madeiras mais compatíveis, etc. deve ser pesquisada individualmente. De qualquer forma, a compatibilidade química dos tecidos da madeira e bambu, garantem que os adesivos eficientes para as madeiras sejam também eficientes para a colagem do bambu, (*Carrasco, 1984*).

Vários testes estáticos de tração e compressão, tanto em corpos de prova secos como saturados em água por 48 horas, foram feitos em bambus da espécie *Dendrocalamus giganteus*, tendo por reforço, cilindros de Angelim araroba.

A colagem foi realizada com bambus e madeira secos, com umidade média em torno de 12 %, usando-se um sistema de prensagem com braçadeiras metálicas. Quanto ao número de braçadeiras por extremidade, o importante é que se consiga deformar realmente o bambu sobre o cilindro de madeira, o que se percebe visualmente.

As braçadeiras são apertadas até seu torque limite, além do qual espanariam o sistema. Este limite é percebido como uma interrupção do curso, quando apertadas por chaves de fenda de torque compatível com a fenda da braçadeira.

Esta ligação trabalha totalmente ao cisalhamento sobre a superfície colada. O adesivo utilizado foi um adesivo apropriado para a colagem de tecidos celulósicos, à base de resorcinol e à prova d'água. A ruptura predomina por cisalhamento do bambu, devido à baixa concentração de fibras resistentes da superfície interna. Devido também a este fato, as tensões médias de ruptura por cisalhamento paralelo às fibras, diminuem significativamente em relação à média dos ensaios de cisalhamento paralelo, que cisalham a parede do bambu em toda a sua espessura de parede, cortando portanto diferentes concentrações de fibras.

Enquanto neste obtivemos $f_{vm} = 6,3 \pm 1,0 \text{ MPa}$, a ruptura do sistema se faz para tensões médias de cisalhamento paralelo de $f_{vm} = 3,13 \pm 0,71 \text{ MPa}$, na interface bambu-adesivo, seja para tração ou compressão, considerando-se bambu e madeira com umidade de 12 %. Para componentes saturados houve uma queda de tensão média de ruptura de 15 %. A ruptura, que ocorre predominantemente por cisalhamento da parede interna do bambu, pode corresponder a toda a superfície cilíndrica ou somente a parte dela. Neste caso, o cilindro sofre um giro no instante da ruptura, forçando lateralmente as paredes do bambu e deste modo, propagam trincas nas extremidades dos sulcos.

A verificação de segurança ao cisalhamento seria,

$$\tau_d = \frac{N_d}{A_e} \leq f_{vd} \quad (7.55)$$

$$f_{vd} = \frac{k_{\text{mod}} \times f_{vk}}{\gamma_b} \quad (7.56)$$

$$A_e = 0,8 \times A_u \quad (7.57)$$

$$A_u = (\pi \times D_i - n_s \times s) \times l_c \quad (7.58)$$

$$\gamma_b = 1,4$$

Para se garantir a ruptura por cisalhamento, deve-se ter um comprimento de colagem l_c , definido em (Moreira, 1997), dado pela Equação (7.59). Esta equação utiliza o modelo de distribuição de tensões normais na linha adesiva de Leicester, (Carrasco, 1984).

$$l_c \geq \sqrt{\left(\frac{0,5D_i + 0,5t}{\pi} - \frac{2r_c}{3\pi} \right) \times \frac{4116N_d}{763D_i f_{t90,d}}} \quad (7.59)$$

$$l_c \geq D \quad (7.60)$$

Toma-se portanto o maior dos valores de l_c , entre os valores calculados pelas Equações (7.55), (7.59) e (7.60).

Na Equação (7.59), têm-se,

r_c = raio da arruela que transmite a força axial ao cilindro de madeira ou igual ao raio do cilindro de madeira, quando a transmissão do esforço se fizer em toda a seção do cilindro.

$f_{t90,d}$ = resistência de cálculo da madeira, à tração normal às fibras.

Observações:

-os cilindros devem ser retirados com eixo paralelo às fibras da madeira.

-o reforço apresenta igual performance em tração e compressão.

Como dito anteriormente, uma vez montado o Sistema Básico, a extremidade do bambu torna-se maciça, permitindo muito maior trabalhabilidade. Em caso de entalhes, estes podem ser agora feitos na madeira que se prolonga para fora do bambu. Em caso de utilização de parafusos ou pinos, para utilização em treliças espaciais, os furos, quer sejam longitudinais,

segundo o eixo do bambu, quer sejam transversais, serão do mesmo modo, feitos na madeira, que oferece muito maior superfície de apoio, contando-se desta forma com maior resistência ao cisalhamento e à compressão localizada.

O total dimensionamento destas conexões passará portanto, além da verificação do cisalhamento bambu-cilindro, pela verificação dos acessórios, governada pelas normas correspondentes aos diferentes materiais utilizados.

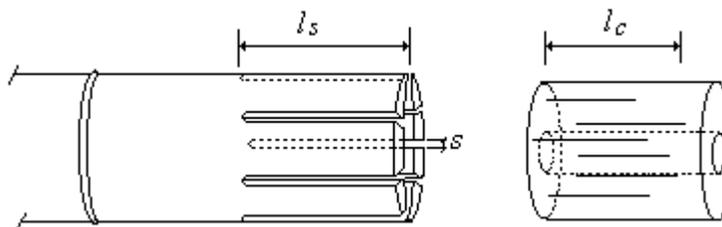


FIGURA 7.5 - Sistema Básico de Reforço

Exemplo

Calcular o comprimento de colagem l_c do cilindro de madeira de Angelim araroba, que trabalhará como reforço de bambus da espécie *Dendrocalamus giganteus*, para suportar uma carga axial permanente $N_d = 23$ kN. Considerar também o diâmetro médio dos elementos $D = 10$ cm, a esbeltez $\lambda_D = 0,85$. São também dados $U_{amb} = 70$ %, 6 sulcos com largura $s = 2,5$ mm, $r_c = 2,5$ cm e $f_{t90,d} = 2,06$ MPa (Angelim araroba).

Temos portanto,

$$A_u = [\pi \times (100 - 2 \times 7,5) - 6 \times 2,5] \times l_c = 252l_c$$

$$A_e = 0,8 \times A_u = 201,6l_c$$

Aplicando-se a condição de segurança ao cisalhamento, Equações (7.55) e (7.56),

$$\frac{23000}{201,6 \times l_c} \leq \frac{0,6 \times 0,7 \times 3,13}{1,4} \therefore l_c \geq 121,5 \text{ mm} > D = 100 \text{ mm} \rightarrow \text{ok}$$

Das Equações (7.59) e (7.60) temos,

$$l_c \geq \sqrt{\left(\frac{50 + 0,5 \times 7,5}{\pi} - \frac{2 \times 25}{3\pi} \right) \times \frac{23000 \times 4116}{763 \times 100 \times 2,06}} \therefore l_c \geq 84 \text{ mm}$$

Logo, adota-se $l_c = 12$ cm

XX - Conclusão

Esperamos, como dito no início deste capítulo, ter contribuído para fornecer subsídios para o cálculo estrutural com bambu, apoiados na lógica da engenharia estrutural e em testes laboratoriais.

A arte da construção, em princípio, não distinguia engenheiros de arquitetos. Eram os artífices, homens dotados de grande intuição e domínio de geometria, os primeiros primeiros engenheiros-arquitetos que deixaram grandes monumentos na antiguidade, em teatros, templos e aquedutos.

O fato da sociedade industrial ter gerado condições para uma ampliação excessiva do conhecimento, a ponto de exigir as super-especializações, não implica necessariamente, que se deva perder totalmente a intuição e “acreditar” somente na teorização dos fenômenos.

A engenharia nunca deixará de ser concreta, onde o sentimento também opina, quando algo parece não ir bem. A abstração pura é uma atividade típica da matemática. Não faz sentido um Engenheiro Civil totalmente abstrato.

Contudo, a ferramenta básica do Engenheiro Civil desta Era é a Física-Matemática aplicada aos problemas de engenharia, tornada cada vez mais acessível e economicamente viável, através do uso de micro-computadores, permitindo um maior aprofundamento da análise dos fenômenos, conjuntamente com os ensaios de laboratório. Ou seja, o conhecimento de Engenharia Civil se transfere em linguagem matemática, onde sempre existe uma preocupação, por parte dos professores, que os alunos adquiram um sentimento dos fenômenos, o que vem a solidificar-se com a experiência profissional.

Este capítulo é portanto um primeiro esboço deste domínio físico-matemático que o engenheiro deve ter dos problemas de estruturas de bambu, sem o qual ele ficaria praticamente impossibilitado de projetar com o material, ficando sujeito a sistemas estruturais mais simples. Trata-se portanto de ferramenta indispensável, que de forma alguma elimina ou dispensa o conhecimento intuitivo milenar, mas antes torna-se um grande complemento da arte da construção.

Esperamos também a nível sócio-econômico, que o bambu possa contribuir para facilitar a necessária administração e alocação de recursos naturais, preenchendo lacunas para determinadas populações que não tenham acesso a outros materiais de construção, bem como estimulando, com sua maior presença nos espaços rurais e urbanos, o reforço da consciência ecológica.

Administração dos recursos naturais, finitude das minas, tecnologias não poluentes, reflorestamentos para utilização dos recursos renováveis, custos de reciclagens, etc., são temas da maior atualidade, que falam indiretamente do caos ambiental que estamos sujeitos a viver, se rápidas e sérias providências, com profundas alterações dos maus hábitos gerados pelo sistema consumista, não forem tomadas.

XXI - Agradecimentos

Não poderíamos deixar de mencionar o grande incentivo e colaboração do Prof. José Luís Mendes Ripper, Coordenador do L.O.T.D.P. (Laboratório Oficina para Treinamento e Desenvolvimento de Protótipo), da PUC/Rio, à pesquisa do bambu como elemento estrutural.

O trabalho interdisciplinar que temos desenvolvido junto a este laboratório, tem-nos proporcionado a descoberta de soluções estruturais que seriam praticamente impossibilitadas por uma visão unilateral do problema, seja ela puramente a tecnologia de materiais e engenharia estrutural, seja ela o design de objetos do ponto de vista estético, geométrico e intuitivo.

As limitações de cada área têm sido deste modo, transpostas pela interdisciplinaridade, e do jogo destas potencialidades, temos como resultado, o sucesso de nossas pesquisas.

Agradecemos também ao CNPq e à FAPEMIG pelo financiamento das pesquisas do primeiro autor.

XXII - Referências bibliográficas

AMADA, Shigeyasu. **The Mechanical Structures of Bamboos in Viewpoint of Functionally Gradient and Composite Materials**. In: Journal of Composite Materials, Vol. 30, n^o 7, 1996.

BAMBOOS BAMBOO Current Research. In: Proceedings of the International Bamboo Workshop. November 14-18, 1988, Cochin, Índia.

CARRASCO, Edgar W. M. **Ligações Estruturais de Madeira**. Dissertação de Mestrado. São Carlos, USP, 1984, 436 p.

DUNKELBERG, Klauss. **Bamboo Bmboos**. Institute of Lightweight Structures, University of Stuttgart, 1985.

JANSSEN, Jules.J.A. **Mechanical Properties of Bamboo**. Kluwer Academic Publisher, 1991, Netherlands.

LÓPEZ, Oscar H. **nuevas técnicas de construcción con bambú**. Estudios Técnicos e Colombianos Ltda, Bogotá, Colômbia, 1978.

LÓPEZ, Oscar H. **manual de construcción con bambú - construcción rural**. Estudios Técnicos Colombianos Ltda, Bogotá, Colômbia, 1981.

MOREIRA, Luís E. **Desenvolvimento de Treliças Espaciais de Bambu**. Dissertação de Mestrado. PUC/Rio, RJ, 1991, 172 p.

MOREIRA, Luís E. **Análise pelo M.E.F. de ligações com pinos circulares em tubos de bambu solicitados axialmente**. In: Anais do V EBRAMEM., E.E.U.F.M.G., Belo Horizonte, MG, 1995a.

MOREIRA, Luís E. **Estudo analítico de uma nova ligação para tubos de bambu solicitados axialmente**. In: Anais do V EBRAMEM, E.E.U.F.M.G., Belo Horizonte, MG, 1995b.

MOREIRA, Luís E. **Aspectos Singulares da Flambagem, Ligações Estruturais, Dimensionamento Estrutural e Metodologia de Experimentos relativos ao Bambu em forma Tubular**. Tese de Doutorado com defesa prevista para julho de 1997, PUC/Rio - RJ.

NBR 7190. **Norma de Projeto de Estruturas de Madeira**. In: Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP, Dep. de Eng. de Estruturas e Fundações, São Paulo, 1996.

NASCIMENTO, Alexandre A. **Estrutura do Colmo e Propriedades Físicas do Bambu Gigante**. Dissertação de Mestrado em Ciência Florestal, Viçosa, MG, 1990, 85 p.

RECENT RESEARCH ON BAMBOO. In: Proceedings of the International Bamboo Workshop, october 6 - 14, China, 1985.