

2 Revisão bibliográfica

2.1. Introdução

As características físicas, mecânicas, forma, pouco peso, fácil disponibilidade e baixo custo, tornam o uso do bambu como material de construção uma tradição nos países onde a planta cresce em abundância, principalmente nas zonas tropicais e subtropicais da Ásia e em alguns países da América Latina, onde dela se obtém alimento, moradia, infinidade de objetos de uso doméstico, ferramentas, instrumentos musicais, etc.

Experiências realizadas no Departamento de Engenharia Civil da PUC-Rio demonstram que o bambu combina com qualquer outro tipo de material, sendo possível seu uso na construção de lajes, vigas e pilares de concreto, podendo substituir o uso do aço e reduzindo o custo da obra. As principais vantagens do bambu quando empregado como reforço ao concreto são: baixa energia por unidade de tensão (comparado com o aço) e alta resistência à tração.

Vê-se nas Figuras 2.1, 2.2 e 2.3 substituições das tradicionais armaduras de aço por bambu.



Figura 2.1 - Armadura longitudinal de pilar em bambu. Fonte: Rosa (2002).



Figura 2.2 - Fôrmas permanentes de lajes armadas com bambu. Fonte: Achá (2002).



Figura 2.3 - Tratamento e concretagem de lajes armadas com bambu. Fonte: Achá (2002).

Outras características positivas do bambu:

- Possui elevada resistência à tração com relação ao peso, se comparado com o aço, concreto ou madeira;
- A superfície externa natural é lisa, limpa, de cor natural atrativa e não requer pintura, raspagem ou polimento;
- É disponível em quase em todo o mundo nas regiões de clima tropical e sub-tropical, abundante, de rápido crescimento, de baixo custo e de baixa energia de produção;
- Pode ser cortado tanto longitudinalmente como transversalmente com o auxílio de ferramentas simples em razão de sua constituição fibrosa;

- É um material fácil de ser transportado e armazenado devido a sua forma circular e seção oca o que fazem com que seja um material leve.

A Tabela 2.1 apresenta uma comparação baseada na energia de produção por unidade de tensão para materiais de construção.

Tabela 2.1 - Relação energia de produção por unidade de tensão. Fonte: Ghavami (1992).

Material	Bambu	Madeira	Concreto	Aço
MJ/m ³ /MPa	30	80	240	1500

Compara-se na Tabela 2.2 a relação entre resistência à tração e peso específico do bambu e de outros materiais de construção com a resistência do aço.

Tabela 2.2 - Relação resistência à tração X peso específico. Fonte: Ghavami (1992).

Material	Resistência à Tração σ_t (N/mm ²)	Peso específico (N/mm ³ 10 ⁻²)	$R=(\sigma_t / \gamma)10^{-2}$	R / R _{aço}
Aço (CA 50A)	500	7,83	0,63	1,00
Bambu	140	0,80	1,75	2,77
Alumínio	304	2,70	1,13	1,79
Ferro Fundido	281	7,20	0,39	0,62

Nota-se que o bambu apresenta uma resistência à tração x peso específico 2,77 vezes maior que a do aço.

O bambu possui, no entanto, algumas desvantagens: complexidade das conexões e aspectos artesanais de produção, além de apresentar baixo módulo de elasticidade, variação de seu volume por absorção de água e suscetibilidade ao ataque químico e de microorganismos (GHAVAMI, 1992).

Pela sua versatilidade, o bambu é um dos materiais mais antigos a ser utilizado pela humanidade. Há registros de uso do bambu na engenharia no início da civilização, na China, onde pontes suspensas foram construídas com cabos de bambu, dando origem a pontes e coberturas suspensas que hoje são construídas com cabos de aço. Técnicas de construção desenvolvidas na Índia

neste período são até hoje utilizadas em países orientais como Indonésia, Taiwan e Tailândia. A eficiência deste material para a construção civil é comprovada considerando a durabilidade das obras construídas pelos povos asiáticos. As Figuras 2.4 a 2.7 apresentam construções em bambu.



Figura 2.4 - Stand do SEBRAE/AC - Feira do Empreendedor - Exposição Agropecuária do Estado do Acre – EXPOACRE – 2005.



Figura 2.5 - Memorial Indígena - Campo Grande - MS. Fonte: Ghavami (1992).



Figura 2.6 - Ponte de bambu em Stuttgart, Alemanha. Fonte: Ghavami (1992).



Figura 2.7 - Vistas frontal e interna da Catedral construída em bambu na Colômbia. Fonte: Ghavami (1992).

Em países da América do Sul com abundância do material, como Colômbia, Peru e Equador, várias aplicações têm sido exploradas, principalmente na confecção de paredes, muros e andaimes. A Colômbia é o país da América Latina que mais emprega o bambu na construção de habitações populares. A fim de solucionar os problemas habitacionais na Colômbia, vêm se desenvolvendo programas governamentais que incentivam o uso deste material. O Brasil possui registros que mostram a eficiência do bambu. A partir de 1979 quando o professor Khosrow Ghavami iniciou estudos com bambus no Brasil, seu emprego vem ganhando importância econômica e espaço na construção civil. No meio rural está sendo utilizado em cercas, paredes de pau a pique, tubulações para irrigação, etc. Construções de grande porte como casas, pousadas e lojas afirmam a qualidade e beleza do material (CRUZ, 2002).

2.2. Guadua weberbaueri

Guadua weberbaueri é um bambu lenhoso, arborescente e espinhoso. A espécie apresenta uma estrutura vegetativa modular composta de rizomas, brotos aéreos sem ramos e folhas, e colmos com ramos e folhas. Este bambu possui um sistema subterrâneo rizomático extensivo, persistente e ramificado, que cresce horizontalmente próximo à superfície do solo (em torno de 20 cm de profundidade), podendo atingir profundidades maiores ou até mesmo emergir a superfície, ao desviar de obstáculos como raízes grandes (SILVEIRA, 2001). Por ser curto, grosso, curvado, achatado dorsiventralmente, o rizoma é classificado como paquimorfo (LONDOÑO, 1992).

2.3. As florestas abertas com bambu no sudoeste da Amazônia

A vegetação na região sudoeste da bacia Amazônica é caracterizada pela ocorrência de florestas de transição entre a Amazônia e áreas extra-amazônicas (PRANCE, 1989), predominando nesse cenário, a Floresta Ombrófila Aberta (IBGE, 1997). Esta tipologia florestal é marcada pela abundância de palmeiras, cipós ou bambus no dossel normalmente aberto, o que permite o reconhecimento de fâcies desta floresta (VELOSO et al., 1991).

As florestas abertas com bambu do gênero *Guadua*, “Pacales” no Peru e “Tabocais” no Acre, são incomuns na Amazônia, mas no sudoeste da bacia,

cobrem áreas extensas, sendo uma das poucas formações florestais amazônicas reconhecidas facilmente a partir de imagens do sensor orbital Landsat Thematic Mapper (Bandas 3, 4 e 5) (SILVEIRA, 2001). As manchas de floresta com bambu possuem de 10 a 104 km² (SILVEIRA, 2001) e sua identificação é possível, pois a densa folhagem do bambu reflete o infravermelho próximo e médio (bandas 4 e 5) mais que outras espécies (NELSON, 1994).

Através dos dados espectrais de 15 cenas contíguas de imagens de satélite entre 7-11° latitude S e 66-74° longitude W, Nelson (1994) calculou em 121.000 km² a área ocupada pela floresta com bambu no sudoeste da Amazônia. Análises de imagens adicionais (SILVEIRA, 2001) estimaram em 180.000 km² a área coberta por este tipo de floresta no Brasil, Peru e Bolívia (Figura 2.8).

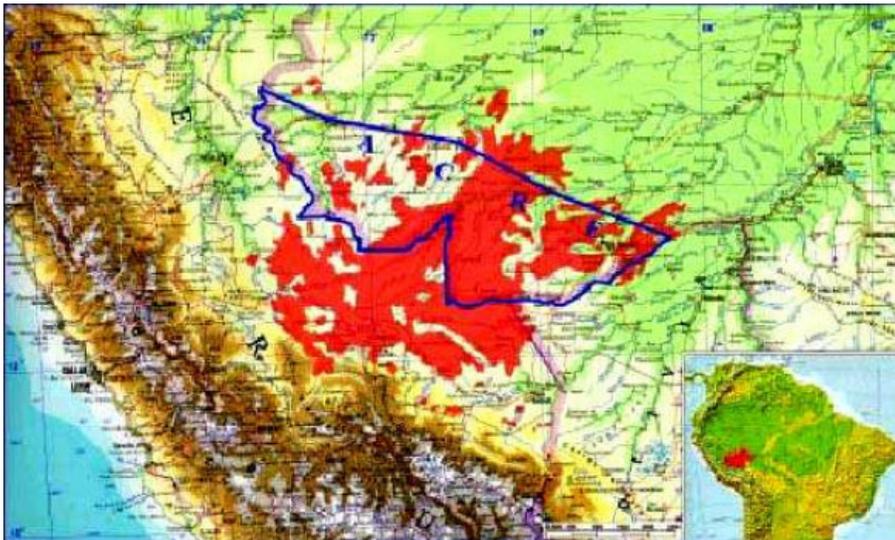


Figura 2.8 - Distribuição da floresta aberta com bambu no sudoeste da Amazônia. Mapa produzido a partir da interpretação visual de imagens Landsat TM falsa-côr (bandas 3, 4 e 5), por B.W. Nelson com imagens do INPE (Brasil) e por R. Kalliola, utilizando imagens do INRENA (Peru). Fonte: Oliveira (2000).

O bambu ocorre em cinco, dentre as onze tipologias florestais identificadas no Acre (GOVERNO DO ESTADO DO ACRE, 2000). A floresta com bambu dominando, a floresta com bambu mais floresta com palmeiras, a floresta com bambu mais floresta densa e a floresta com bambu em área aluvial, representam 38% da cobertura florestal do Acre. A floresta com palmeiras mais floresta com bambu representa 21% da vegetação.

As primeiras observações sobre a fisionomia da floresta com bambu foram efetuadas por Huber (1904), durante viagem exploratória ao alto Solimões e

principais afluentes. As espécies do gênero *Guadua* em geral apresentam espinhos nos colmos e ramos, e assim como outros bambus são semelparas (um único evento de reprodução sexuada) e monocárpicas (morrem após esse evento) (SILVEIRA, 2001). *Guadua* é um dos gêneros de bambu com maior amplitude de distribuição no novo mundo (LONDOÑO e PETERSON, 1991), e a maioria das 33 espécies ocorre no México, América Central e na América do Sul, com exceção do Chile, em savanas, cerrados e florestas de galeria, florestas montanas baixas e florestas tropicais de terras baixas (CLARK, 1995).

No Acre, *Guadua weberbaueri* Pilger e *G. sarcocarpa*, Londoño & Peterson apresentam uma distribuição ampla, ocorrendo freqüentemente nos interflúvios tabulares. *G. superba* Huber restringe-se às florestas temporariamente alagadas ou a áreas de drenagem deficiente, enquanto *G. angustifolia* Kunth apresenta uma distribuição mais restrita (SILVEIRA, 2001).

Guadua weberbaueri Pilger é uma espécie de bambu que ocorre a 1.500 m de altitude na cordilheira dos Andes (CLARK, 1995), desce o piemonte na região de Pucalpa ao norte até Puerto Maldonado mais ao sul, no Peru, penetrando em território brasileiro através dos interflúvios colinosos das terras baixas no Acre, ocupando grandes clareiras e dominando o dossel das florestas. Esta espécie tem um ciclo de vida estimado entre 29-32 anos (SILVEIRA, 1999), após o qual floresce e morre, depositando toneladas de material morto no solo em um espaço de tempo curto (TOREZAN e SILVEIRA, 2000). O ciclo de vida do bambu pode afetar o funcionamento do sistema, já que a deposição do material morto provavelmente tem implicações sobre a produtividade primária, fluxo de energia, decomposição, ciclagem de nutrientes e a microbiota do solo (SILVEIRA, 2001), sendo um elemento oportuno para análises de relações espécie-ecossistema (GRIMM, 1995).

2.4. Manejo e processo de preparo para uso

Existem diversos métodos preservativos que prolongam a vida útil do bambu. Realizou-se um conjunto de procedimentos para obtenção de melhores resultados e maior durabilidade na utilização do bambu. O bambu, por ser passivo de alterações por influência das mudanças climáticas ou de organismos animais ou vegetais, necessita de tratamento para que atinja uma maior durabilidade e resistência. Devendo ser realizado procedimentos e cuidados especiais, que vão desde o corte até sua utilização final, como: corte segundo a

idade e grau de maturidade, cura, secagem, tratamentos preservativos contra fungos e insetos.

2.4.1. Idade do corte

O bambu maduro é o que apresenta melhores características de resistência e é, portanto o apropriado para ser utilizado com fins construtivos. O grau máximo de sazonalidade é atingido em um período que varia de 3 a 7 anos após seu nascimento. Apresentam-se certas características na planta por meio das quais se reconhecem os colmos maduros e levando-as em consideração se procede ao corte. A maioria dos bambus imaturos apresentam cor verde forte, superfície macia, brácteas (folhas originadas nos nós que envolvem o broto como proteção) ainda aderidas, uma fina penugem branca cerosa que se desprende facilmente e poucos galhos no talo (Figura 2.9).



Figura 2.9 - Bambu *Guadua weberbaueri* do Acre com 4 meses de idade, ainda com brácteas.

A maioria dos bambus maduros apresentam cor verde mate, superfície dura, pouca ou nenhuma bráctea aderida ao talo, escassa penugem, manchas escuras jaspeadas que são maiores em quantidade e intensidade em relação ao grau de sazonalidade e possuem grande profusão de galhos (Figura 2.10). Os colmos que além destas características apresentam manchas amarelas já não

são mais utilizáveis porque estão começando a decadência para depois secarem (CULZONI, 1986).



Figura 2.10 - Bambu *Guadua weberbaueri* maduro, idade estimada 3 anos.

2.4.2. Período de corte

Alguns povos da Índia acreditam que fazendo a colheita no tempo em que não se tem lua no céu, ou seja, na fase nova ou crescente, o bambu não sofrera ataque de insetos (LOPEZ, 2003). Em alguns países americanos procede-se ao contrário, realizando-se o corte na fase de lua minguante. Afirmam que nesse período a planta possui o mínimo conteúdo de seiva com o que se consegue uma secagem mais rápida (SPENCE, 1982). No Brasil, os fabricantes de móveis aconselham que a melhor época para colher os colmos é nos meses que não ter letra "r" no nome (maio, junho, julho e agosto) e na fase da lua minguante. Garantem que dessa forma o colmo não estragará posteriormente. Experimentos realizados por Plank e Deogum não resultaram em evidências suficientes para justificar a crença de que uma fase ou mês fosse mais propício para o corte do bambu (LOPEZ, 2003).

2.4.3. Cura

A cura torna os colmos menos susceptíveis ao ataque dos insetos que são atraídos pelo amido e glucose da seiva. Consiste na expulsão ou diminuição do conteúdo de amido da seiva, que é de baixo custo e por isso muito utilizada, porém não é tão eficaz quanto os tratamentos preservativos feitos com produtos químicos.

Existem vários tipos de procedimentos para a cura tais como:

- Cura na touceira: consiste em recostar os talos cortados o mais verticalmente possível contra os não cortados, sem tirar os galhos nem folhas, isolando-os do solo, colocando-os sobre pedras ou suportes (Figura 2.11). Devem permanecer nesta posição de 4 a 8 semanas dependendo das condições do tempo. É usado nas zonas rurais e é muito recomendado já que os colmos conservam a cor natural, não racham nem são atacados por fungos.



Figura 2.11 - Cura na touceira – Bambu *Guadua weberbaueri* do Acre.

- Cura por imersão: é muito utilizada pelos povos orientais e consiste em submergir os talos em água do mar por um período de tempo de 3 dias a 3 meses. Nestes aparecem geralmente manchas e rachaduras nos nós.

2.4.4. Secagem do bambu

Os bambus, quando ainda nas touceiras, possuem uma umidade elevada, devido à seiva ou líquido condutor das substâncias nutritivas. Devendo esta umidade ser reduzida até um valor de 10 a 15%, minimizando a contração ou dilatação pela variação da umidade, ocorrendo melhora das propriedades mecânicas do bambu devido a difícil sobrevivência de organismos nocivos ao bambu.

Dentre os diversos fatores que influenciam a secagem temos: espécie do bambu, condições de secagem, espessura da parede do talo e grau de maturidade. Diferentes espécies apresentam características diferentes de secagem. Algumas precisam de mais tempo que outras devido não só à espessura da parede, mas também porque nos talos maduros o conteúdo de umidade decai com a altura. A porção basal demanda mais tempo na secagem que a superior e os talos imaturos também. Os talos imaturos de paredes delgadas (espessuras menores que 7,5 mm) deformam-se durante a secagem e suas paredes tendem a afinar-se. Os talos maduros com paredes de espessuras superiores a 12,5 mm tendem a apresentar fissuras na superfície principalmente quando a secagem é severa. Os talos maduros ou imaturos com paredes de espessura variando de 7,5 a 12,5 mm podem ser secos sem sofrer danos (LOPEZ, 2003).

Depois de curado o bambu pode ser seco por três métodos diferentes:

- **Secagem ao ar:** se realiza empilhando os colmos horizontalmente em uma área coberta, expostos ao ar, mas protegidos do sol e da chuva. Após um mês de secagem ao ar, a umidade é mínima podendo variar em função da umidade atmosférica. Para minimizar a impossibilidade de controle de temperatura, umidade relativa e circulação de ar deste método devemos escolher galpões de secagem em locais arejados;
- **Secagem em estufa:** é possível manter o controle da temperatura, umidade e velocidade do ar, conseguindo-se melhores resultados em menor período de tempo. Para processo em grande escala justifica-se o investimento que é de alto custo;
- **Secagem ao fogo:** este sistema consiste em colocar os talos depois de cortados sobre o fogo, apoiados em dois suportes a 50 cm do nível do solo sobre carvões acesos com uma altura máxima de 15 cm. O calor aplicado deve ser inferior a 120°C e o bambu deve ser girado constantemente para se conseguir um aquecimento uniforme e não

queimá-lo, com isso se consegue matar qualquer inseto e ao mesmo tempo endurecer a parede externa, tornando-a menos propícia ao ataque de organismos. Este sistema serve também para secar e retificar talos curvados (SPENCE, 1982). Para a obtenção de melhores resultados é recomendado secar previamente os colmos ao ar até uma umidade de cerca de 50%.

- **Impregnação dos veios com polímeros / resinas:** com a cura, os polímeros enrijecem dentro dos veios do bambu aumentando sua rigidez / resistência e prevenindo sua degradação.

2.5. Tratamentos preservativos

Consiste na aplicação de substâncias químicas que impeçam o ataque de fungos e insetos aos colmos, conferindo-lhes com isso maior durabilidade. Os produtos usados podem ser:

- **Óleos ou oleossolúveis:** recomendados para os casos em que os colmos permanecerão enterrados. Entre os óleos obtidos pela destilação da hulha, são usados o cresoto e o alcatrão. O alcatrão é um produto barato, viscoso, que misturado com partes iguais de alcatrão fluido, fornece um excelente tratamento dotado de grande poder de penetração. Dos óleos solúveis o mais comum é o pentaclorofenol ($\text{Cl}_5\text{C}_6\text{OH}$) usado em soluções oleosas a 5% de concentração em peso, dissolvidas em óleos de petróleo. Pode ser encontrado sob as marcas de Gilopen 01 e Dowcide. Existem também preparados prontos a base de pentaclorofenol com diferentes solventes e aditivos que variam em função da melhora da propriedade requerida, podem citar-se o Imprentox, Pentox, Xilophene e Xilotex. O grande inconveniente destes preparados é sua elevada toxicidade.
- **Substâncias hidrossolúveis:** são combinações de sais tais como cromato de zinco clorado, cromato de cobre ácido, metarsenito de zinco, arseniato de cobre cromado, etc. Todas as substâncias preservativas citadas protegem efetivamente o bambu pela ação fungicida e inseticida que possuem e é recomendado seu uso, mas com o cuidado de todo produto tóxico.
- **Resinas sintéticas:** não são produtos preservativos propriamente ditos, mas com a impermeabilização conseguida afasta-se a

possibilidade de ataque de insetos ou fungos. A patente pertence a uma empresa norte americana que fabrica varas de pescar e tacos de golfe (CULZONI, 1986).

2.5.1. Métodos de aplicação de preservativos

As substâncias preservativas são aplicadas por diferentes métodos a depender do tempo em que está sendo feito o tratamento e da infra-estrutura disponível:

- **Tratamento por transpiração de folhas:** utilizam-se colmos recém cortados dos quais não foram tirados galhos e folhas, no máximo 24 horas após o corte. Os colmos são colocados verticalmente num recipiente contendo o preservativo escolhido, que é assim absorvido pela água transpirada pelas folhas. Os preservativos indicados são os solúveis em água. O tempo de tratamento varia com as condições atmosféricas, mas em média, 2 a 4 dias são suficientes. A seguir, as peças devem ser empilhadas à sombra, permanecendo no mínimo 40 dias ao abrigo da chuva de forma a processar-se a secagem. É suficientemente econômico porque não precisa de uma instalação especial para a aplicação;
- **Método de Boucherie:** consiste em fazer penetrar a substância preservativa adotada com auxílio da pressão atmosférica ou de algum dispositivo pneumático. Como no tratamento anterior, para sua aplicação requer-se que a seiva esteja ainda em movimento e por isso utilizado em colmos recém cortados dos quais foram tirados ramos e folhas. Geralmente são necessárias 2 horas para a completa aplicação, sendo muito eficaz e recomendado para explorações em grande escala;
- **Tratamento por imersão:** o processo utiliza colmos secos desprovidos de galhos e folhas que são imersos num reservatório contendo o preservativo que pode ser do tipo de soluções oleosas ou hidrossolúveis frias ou quentes de pentaclorofenol a 5%, de creosoto ou creosoto alquitranado. Devido a maior penetrabilidade das soluções quando quentes, o tempo de imersão pode reduzir-se entre 1 a 4 horas, mas quando o processo é a frio deve-se aumentar para 5 dias ou mais.

- **Tratamento por aplicação externa:** o preservativo líquido é aplicado com um pincel em duas ou três demãos sobre a superfície do bambu. É ineficaz quando aplicado ao colmo inteiro já que a casca é impermeável não penetrando o produto. Quando aplicada às fatias ou peças cortadas melhoram-se os resultados devido a maior absorção da parte interna. Uma solução fácil de preparar é feita com 50 g de pentaclorofenol ($\text{Cl}_5\text{C}_6\text{OH}$) dissolvido em 200 ml de álcool 96° GL, adicionando-se em seguida 100 ml de linhaça e completando-se o volume para 1 litro com querosene (MCCLURE, 1993). Para que dê bons resultados, os bambus devem estar com uma umidade em torno de 15%.

2.6. Meso-estrutura do bambu

A estrutura do bambu em geral pode ser encarada como sendo um material compósito constituído, a grosso modo, por feixes de longas fibras de celulose alinhadas longitudinalmente, unidas por uma substância aglutinante – matriz, a lignina.

O bambu é uma gramínea cuja estrutura pode ser classificada como inteligente. Isto porque tanto sua macroestrutura (diâmetro, espessura, espaçamento entre nós) quanto sua microestrutura (variação da fração volumétrica de fibras de celulose na espessura) desenvolveram-se de forma a otimizar o volume de material frente aos esforços aos quais está sujeito na natureza (peso próprio e flexão devido à força do vento), resultando em um material leve e de excepcionais características mecânicas. A esta otimização natural chama-se Funcionalidade Graduada (GHAVAMI, 2005). A Funcionalidade Graduada da macroestrutura do bambu pode ser observada pela variação do diâmetro e da espessura com a altura, e a da microestrutura é devido à distribuição de fibras de celulose na espessura. Esses feixes de fibras estão distribuídos de tal modo que a zona interna contém de 15% a 30% desses feixes, e a zona externa, de 40% a 70% ((CRUZ, 2002) e (GHAVAMI, RODRIGUES, PACIORNIK, 2003)).

Uma previsão preliminar do comportamento mecânico do bambu em regime elástico pode ser feita utilizando-se as equações da regra das misturas, que dão boa aproximação para as propriedades elásticas dos compósitos a partir das propriedades elásticas de seus constituintes, ou seja, fibras e matriz, e das

frações volumétricas destes materiais. Para que se possa utilizar estas equações para análise dos bambus, é necessário considerar a variação da fração volumétrica na espessura da parede dos colmos. Ghavami et al. (2000) analisaram o bambu como material compósito através do método de microscopia por Processamento Digital de Imagens (PDI), cuja imagem de variação das fibras na espessura do colmo é apresentada na Figura 2.12.

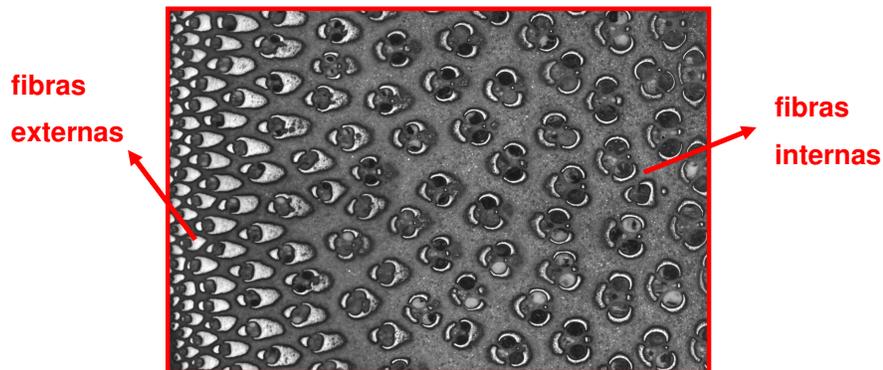


Figura 2.12 - Variação da fração volumétrica das fibras na espessura do colmo do bambu *Guadua weberbaueri* do Acre.

Através de imagens obtidas por Liese (1998) em análise da microestrutura do bambu, observa-se que o que se considera uma fibra em análise macroscópica é um conjunto vascular composto por vasos para transporte de seiva, lignina e fibras de celulose (GHAVAMI ET AL., 2000). Este conjunto vascular é mostrado na Figura 2.13.

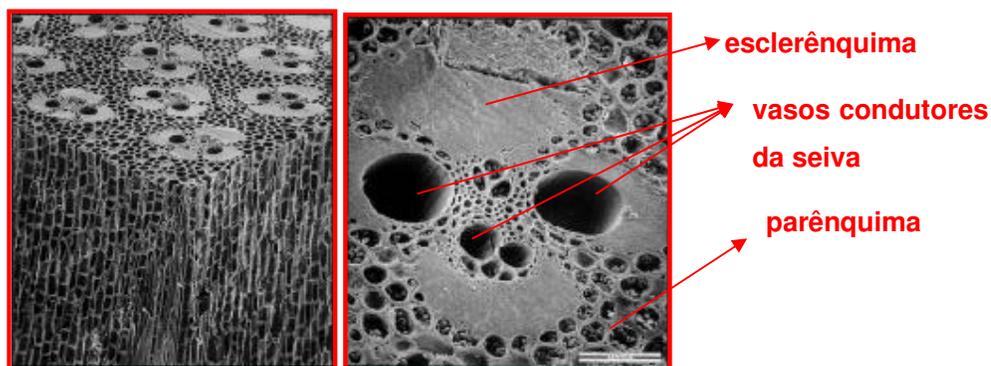


Figura 2.13 - Detalhes da microestrutura do bambu – conjunto vascular (LIESE, 1998).

A estrutura anatômica da seção transversal é determinada pelo formato, tamanho, disposição e número de canais vasculares, sendo típica de um material graduado funcionalmente (AMADA, 1997). O sistema vascular é

composto por fibras e vasos condutores, sendo formados por dois vasos: o metaxilema e o floema, e pelo protoxilema que são artérias principais. Os vasos vasculares são cercados por células parenquimáticas. A espessura da parede do colmo decresce da base até o topo devido à redução de sua parte interna, contendo mais vasos parenquimáticos e menos vasos vasculares. A parte superior do colmo, que contém mais vasos vasculares e menos parenquimáticos, tem maior densidade. Assim, as resistências à tração e à flexão aumentam com o aumento da altura do bambu (LOPEZ, 2003).

A parte externa do colmo é formada por duas camadas de células epidérmicas cobertas por uma camada cutinizada e com cera. Mais internamente ocorre uma camada mais espessa e altamente lignificada, constituída de numerosas células esclerenquimáticas (fibras), dificultando qualquer movimento lateral dos líquidos. O tecido de um colmo é composto pelas células de parênquima, feixes vasculares e fibras. O colmo é composto por 40 % de fibras, 50% de células parenquimáticas, que dá flexibilidade ao bambu, e 10 % de vasos condutores de seiva (LIESE, 1992).

Esclerênquima: regiões mais densas do conjunto vascular. São compostas por micro fibras de celulose sendo responsáveis pela resistência do bambu; os veios são responsáveis pelo transporte de seiva e nutriente das plantas, e a matriz do compósito bambu é composta pelo tecido base denominado parênquima.

Utilizando-se as equações da regra das misturas pode-se gerar uma equação do comportamento mecânico deste material em regime elástico, que resulta numa boa aproximação para as propriedades elásticas dos compósitos a partir das propriedades elásticas de seus constituintes (fibra e matriz) e das frações volumétricas destes materiais. A equação (2.1) mostra o cálculo do módulo de elasticidade de um compósito, onde E_c , E_f e E_m são, respectivamente, os módulos de elasticidade do compósito, fibras e matriz, e V_f e V_m são as frações volumétricas de fibras e matriz.

$$E_c = E_f V_f + E_m V_m \quad (2.1)$$

Considerando que o volume total é a soma entre V_f e V_m , pode-se escrever a equação (2.2).

$$E_c = E_f V_f + E_m (1 - V_f) \quad (2.2)$$

As hipóteses adotadas no desenvolvimento das equações da regra das misturas são fibras longas, alinhadas, espaçamento uniforme entre as fibras e perfeita aderência entre fibras e matriz. Porém, através das Figuras 2.12 e 2.13, nota-se que tanto a distribuição quanto o tamanho das fibras variam na espessura, sendo que sua concentração aumenta da parede interna para a parede externa do colmo, devido às tensões originadas pelas cargas de vento serem maiores na superfície externa dos bambus. As fibras exercem então uma “funcionalidade graduada” na estrutura do bambu, que por isso são considerados materiais compósitos “inteligentes” (GHAVAMI et al., 2000).

É necessário adaptar essas equações de maneira a se considerar a variação da fração volumétrica das fibras na espessura do bambu para que possamos utilizar as equações da regra da mistura para análise dos bambus. Considerando que esta variação na distribuição das fibras se dê segundo um eixo x , onde a parede interna é a origem e o limite máximo é a parede externa do colmo de bambu, as equações da regra das misturas passariam a ser representadas na forma da equação (2.3) (GHAVAMI et al., 2000).

A determinação da forma como esta variação ocorre foi feita utilizando-se como ferramenta o processamento digital de imagens.

$$E_c = f(x) = E_f V_f(x) + E_m(1 - V_f(x)) \quad (2.3)$$

2.7. Características físicas

O bambu por ser um material natural apresenta uma série de fatores que influenciam suas características e propriedades, que variam de acordo com a espécie, idade, tempo de corte, região do talo, umidade, solo e clima local. Um colmo em geral pode ser dividido em três zonas: basal, intermediária e superior.

O bambu é um material que possui baixa massa específica e uma alta resistência mecânica. Essa relação diferencia o bambu dos outros materiais estruturais. O bambu deixa a estrutura mais leve, levando o peso próprio a tornar-se uma parcela considerável no carregamento com materiais mais densos como o concreto.

A densidade dos bambus varia entre 500 a 800 kg/m³, dependendo principalmente do tamanho, quantidade e distribuição dos aglomerados de fibras ao redor dos feixes vasculares (PEREIRA, 2001). Assim, na base do colmo a resistência à flexão é 2 a 3 vezes maior na parte externa do que na interna.

Estas diferenças são menores à medida que se aproxima do topo, devido ao aumento da densidade na parte interna e redução na espessura da parede, que apresenta internamente menos parênquima e mais fibras.

Sua umidade natural varia de 13 a 20%, em função da umidade e do clima do local. O bambu é um material higroscópico, já que se dilata com o aumento da umidade e se contrai com sua perda. Essas mudanças são mais acentuadas no diâmetro que no comprimento, ou seja, nota-se que as variações dimensionais são maiores no sentido radial. O sentido circunferencial apresenta pequenas variações em relação ao sentido radial. E praticamente não existe variação no sentido longitudinal (TEIXEIRA, 2003).

Nota-se que nas primeiras 24 horas o bambu absorve aproximadamente 20% de água em peso e, caso permaneça imerso, continua aumentando gradualmente 40% em 7 dias ((GHAVAMI E HOMBEECK, 1981) e (YOUSSEF, 1979)).

Ghavami e Marinho (2001) determinaram a variação do diâmetro, da espessura de parede do colmo e do comprimento internodal de colmos inteiros das espécies *Dendrocalamus giganteus* e *Guadua angustifolia* provenientes do Jardim Botânico - RJ, e *Guadua angustifolia*, *Guadua tigoara*, *Mosó* e *Matake* de São Paulo. Observaram que a espécie *Dendrocalamus giganteus* apresenta maiores comprimento internodal, diâmetro externo e espessura, quando comparado com outras espécies de bambu. Obtiveram resultados semelhantes à pesquisa realizada por Ghavami e Toledo (1992), onde determinaram propriedades como côr, comprimento, distância internodal, diâmetro externo, espessura da parede, teor de umidade e peso específico para duas espécies provenientes do Estado da Paraíba.

2.8. Propriedades mecânicas

Como todo material natural o bambu sofre alterações em suas características mecânicas devido a uma infinidade de fatores como a espécie, idade da planta, tempo de corte e fatores que fogem ao controle humano como condições climáticas, teor de umidade das amostras, solo do bambuzal. Sendo a idade, a espécie e região do colmo importantes variáveis para a determinação de suas propriedades.

O conhecimento das tensões a que estarão submetidos decorrentes da ação de várias forças é de fundamental importância para o dimensionamento

correto do bambu em peças estruturais. A resistência atingida será função da resistência do material e dos defeitos que debilitam as seções. Os corpos de provas são confeccionados conforme normas do INBAR (1999) – ISO/DIS 22157 e propostas de ensaios elaboradas por Ghavami et al. (1988).

A estrutura fibrosa, em feixes, do bambu favorece a resistência a esforços de tração axial, porém, quando solicitado axialmente, raramente rompe por tração pura (CULZONI, 1986). A principal causa disto reside nas tortuosidades dos feixes e nas mudanças de seções, geralmente nos nós, onde se interrompem as fibras, se reduzem às áreas resistentes e originam-se, na peça, solicitações secundárias de compressão normal, cisalhamento e fendilhamento, às quais o material oferece menor resistência. Segundo Beraldo et al. (2003), a resistência à tração axial do bambu, em algumas espécies, pode atingir 370 MPa. Isso torna atrativo o uso do bambu como substituto do aço. Em geral a resistência à tração axial do bambu, com e sem nó, situa-se entre 40 MPa e 215 MPa, e o seu módulo de elasticidade varia entre 5,5 GPa e 18 GPa.

Em ensaios conduzidos por Ghavami e Hombeeck (1981), conclui-se que à resistência das diversas porções do colmo não difere substancialmente. Entretanto nas regiões inferiores, pela seção transversal maior, são conseguidas cargas últimas maiores. Sendo o nó um ponto de descontinuidade das fibras e de mudanças dimensionais, surgem nele concentrações de tensões quando submetido a esforços. Ghavami e Hombeeck (1981) observaram, em ensaios de tração, que na maioria dos testes a ruptura ocorreu próximo ao nó, e que a parte basal apresentou maior carga de ruptura por possuir maior seção transversal.

Ghavami e Souza (2000) estudaram as propriedades mecânicas do bambu *Mosó* tratado e cru, e obtiveram valores de resistência à compressão de 49,30 MPa para o bambu sem tratamento e 30,95 MPa para o bambu tratado, o que corresponde a uma queda de 37,22 % de resistência no bambu tratado. O módulo de elasticidade longitudinal as fibras foi de 10,27 GPa e 8,77 GPa para os bambus cru e tratado respectivamente, o que representa uma queda de 14,6 %.

Segundo Janssen (1980), a resistência ao cisalhamento do bambu ao longo das fibras é somente de cerca de 8 % da resistência à compressão. Grosser e Liese (1974) afirmam que a resistência ao cisalhamento longitudinal aumenta com a diminuição da espessura da parede, ou seja, da base para o topo da peça do bambu. Argumentam que a porcentagem de esclerênquima (tecido de sustentação do bambu, elemento que proporciona resistência ao material) aumenta com a diminuição da espessura da parede. Em geral, quanto

menor a espessura da parede do bambu, maior é a resistência ao cisalhamento longitudinal. A resistência ao cisalhamento transversal às fibras do bambu situa-se em torno de 30 % de sua resistência à flexão, ou seja, em torno de 32 MPa (variando entre 20 MPa e 65 MPa). A resistência ao cisalhamento longitudinal é de, aproximadamente, 15% de sua resistência à compressão, ou seja, em torno de 6,00 MPa, com variação de 4,00 a 10,00 MPa (BERALDO et al., 2003).

LEE et. al (1994), estudaram as características mecânicas da espécie *Phyllostachys bambusoide*, utilizando amostras de 14,00 cm de diâmetro médio e comprimento aproximado de 9 m. Foram realizados ensaios de flexão, tração e compressão seguindo as recomendações da ASTM D-1037 em 376 elementos de bambu verdes e 371 secos ao ar. A média dos valores atingidos durante o ensaio é apresentada na Tabela 2.3.

Tabela 2.3 - Resistência mecânica da espécie *Phyllostachys bambusoide* (LEE et al., 1994).

Esforço	Resistência (MPa)	
	Colmos verdes	Colmos secos ao ar
Compressão	31,34	43,12
Tração	102	122,5
Módulo de elasticidade à flexão	7350	10890